

· 城市生态保护 ·

## 兰州市 CO 污染分布特征

沈佳惠<sup>1</sup>, 王 行<sup>1</sup>, 李和平<sup>1</sup>, 马丽娅<sup>2</sup>, 马玉霞<sup>1</sup>

(1. 兰州大学大气科学学院, 甘肃 兰州 730000;  
2. 兰州石化公司化工运行一部, 甘肃 兰州 730060)

**摘要:** 为探究兰州市 CO 的分布特征, 利用 2015~2020 年兰州市国控空气质量监测站点的 CO 等 6 项空气污染物逐小时质量浓度资料, 并结合同期兰州市常规气象观测资料, 分析了兰州市 CO 污染的特征, 探讨了 CO 浓度与其他空气污染物和气象要素的关系。结果表明, 2015~2020 年间, 兰州市区的 CO 平均浓度逐年下降, 而榆中兰大校区却在 2017 年之后出现了上升趋势; 兰州市区和榆中兰大校区的 CO 浓度呈现出冬季高夏季低的“U 字型”月度变化特征, 采暖期 CO 浓度值是非采暖期的 2 倍左右; 兰州市区 CO 浓度呈现出双峰型日变化, 峰值主要出现在 09:00 和 21:00, 榆中兰大校区则为单峰型, 峰值出现在 12:00; CO 和 NO<sub>2</sub> 具有相似的双峰型日变化特征, 两者之间的相关系数为 0.718, 而 CO 与 SO<sub>2</sub>、PM<sub>2.5</sub> 和 PM<sub>10</sub> 具有相似的“U 字型”月度变化特征; 气温和风速是影响兰州市 CO 浓度的主要气象要素。

**关键词:** 兰州市; CO 浓度; 时间变化; 空间分布

**中图分类号:** X511

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.16803/j.cnki.issn.1004-6216.2022010042

## Distribution characteristics of carbon monoxide pollution in Lanzhou

SHEN Jiahui<sup>1</sup>, WANG Hang<sup>1</sup>, LI Heping<sup>1</sup>, MA Liya<sup>2</sup>, MA Yuxia<sup>1</sup>

(1. College of Atmospheric Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China; 2. Lanzhou Petrochemical Company, Lanzhou 730060, China)

**Abstract:** In order to investigate the distribution characteristics of carbon monoxide (CO) in Lanzhou, the hourly concentration data of six air pollutants including CO obtained from the national air quality monitoring sites in Lanzhou from 2015 to 2020 were used, considering the regular meteorological observation data in the same period, the characteristics of CO pollution in Lanzhou and the relationship between CO concentration and other air pollutants as well as meteorological elements were analyzed. The results showed that the average concentration of CO in Lanzhou city decreased year by year from 2015 to 2020, while Yuzhong county showed an upward trend after 2017. The CO concentration in Lanzhou city and Yuzhong county showed a "U-shaped" monthly change characteristic with a high concentration in winter and a low concentration in summer, and the CO concentration during the heating period was about twice than that of the non-heating period. The CO concentration in Lanzhou city had a bimodal diurnal variation with the peaks appearing mainly at 09:00 and 21:00, while the Yuzhong county had a single peak appearing at 12:00. CO and NO<sub>2</sub> had similar bimodal diurnal variation characteristics with a correlation coefficient of 0.718, while CO and SO<sub>2</sub>, PM<sub>2.5</sub>, PM<sub>10</sub> had similar "U-shaped" monthly variation characteristics. Air temperature and wind speed were the main meteorological elements which affected the CO concentration in Lanzhou.

**Keywords:** Lanzhou; CO concentration; change of time; spatial distribution

**CLC number:** X511

一氧化碳 (CO) 是一种重要的空气污染物, 具有分布广、数量多和积累性强等特点<sup>[1]</sup>, 于 2012 年被正式列入环境空气质量监测范围内, 2013 年起在全国逐步开展监测工作。大气中的 CO 污染物主

要来源于自然和人为活动: 自然源主要包括 CH<sub>4</sub> 的氧化以及海洋和植物的排放; 人为源主要是含碳物质的不完全燃烧(如机动车尾气和工业生产排放)和森林砍伐<sup>[2-3]</sup>。CO 主要影响人体的心血管和中

收稿日期: 2022-01-23

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41975141)

作者简介: 沈佳惠(1998-), 女, 硕士研究生。研究方向: 大气污染与健康。E-mail: shenjiahui20@lzu.edu.cn

通信作者: 马玉霞(1974-), 女, 博士、教授。研究方向: 气候变化及其影响。E-mail: mayuxia07@lzu.edu.cn

引用格式: 沈佳惠, 王 行, 李和平, 等. 兰州市 CO 污染分布特征[J]. 环境保护科学, 2022, 48(6): 62-69.

枢神经系统<sup>[4-5]</sup>,轻度 CO 中毒可产生头痛、头晕和恶心呕吐等非特异性症状<sup>[5]</sup>。长期接触高浓度 CO 可造成心律失常,诱发或加重冠心病<sup>[4]</sup>,导致神经损伤<sup>[6]</sup>,产生永久性神经后遗症<sup>[5]</sup>,严重时可导致意识障碍、昏迷甚至死亡<sup>[6]</sup>。CO 还是一种重要的反应性气体,可参与光化学反应生成 O<sub>3</sub>,造成二次污染<sup>[7-8]</sup>。此外,CO 可与羟基·OH 发生氧化反应,消耗大量的·OH,减弱大气的氧化能力,间接影响其他温室气体的反应,加剧温室效应<sup>[9-10]</sup>。

