

重庆地区大气污染分布特征及气象因子相关分析

韩余 周国兵 陈道劲 江文华 闵凡花¹

(重庆市气象台, 重庆 401147)

【摘要】: 大气污染状况的时空分布特征是大气污染研究的基础。利用 2017 年~2019 年重庆地区 40 个站点主要污染物浓度日均值监测资料及气象观测资料, 总结出各类污染物的时空分布特征并比较区域差异, 分析重庆地区各类污染物与气象因子的相关关系。结果表明: (1) $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 、 O_{3-8h} 年平均浓度都呈现西高东低的分布特征; NO_2 年平均浓度的高值区位于中心城区, 从中心城区向东向西辐射减弱; SO_2 在重庆全区域的污染较轻; CO 浓度高值区位于重庆东北部。(2) 污染物超标日数, 西部地区高于东部地区。(3) $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 各月浓度中西部地区高于东部地区, O_{3-8h} 中心城区的浓度值 7~8 月明显高于其他五个区域, NO_2 中心城区的浓度值在每个月份都远高于其他区域。(4) 重庆地区 O_{3-8h} 浓度变化与气象因子的相关性高于 $PM_{2.5}$ 和 NO_2 , 说明二次污染物 O_{3-8h} 浓度变化相比一次污染物更易受气象条件的影响。重庆地区大气污染分布特征及气象因子相关的分析, 为预测重庆地区各大区域的大气污染物浓度变化及评估扩散条件提供科学依据。

【关键词】: 大气污染物 时空分布 区域差异 气象因子 相关分析

【中图分类号】: X51 **【文献标识码】:** A **【文章编号】:** 1001-3644(2022)03-0079-09

前言

重庆市是我国面积最大的直辖市, 是青藏高原与长江中下游平原的过渡地带, 也是中国经济发达的东部地区与资源富集的西部地区的结合部^[1]。随着成渝双城经济圈各项政策的实施, 重庆地区经济快速发展, 城市化进程加快, 同时污染物排放量也随之增大, 加之重庆地貌以山地、丘陵为主, 受地形阻挡影响风速较小, 静风频率高, 这使大气污染物难于迅速向外扩散, 空气污染较为严重。国家对重庆市考核的刚性要求是 2025 年 $PM_{2.5}$ 达标 ($35 \mu g/m^3$), 虽然重庆市自 2005 年实施“蓝天行动”以来, $PM_{2.5}$ 污染总体呈下降趋势, 但大气环境 $PM_{2.5}$ 浓度达标的差距仍较为明显, 超标普遍。2019 年, 中心城区 $PM_{2.5}$ 年均浓度 $38.4 \mu g/m^3$, 超标近 10%。另一方面臭氧污染日益凸显, 臭氧浓度逐年上升, 2018~2019 年中心城区 O_{3-8h} 超标日数均超过 $PM_{2.5}$ 。 O_3 正在逐渐替代 $PM_{2.5}$ 成为影响重庆地区空气质量的第一大污染物^[2]。重庆地区大气污染呈现出从以往单一的颗粒物污染向以细粒子 ($PM_{2.5}$)、臭氧 (O_3) 污染为主的复合型大气污染转变的态势^[3, 4]。

重庆山脉众多, 水系发达, 地势起伏大, 地貌形态复杂。导致重庆各个区域具有不同的气候特征, 从而使得各个区域的污染扩散气象条件不尽相同。大气污染状况的时空分布特征是大气污染研究的基础, 以往的关注仅限于重庆主城区^[5, 6, 7, 8, 9, 10]和部分区县^[11], 对重庆地区整体大气污染状况缺少全面深入的分析。本文基于 2017~2019 年重庆地区 40 个站点主要污染物浓度监测资料, 分析总结出各类污染物的年、月变化特点, 及空间分布特点, 以及各个区域代表站主要污染物 ($PM_{2.5}$ 、 O_{3-8h} 、 NO_2) 浓度与气象要素的相关关系, 对进一步预测重庆地区各大区域的大气污染物浓度变化及评估扩散条件具有重要意义。

作者简介: 韩余(1978-), 女, 重庆长寿人, 毕业于南京信息工程大学大气科学专业, 硕士, 副高级工程师, 主要从事环境气象研究。

基金项目: 重庆市气象局业务技术攻关项目(YWJSGG-202122)