王占山等<sup>[2]</sup>对 2014 年北京市 35 个地面监测站点的 CO 数据进行分析发现,CO 浓度的月度变化呈“U 字型”分布特征,采暖季浓度高于非采暖季,日变化则呈双峰型,峰值分别出现在 07:00~09:00 和 23:00 左右,气象要素中相对湿度对 CO 浓度影响最大。方双喜等<sup>[11]</sup>在浙江省临安市大气本底站对 CO 进行了在线观测,结果表明人为活动对 CO 浓度日变化有显著的影响,四季中分别在 07:00~10:00 和 19:00~20:00 出现峰值,全年 CO 浓度呈现出冬、春季高,夏季低的趋势,而城市区域向临安输送的 CO 对观测结果有明显影响。杨继东等<sup>[12]</sup>分析了天津市 12 个国控监测站点的 CO 数据,发现 CO 日变化规律明显,呈典型双峰型,09:00 和 23:00 出现峰值,16:00 出现谷值,冬季 CO 浓度最高,夏季反之最低,CO 和 O<sub>3</sub>、CO 和气温间均呈现出较好的负相关性。冯鑫媛等<sup>[13]</sup>研究了川渝地区大气污染物浓度的时空分布特征及区域差异,结果表明 CO 浓度冬季高夏季低,与除 O<sub>3</sub> 外的其他污染物变化特征一致,其日变化同样也呈双峰型,高峰出现在夜间和上午,同时,日变化特征还存在区域和季节上的差异,高原地区双峰型污染物的上午高峰通常高于夜间,盆地各区域则相反。王叶琳等<sup>[14]</sup>利用 2010~2018 年西安市的监测数据,分析了大气污染物的时空变化特征,研究发现 CO 浓度自 2013 年起逐年下降,月度变化为开口向上的抛物线型,冬季高夏季低,因具有高度的同源性,CO 与 SO<sub>2</sub>、NO<sub>2</sub>、PM<sub>2.5</sub> 和 PM<sub>10</sub> 间均存在着不同程度的正相关。

兰州市地处中国西北部,是重要的工业城市,人口众多,机动车保有量大,冬季燃煤供暖时间长,同时兰州市还是典型的河谷城市,特殊的地形条件导致逆温静风天气频率高<sup>[15]</sup>,污染物的扩散条件差,易形成严重的污染天气。近些年来,民众普遍

将注意点放在了颗粒物和 O<sub>3</sub> 上,却忽略了 CO 污染的研究。兰州作为一个发展中的城市,其机动车保有量在不断地增加,2019 年年末全市机动车保有量 109.50 万辆<sup>[16]</sup>,较 2015 年年末的 80.46 万辆增加了 36.1%<sup>[17]</sup>。而机动车的尾气排放恰恰是 CO 的重要来源之一,因此有必要对兰州市近几年的 CO 污染情况做一个统计分析。本研究利用 2015 年 1 月 1 日~2020 年 12 月 31 日兰州市 6 个国控空气质量监测站点的 CO 污染物浓度数据和同期的气象观测数据,探究了兰州市 CO 浓度时空分布特征、CO 与其他污染物、气象要素之间的关系,以期对兰州市的 CO 污染防治提供参

## 1 资料与方法

### 1.1 资料来源

本研究所使用的空气污染物 (CO、O<sub>3</sub>、NO<sub>2</sub>、SO<sub>2</sub>、PM<sub>2.5</sub> 和 PM<sub>10</sub>) 逐小时浓度数据来自于兰州生态环境监测中心,共收集了 2015 年 1 月 1 日~2020 年 12 月 31 日兰州市 6 个国控空气质量监测站点的监测数据,包括职工医院 (2015 年 1 月 1 日~2018 年 11 月 15 日)、兰炼宾馆、生物制品所、铁路设计院、教育港 (2019 年 6 月 1 日~2020 年 12 月 31 日) 和榆中兰大校区。其中,生物制品所、铁路设计院位于城关区,职工医院位于七里河区,教育港位于安宁区,兰炼宾馆位于西固区,榆中兰大校区位于榆中县,该站点远离主城区,受主城区影响较小,是清洁对照点。监测站点的位置分布,见图 1。



图 1 2015~2020 年兰州市国控空气质量监测站点位置分布

2015 年 1 月 1 日~2020 年 12 月 31 日兰州市气象观测资料来源于兰州市气象局,收集的信息包

括逐日平均气温(°C)、相对湿度(%)、气压(hPa)和风速(m/s)。

## 1.2 分析方法

利用 CO 逐小时浓度资料, 统计分析了兰州市区(主城区内所有站点浓度均值)和榆中兰大校区 CO 浓度的时间分布特征, 讨论了 CO 与其他污染物、气象要素之间的关系, 并在兰州市区、榆中兰大校区和不同监测站点之间进行了对比分析。比较了采暖期(11月1日至次年4月1日)和非采暖期兰州市区、榆中兰大校区和不同监测站点之间 CO 浓度的差异。此外, 还利用兰州市环境空气质量监测报告中的相关记录进行了首要污染物天数的统计分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 首要污染物天数及 CO 的统计学特征

兰州市首要污染物天数的统计, 见表 1。

表 1 2015~2020 年兰州市首要污染物天数统计 d

t/a	CO	O <sub>3</sub>	SO <sub>2</sub>	NO <sub>2</sub>	PM <sub>10</sub>	PM <sub>2.5</sub>
2015	1	45	0	43	200	75
2016	0	74	0	53	193	52
2017	0	99	0	53	168	45
2018	0	106	0	67	142	35
2019	0	121	0	102	96	25
2020	0	120	0	83	109	36
共计	1	565	0	401	908	268

表 2 2015~2020 年不同监测站点和兰州市区 CO 浓度的统计学特征

站点	均值±标准差	最小值	P25	P50	P75	最大值	占比
职工医院	1.323±0.910	0.100	0.700	0.982	1.592	5.135	26/1357
兰炼宾馆	1.024±0.573	0.183	0.600	0.805	1.200	3.700	0
生物制品所	1.156±0.673	0.100	0.700	1.000	1.500	5.198	8/2119
铁路设计院	1.329±0.876	0.100	0.700	1.000	1.600	6.300	32/2128
教育港	0.941±0.564	0.200	0.600	0.700	1.100	3.500	0
榆中兰大校区	0.850±0.468	0.003	0.600	0.800	1.000	4.410	2/2101
兰州市区	1.182±0.704	0.267	0.725	0.949	1.384	4.633	7/2135

注: P25、P50和P75分别为第25、50和75百分位数; 占比为研究期间CO浓度超过国家环境空气质量二级标准(4 mg·m<sup>-3</sup>)的天数所占比例。

### 2.2 CO 浓度时空分布特征

2.2.1 年际变化特征 兰州市区和榆中兰大校区 CO 浓度的年际变化特征, 见图 2。兰州市区的 CO 年均浓度呈现平稳下降趋势, 由 2015 年 1.425 降至 2020 年的 0.981 mg/m<sup>3</sup>, CO 污染逐年减轻, 表明兰州市能源结构优化、污染治理措施成效显著。榆中兰大校区作为对照点, 远离主城区, 研究期间 CO

表 1 可知, 2015~2020 年, 颗粒物作为首要污染物的天数最多, 总计为 1 176 d, O<sub>3</sub> 为 565 d, NO<sub>2</sub> 为 401 d, CO 仅有 1 d。一直以来, 颗粒物都是影响兰州市空气质量的重要污染物, 尽管近几年, 其作为首要污染物的天数呈现出下降趋势, 但直到 2020 年仍有 145 d, 这说明目前兰州市颗粒物污染状况依旧严峻。值得注意的是, O<sub>3</sub> 作为首要污染物的天数正逐年增加, 2020 年的天数为 2015 年的 2.6 倍, 可见兰州市 O<sub>3</sub> 污染状况逐渐加重, O<sub>3</sub> 成为继颗粒物之后影响空气质量的又一重要污染物。而 CO 作为首要污染物的天数仅有 1 d, 表明兰州市 CO 污染相对较轻, 对空气质量的影响较小。

研究期间兰州市区 CO 平均浓度为 1.182 mg/m<sup>3</sup>, 有 7 d 超过环境空气质量二级标准, 榆中兰大校区作为对照点, CO 平均浓度为 0.850 mg/m<sup>3</sup>, 仅有 2 d 超过二级标准。其余站点中, 铁路设计院和职工医院位于兰州市城关区和七里河区, 是主要的居民生活场所, 交通繁忙, 汽车尾气排放较重, CO 平均浓度超过二级标准的天数也相对较多。教育港 CO 平均浓度 < 1 mg/m<sup>3</sup>, 这是因为近几年兰州市 CO 污染状况整体上有所好转, 而该站点自 2019 年 6 月 1 日起开始监测, 数据的时间范围较短, 因此其 CO 平均浓度明显低于主城区内其他站点浓度。整体上看, 兰州市的 CO 污染较轻, 表 2。

年均浓度均低于兰州市区。就其年际变化可知, 2015~2017 年 CO 年均浓度下降比较明显, 2017 年达到最低值 0.700 mg/m<sup>3</sup> 后, 又出现增加趋势, 2020 年, 其年均浓度增加到 0.803 mg/m<sup>3</sup>, 和兰州市区的差距为历年最小, CO 污染有所加重。这可能是因为榆中县近几年大力发展经济, 构建“三区三园四带”产业布局, 其本地 CO 排放较以前有所增加。