1 资料与方法

采用重庆地区 40 个站点六种污染物 SO_2 、 $\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_{10} 、 O_{3-8h} 、 NO_2 、 CO 的浓度日均值监测数据和 AQI 及首要污染物资料。资料时段为 2017 年 1 月 1 日~2019 年 12 月 31 日。采用统计计算的方法,分析总结出每个区县各类污染物的年、月变化特点,及空间分布特点;然后将不同区域监测点的浓度进行平均,算出各个区域的污染物浓度平均值,进行区域差异的比较。并选取同期降水、温度、湿度、风速、能见度这五个对污染物影响较大的气象因子进行相关性分析。

重庆西接四川盆地腹地,其北部、东部及南部分别有大巴山、巫山、武陵山、大娄山环绕。全市海拔相对高差达 2723.9m。东部、东南部和南部地势高,多在海拔 1500m 以上;西部地势低,大多为海拔 300~400m 的丘陵,人口稠密,汽车保有量高于东部地区。根据地理位置及相应气候特点将重庆地区划分为六个区域(图 1):(1)中心城区:渝中区、北碚区、渝北区、江北区、沙坪坝区、南岸区、九龙坡区、大渡口区、巴南区、两江新区 10 个区;(2)东北部:万州区、城口县、巫溪县、开县、巫山县、奉节县、云阳县、梁平县、忠县 9 个区县;(3)西部:潼南县、合川区、铜梁县、大足县、璧山县、荣昌县、永川区 7 个区县;(4)中部:涪陵区、垫江县、长寿区、丰都县 4 个区县;(5)西南部:江津区、綦江区、万盛区、南川区 4 个区县;(6)东南部:黔江区、石柱县、武隆县、彭水县、酉阳县、秀山县 6 个(自治)区县。

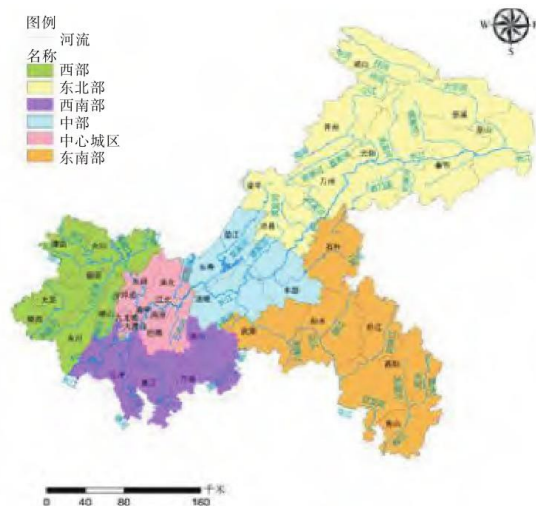


图 1 重庆地区区域划分图

2 结果与讨论

2.1 重庆地区不同污染物年平均浓度的分布特征

重庆地区 6 种污染物年平均浓度(O_{3-8h} 为第 90 百分位浓度、 CO 为第 95 百分位浓度)的分布存在明显差异(图 2)。重庆地区 $\text{PM}_{2.5}$ 年平均浓度(图 2a)在 $27.86 \sim 52.01 \mu\text{g}/\text{m}^3$,最高值与最低值相差近一倍,区域差距显著,总体来看呈现出西高东低的分布形态。 $\text{PM}_{2.5}$ 年平均浓度高值区县都位于西部和西南部地区,其中荣昌区、璧山区、合川区、江津区、铜梁区、万盛区的浓度超过 $45 \mu\text{g}/\text{m}^3$,最高值出现在荣昌,为 $52.01 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。 $\text{PM}_{2.5}$ 年平均浓度低于国家二级标准的区县(开州区、石柱县、云阳县、城口县、黔江区、武隆区、彭水县、酉阳县)均位于重庆东北部和东南部,最低值出现在酉阳为 $27.86 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。