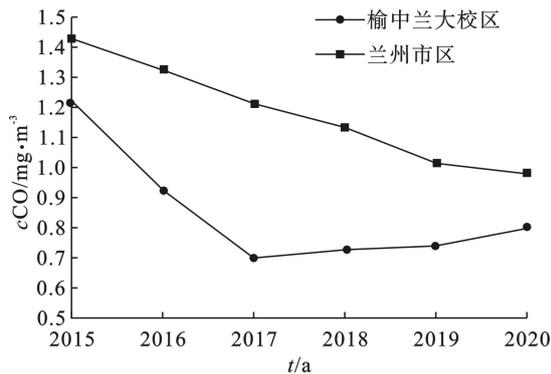


图 2 2015~2020 年兰州市区和榆中兰大校区 CO 浓度的年际变化

2.2.2 月度变化特征 兰州市区和榆中兰大校区 CO 浓度的月度变化特征, 见图 3。

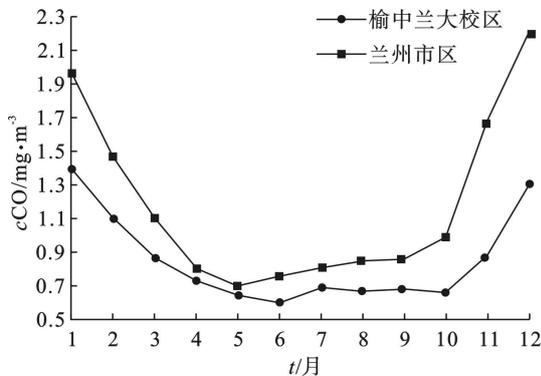


图 3 2015~2020 年兰州市区和榆中兰大校区 CO 浓度的月度变化

图 3 可知, 兰州市区和榆中兰大校区的 CO 月均浓度变化趋势基本一致, 呈现出“U 字型”。在 11、12、1 和 2 月, 兰州市区 CO 浓度整体上较高, 在 12 月达到峰值为 2.201 mg/m<sup>3</sup>, 5 月浓度最低为 0.689 mg/m<sup>3</sup>; 而榆中兰大校区在 12、1 和 2 月 CO 浓度较高, 峰值出现在 1 月, 为 1.407 mg/m<sup>3</sup>, 6 月浓度最低为 0.594 mg/m<sup>3</sup>。整体上兰州市 CO 浓度冬季较高而夏季较低。冬季由于燃煤供暖, CO 排放强度大, 而兰州市的河谷地形导致冬季逆温层厚且稳定, 逆温天数多, 限制了 CO 的垂直扩散, 同时兰州市冬季静风频率高, 平流输送扩散的能力也较弱, 源强而汇弱, 使得其浓度显著高于其他月份。而在夏季, CO 排放强度较弱, 且由于地表温度高, 对流活动旺盛, 垂直扩散条件较好, 利于 CO 的稀释。此外, CO 还是 O<sub>3</sub> 的前体物之一, 夏季光照条件好, 光化学反应速率高, 消耗了更多的 CO。

2.2.3 日变化特征 不同监测站点和兰州市区 CO 浓度日变化特征, 见图 4。

整体来看, 主城区内不同监测站点 CO 浓度呈

现出双峰型日变化, 日间高峰主要出现在 09:00, 是由交通早高峰时期机动车尾气排放导致的。随后 CO 浓度迅速下降, 在 17:00 左右达到谷值, 这和 CO 的排放减少而消耗增加有关。夜间高峰主要出现在 21:00, 除了受交通晚高峰影响外, 还因为兰州市实施货车日间限行政策。虽然存在 2 个高峰值, 但夜间高峰明显低于日间高峰, 冯鑫媛等<sup>[13]</sup>对于川渝地区大气污染物的研究也发现了这一现象。这种差异可能和兰州市地面风速的日变化有关, 主城区地面风速在 19:00~20:00 间最大<sup>[18]</sup>, 对 CO 起到了很大的稀释作用。

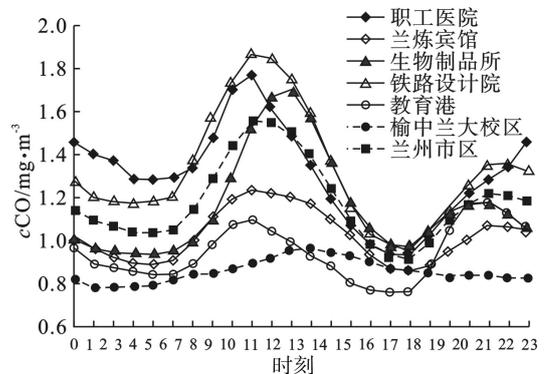


图 4 2015~2020 年不同监测站点和兰州市区 CO 浓度的日变化

相较于市区的双峰, 榆中兰大校区的 CO 浓度仅存在日间高峰, 12:00 达到峰值后缓慢减小。榆中县的 CO 污染主要由市区输送造成, 经过不断扩散稀释, 到达榆中县时浓度已相对较小。同时夜间受极大风速影响<sup>[18]</sup>, 榆中县 CO 浓度呈现出日间单峰且峰值小、峰值出现的时间滞后于市区。

兰州市区和榆中兰大校区 CO 浓度四季的日变化特征, 见图 5。四季中, 兰州市区的 CO 浓度均呈现出双峰型日变化, 春、夏、秋季日间高峰出现在 09:00, 冬季则出现在 11:00, 可能是因为冬季昼短夜长, 交通早高峰的时间有所延后。春、夏季的夜间高峰出现在 22:00, 秋、冬季由于交通晚高峰提前且车流量较为集中, 17:00 起 CO 浓度就有了非常明显的增加, 21:00 便达到了高峰。总的来说, 夜间高峰均低于日间高峰, 秋季两者之间的差异相对最小。榆中兰大校区的 CO 浓度在春、夏季呈现出单峰型日变化, 日间高峰出现在 12:00, 秋、冬季日变化幅度较小, 秋季在 13:00 有一个相对高值, 冬季则没有明显的高值。不同季节里, 兰州市区的 CO 浓度均高于榆中兰大校区, 秋、冬季两者的差异较大, 主要原因为排放强度有所不同。

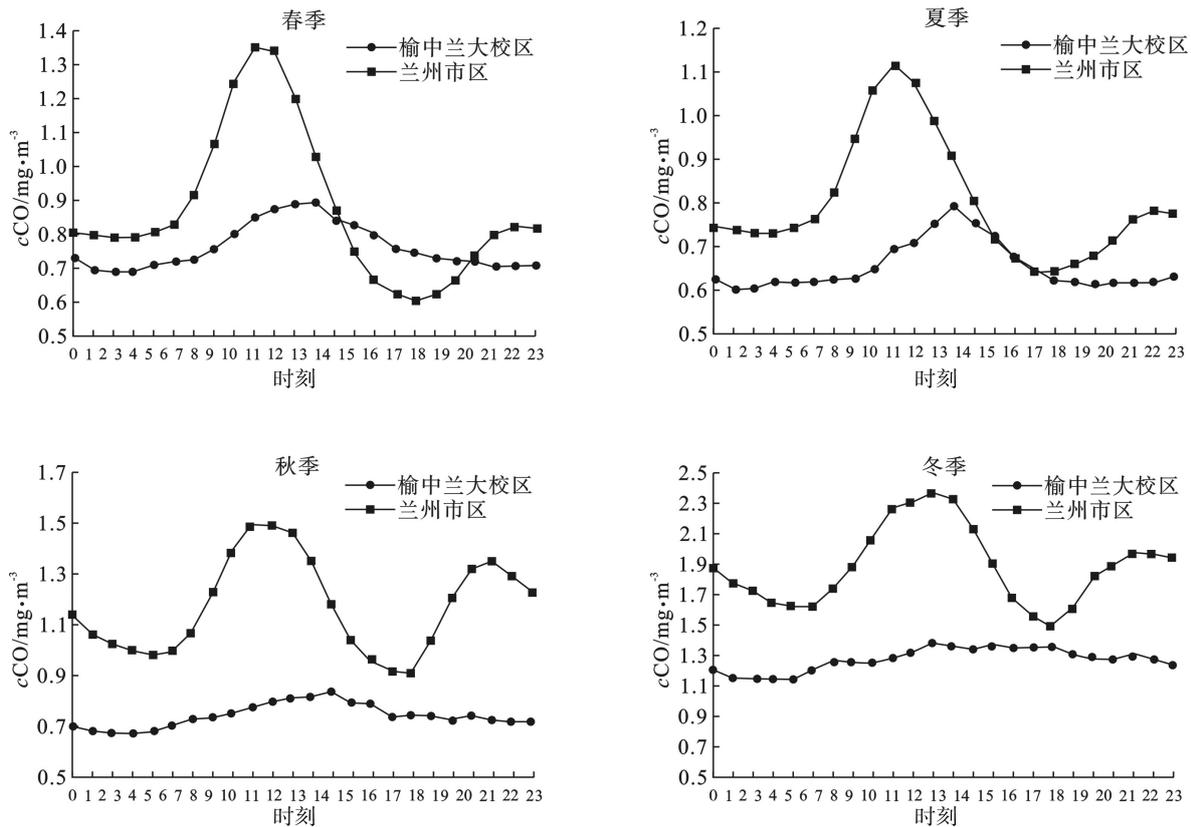


图 5 2015~2020 年兰州市区和榆中兰大校区 CO 浓度四季的日变化

2.2.4 采暖期与非采暖期 兰州市采暖期和非采暖期间 CO 浓度分布情况, 见图 6。

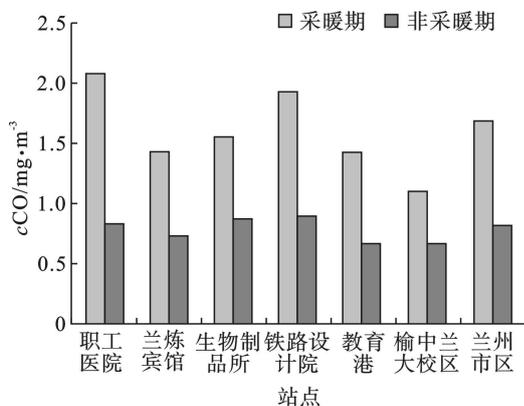


图 6 2015~2020 年采暖期和非采暖期间不同监测站点和兰州市区 CO 平均浓度

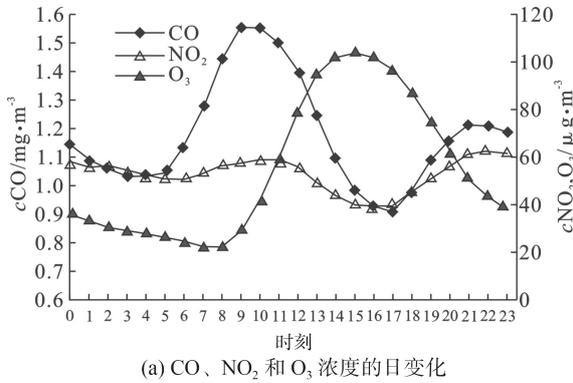
采暖期, 兰州市区 CO 浓度为 1.687 mg/m<sup>3</sup>, 榆中兰大校区为 1.109 mg/m<sup>3</sup>, 主城区站点中 CO 浓度较高的是职工医院和铁路设计院, 分别为 2.019 和 1.932 mg/m<sup>3</sup>。非采暖期, 兰州市区 CO 浓度为 0.820 mg/m<sup>3</sup>, 榆中兰大校区为 0.663 mg/m<sup>3</sup>, 主城区 CO 浓度较高的是铁路设计院和生物制品所, 分别为 0.898 和 0.874 mg/m<sup>3</sup>。采暖期间任何站点和兰州市区的 CO 浓度值均显著高于非采暖期, 是非采暖期的 2 倍左右, 除了因为燃煤加强了 CO 的排放

强度外, 兰州市冬季逆温和静风频率高, 污染物难以扩散, 造成了累积, 同时太阳辐射强度弱, 光化学反应不活跃, CO 消耗量也较少。

### 2.3 CO 与其他污染物、气象要素的关系

2.3.1 CO 与其他污染物的浓度变化 兰州市区 6 种空气污染物的浓度变化特征, 见图 7。CO、NO<sub>2</sub> 的日变化趋势基本一致, 为双峰型。日间高峰出现在 09:00~10:00, 夜间高峰出现在 21:00~22:00, 谷值出现在 16:00~17:00, 进一步计算 CO 与 NO<sub>2</sub> 浓度之间的相关系数为 0.718, 且通过了双侧 0.01 水平的显著性检验, 说明两者之间存在着显著的正相关性, 这是因为 CO、NO<sub>2</sub> 均来自于燃料燃烧和机动车尾气。O<sub>3</sub> 则呈现出单峰型日变化, 峰值出现在 15:00, 谷值出现在 08:00, 和 CO、NO<sub>2</sub> 近乎相反, 其与 CO、NO<sub>2</sub> 的相关系数分别为 -0.439 和 -0.533 且均通过了双侧 0.01 水平的显著性检验, 即呈现出显著的负相关。这是因为 CO 和 NO<sub>2</sub> 是 O<sub>3</sub> 的前体物, 08:00 起, 交通早高峰机动车尾气排放较重, 而此时的光化学反应并不强, CO、NO<sub>2</sub> 进一步累积, 直至 09:00~10:00, 排放有所减弱, 光化学反应又进一步加强, 消耗增加, 因此 CO、NO<sub>2</sub> 浓度开始下降, 当 O<sub>3</sub> 浓度达到峰值之后, CO、NO<sub>2</sub> 的浓

度也相继下降至谷值。由于具有高度相似的排放源, CO、SO<sub>2</sub> 和 PM<sub>2.5</sub> 的月度变化特征也比较相似, 图 7(b) 可知, 呈现出 11、12、1 和 2 月浓度较高, 其他月浓度较低的“U 字型”特征, 经计算, CO 与



SO<sub>2</sub>、PM<sub>2.5</sub> 之间存在显著的正相关性, 相关系数均> 0.850。PM<sub>10</sub>除了具有相似的特征外, 其在春季还存在浓度高值, 这是因为兰州市春季沙尘天气频发, 对 PM<sub>10</sub> 浓度的贡献较大<sup>[19]</sup>。

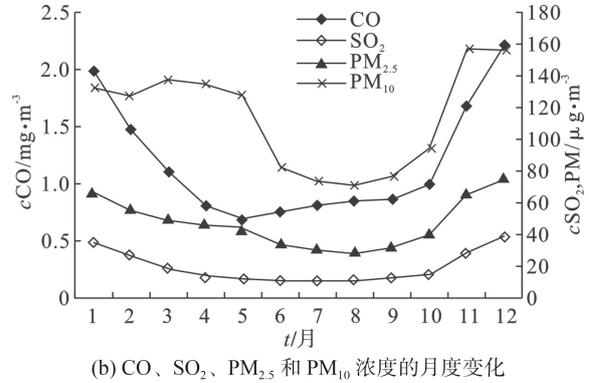


图 7 2015~2020 年兰州市区空气污染物的浓度变化特征

### 2.3.2 CO 与气象要素的关系 兰州市区 CO 污染物与气象要素的 Person 相关系数, 见表 3。

表 3 2015~2020 年兰州市区 CO 污染物与气象要素的 Person 相关系数

气象要素	相关系数				
	春季	夏季	秋季	冬季	全年
气温/℃	-0.346**	0.138**	-0.512**	-0.085	-0.603**
气压/hPa	-0.167**	-0.020	-0.004	-0.146**	0.272**
风速/m·s <sup>-1</sup>	-0.368**	-0.133**	-0.423**	-0.557**	-0.423**
相对湿度/%	-0.138**	-0.193**	0.012	0.109*	0.018

注: \*\*为 $p < 0.01$ ; \*为 $p < 0.05$ 。

表 3 可知, 气温和风速是与兰州市区 CO 最相关的 2 个气象要素。CO 和气温在全年为负相关, 相关系数为-0.603 且通过了双侧 0.01 水平的显著性检验。随着日均气温的降低, CO 浓度呈上升趋势, 见图 8(a)。当日均气温 $< 5\text{ }^{\circ}\text{C}$  时, CO 浓度均值即超过  $1.500\text{ mg/m}^3$ , 当日均气温 $< 0\text{ }^{\circ}\text{C}$  时, 浓度均值可达  $1.945\text{ mg/m}^3$ 。进一步对采暖期和非采暖期内两者的关系进行研究, 发现 CO 和气温间仍具有良好的负相关性, 其相关系数分别为-0.314 和-0.109 且均通过了双侧 0.01 水平的显著性检验, 同时对其进行了线性回归, 回归系数分别为-0.049 ( $p < 0.01$ ) 和-0.005 ( $p < 0.01$ )。在气温较低的采暖期, 由于供暖的需求<sup>[20]</sup>, 燃煤量随着气温降低而增加, 导致 CO 排放加强。而在气温较高的非采暖期, CO 排放强度较小, 浓度显著降低。且研究表明, 高温、强太阳辐射利于·OH 自由基的生成<sup>[21]</sup>, 可与 CO 发生反应, 进而消耗大量的 CO, 因此在非采暖期 CO 与气温也

呈现出负相关, 但其回归系数较小, 这可能和兰州市干燥的气候相关, 在一定程度上限制了·OH 自由基的生成。

而 CO 和风速在四季和全年均为负相关, 这和赵敬国等<sup>[20]</sup>的研究结论一致。冬季两者之间的相关性最大, 相关系数为-0.557 并通过了双侧 0.01 水平的显著性检验, 可能是因为冬季 CO 浓度相对较高, 风的稀释扩散作用对污染物浓度的影响就更加显著。随着日均风速的降低, CO 浓度也呈现出上升的趋势, 见图 8(b), 当日均风速 $< 0.5\text{ m/s}$  时, CO 浓度均值为  $1.877\text{ mg/m}^3$ , 而当日均风速 $\geq 2.5\text{ m/s}$  时, CO 浓度均值仅为  $0.600\text{ mg/m}^3$ 。对两者进行回归分析, 回归系数为-0.911 ( $p < 0.01$ ), 可见风速大对降低 CO 浓度的作用比较明显。

## 3 结论

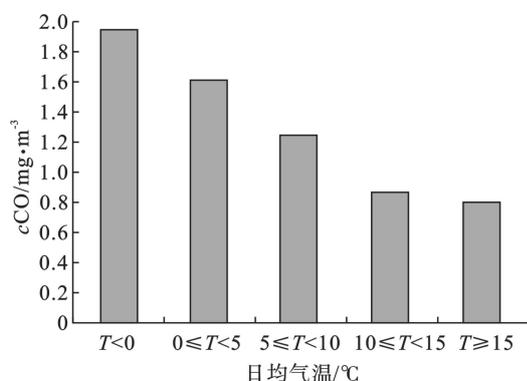
(1) 2015~2020 年间, 兰州市区 CO 平均浓度为  $1.182\text{ mg/m}^3$ , 榆中兰大校区为  $0.850\text{ mg/m}^3$ 。长期来看, 兰州市区的 CO 年均浓度平稳下降, 污染状况逐年减轻, 然而榆中兰大校区自 2017 年起, CO 浓度又出现了上升的趋势。

(2) 兰州市区和榆中兰大校区 CO 浓度的月度变化呈现出“U 字型”, 整体上冬季较高而夏季较低, 这和冬季燃煤供暖有关, 采暖期间 CO 浓度显著高于非采暖期, 是非采暖期的 2 倍左右。

(3) 主城区不同监测站点 CO 浓度呈现出双峰型日变化, 日间高峰主要出现在 09:00, 夜间高峰主要出现在 21:00, 榆中兰大校区仅存在日间高峰, 峰

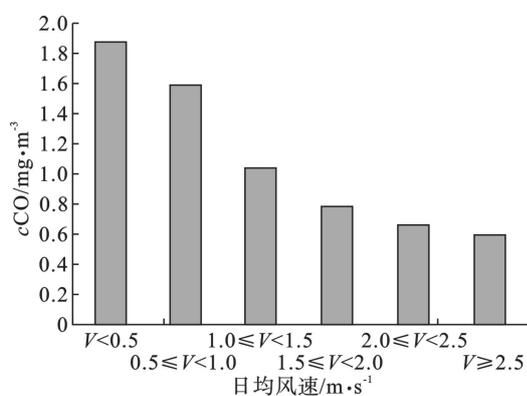
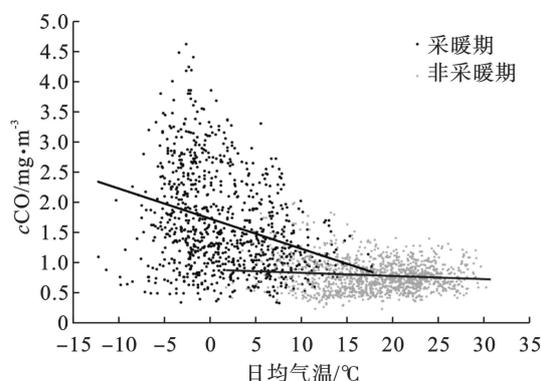
值比兰州市区滞后 3 h 出现在 12:00。

(4) CO、NO<sub>2</sub> 浓度的日变化呈双峰型特征, 相关系数为 0.718; O<sub>3</sub> 与 CO 的日变化趋势近似相反,



(a) 日均气温

相关系数为-0.439。由于污染源一致, CO、SO<sub>2</sub> 和 PM<sub>2.5</sub> 具有相似的月度变化特征, PM<sub>10</sub> 在春季还存在浓度高值, 主要和兰州市春季沙尘天气频发有关。



(b) 日均风速

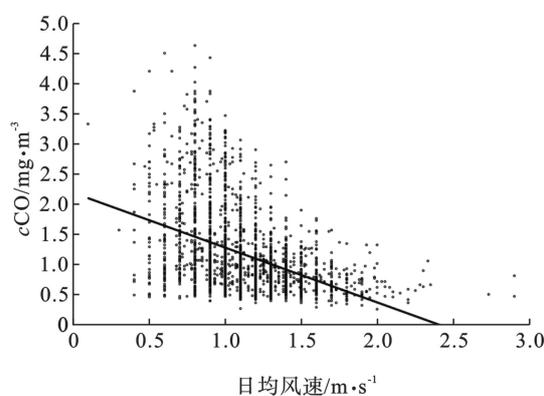


图 8 2015 ~ 2020 年兰州市区不同日均气温 (a) 和日均风速 (b) 所对应的 CO 浓度及与 CO 间的线性回归

(5) 气温和风速是与兰州市区 CO 最相关的 2 个气象要素, 均为显著负相关性, 气温主要影响人们对于供暖的需求, 而风可以有效稀释和扩散 CO。

## 参考文献

- [1] 郭倩, 潘海婷, 黄河仙, 等. 娄底市 2015 年—2018 年一氧化碳时空分布特征研究[J]. *环境科学与管理*, 2019, 44(12): 116 - 119.
- [2] 王占山, 李云婷, 张大伟, 等. 2014 年北京市 CO 浓度水平和时空分布[J]. *中国环境监测*, 2018, 34(3): 14 - 20.
- [3] 安俊琳, 王跃思, 李昕, 等. 北京大气中 CO 体积分数与风速关系[J]. *生态环境*, 2008, 17(1): 153 - 157.
- [4] LEE F Y, CHEN W K, LIN C L, et al. Carbon monoxide poisoning and subsequent cardiovascular disease risk: A nationwide population-based cohort study[J]. *Medicine*, 2015, 94(10): 624 - 631.
- [5] NG P C, LONG B, KOYFMAN A. Clinical chameleons: An emergency medicine focused review of carbon monoxide poisoning[J]. *Internal and Emergency Medicine*, 2018, 13(2): 223 - 229.
- [6] BELL M L, PENG R D, DOMINICI F, et al. Emergency hospital

admissions for cardiovascular diseases and ambient levels of carbon monoxide: results for 126 United States urban counties, 1999—2005[J]. *Circulation*, 2009, 120(11): 949 - 955.

- [7] BHUYAN P K, BHARALI C, PATHAK B, et al. The role of precursor gases and meteorology on temporal evolution of O<sub>3</sub> at a tropical location in northeast India[J]. *Environmental Science & Pollution Research International*, 2014, 21(10): 6696 - 6713.
- [8] SUTHAWAREE J, KATO S, TAKAMI A, et al. Observation of ozone and carbon monoxide at Cape Hedo, Japan: Seasonal variation and influence of long-range transport[J]. *Atmospheric Environment*, 2008, 42(13): 2971 - 2981.
- [9] SAHU L K, SHEEL V, KAJINO M, et al. Variability in tropospheric carbon monoxide over an urban site in Southeast Asia[J]. *Atmospheric Environment*, 2013, 68: 243 - 255.
- [10] KHALIL M, RASMUSSEN R A. Global decrease in atmospheric carbon monoxide concentration[J]. *Nature*, 1994, 370(6491): 639 - 641.
- [11] 方双喜, 周凌晞, 栾天, 等. 浙江临安大气本底站 CO 浓度及变化特征[J]. *环境科学*, 2014, 35(7): 2454 - 2459.
- [12] 杨继东, 刘佳泓, 杨光辉, 等. 天津市环境空气中一氧化碳污染特征及变化趋势研究[J]. *环境科学与管理*, 2012, 37(6): 89 -

- 90.
- [13] 冯鑫媛, 张莹. 川渝地区大气污染物质量浓度时空分布特征[J]. *中国科技论文*, 2018, 13(15): 1708 - 1715.
- [14] 王叶琳, 程燕, 严璐, 等. 2010—2018年西安市大气污染物变化特征分析[J]. *地球环境学报*, 2020, 11(1): 99 - 111.
- [15] 高鸿欣, 陈海旭, 陈兴鹏. 兰州环境空气污染特征及治理经验[J]. *甘肃科技*, 2015, 31(2): 41 - 45.
- [16] 兰州市统计局, 国家统计局兰州调查队. 2020 兰州统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2020.
- [17] 兰州市统计局, 国家统计局兰州调查队. 2016 兰州统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2016.
- [18] 刘宇, 王式功, 尚可政, 等. 兰州市低空风时空变化特征及其与空气污染的关系[J]. *高原气象*, 2002, 21(3): 322 - 326.
- [19] 马敏劲, 谭子渊, 陈玥, 等. 近 15a 兰州市空气质量变化特征及沙尘天气影响[J]. *兰州大学学报(自然科学版)*, 2019, 55(1): 33 - 41.
- [20] 赵敬国, 王式功, 王嘉媛, 等. 兰州市空气污染与气象条件关系分析[J]. *兰州大学学报(自然科学版)*, 2013, 49(4): 491 - 496.
- [21] 张丹瑜婷, 廖宏, 李柯, 等. 大气十条以来我国夏季大气 OH 浓度变化的数值模拟[J/OL]. *大气科学*, 2022, <http://www.iapjournals.ac.cn/dqkx/article/doi/10.3878/j.issn.1006-9895.2112.21218>.

### (上接第 46 页)

- [3] 蓝东, 胡大立, 刘满凤. 环境保护与企业发展[J]. *中国人口·资源与环境*, 2001(增 1): 157 - 158.
- [4] 吴建祖, 袁海春. 绩效期望落差与企业环境战略的倒 U 形关系研究[J]. *管理学报*, 2020, 17(10): 1453 - 1460.
- [5] 李晓翠, 万良杰. 浅谈绿色营销中的政府主导行为[J]. *经济师*, 2003(7): 177 - 178.
- [6] 陈志军, 董美彤, 马鹏程, 等. 媒体与机构投资者关注对内部控制的交互作用——来自国有企业的经验数据[J]. *财贸研究*, 2020, 31(9): 99 - 110.
- [7] 倪国华. 媒体监督的制度要件价值及作用机制研究——基于食品安全事件的案例分析[J]. *北京工商大学学报(社会科学版)*, 2020, 35(3): 29 - 36.
- [8] 赵莉, 张玲. 媒体关注对企业绿色技术创新的影响: 市场化水平的调节作用[J]. *管理评论*, 2020, 32(9): 132 - 141.
- [9] 谢志明. 政府和媒体监管对企业环境管理行为的影响[J]. *求索*, 2014(9): 70 - 74.
- [10] 李杰. 论非对称信息下媒体寻租对信用与经济的影响[J]. *首都师范大学学报(社会科学版)*, 2019(6): 53 - 62.
- [11] CHEN H, FENG Q, ZHU D D, et al. Impact of rent-seeking on productivity in Chinese coal mine safety supervision: A simulation study[J]. *Energy Policy*, 2016, 93: 315 - 329.
- [12] SHENG J C, ZHOU W H, ZHU B Z. The coordination of stakeholder interests in environmental regulation: Lessons from China's environmental regulation policies from the perspective of the evolutionary game theory[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 249: 119385 - 119385.
- [13] 朱立龙, 荣俊美, 张思意. 政府奖惩机制下药品安全质量监管三方演化博弈及仿真分析[J]. *中国管理科学*, 2021, 29(11): 55 - 67.
- [14] 崔萌. 协同治理背景下环保信用监管的三方演化博弈分析[J]. *系统工程理论与实践*, 2021, 41(3): 713 - 726.