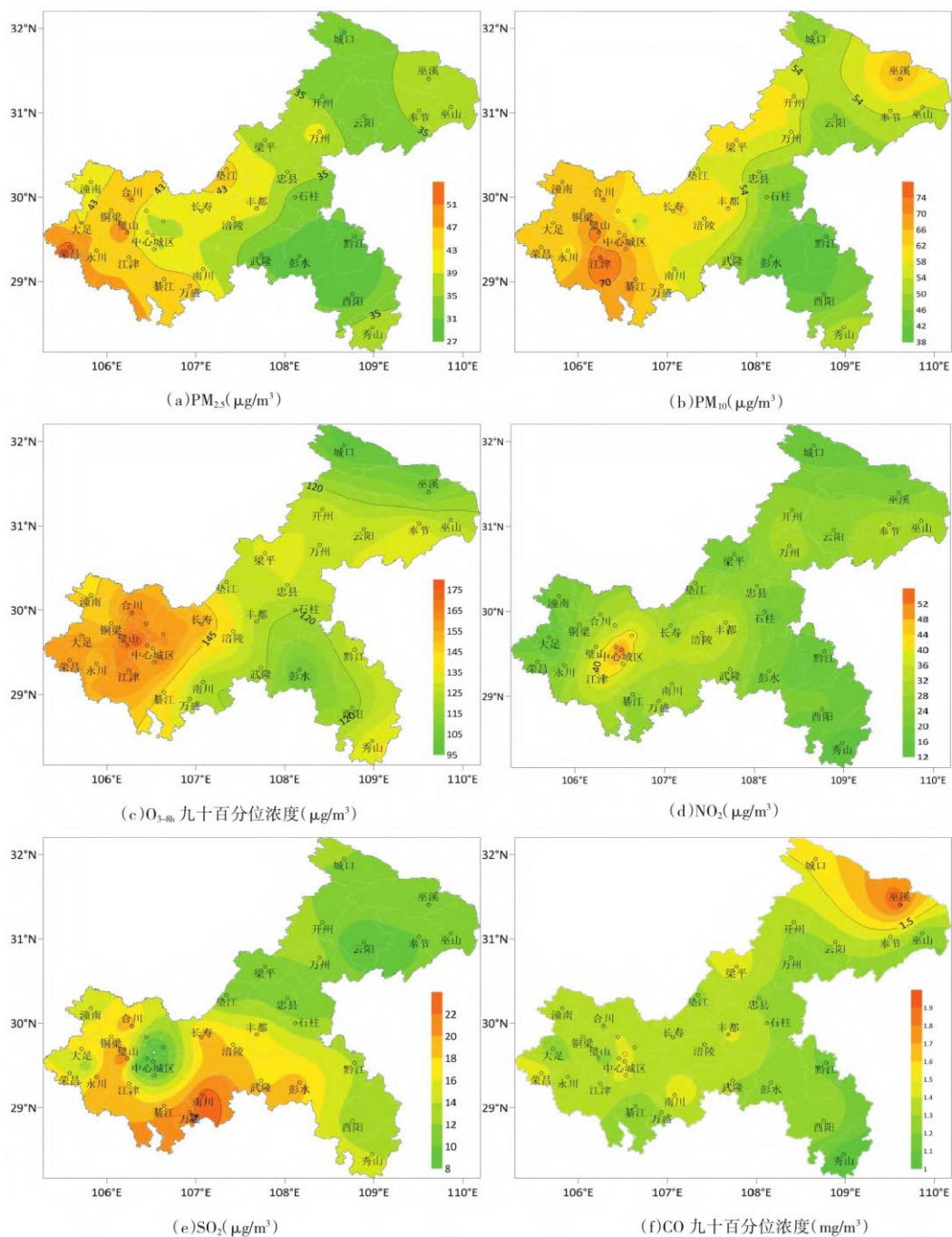


图 2 2017 年~2019 年重庆地区 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 、 O_3 - $8h$ 、 NO_2 、 SO_2 、 CO 年平均浓度空间分布图

PM_{10} 年平均浓度(图 2b)的分布与 $PM_{2.5}$ 的浓度分布类似,也是西部地区整体高于东部地区, PM_{10} 年平均浓度仅有两个区县超过国家二级标准,分别是西南部的江津区为 $75.48 \mu g/m^3$ 和西部的璧山区为 $73.15 \mu g/m^3$, PM_{10} 年平均浓度最低值出现在东南部的彭水县为 $38.68 \mu g/m^3$ 。 $PM_{2.5}$ 与 PM_{10} 浓度的这种西高东低的分布态势与重庆地区的人口分布及工业产值的分布相契合,重庆西部地区人口密度大,工业产值高于东部地区,燃料燃烧、交通运输、工业生产、建筑和道路扬尘等各种人类生活和生产活动形成的人为源排放量明显高于东部地区。

重庆地区 2017 年~2019 年 O_3 -8h 九十百分位浓度(图 2c)的地域分布也与 $PM_{2.5}$ 类似, 呈现西高东低的特点。浓度值变化范围在 $96 \sim 173.6 \mu g/m^3$ 之间, 最低值仅为最高值的 45%, 区域差距显著。 O_3 -8h 九十百分位浓度高值区县主要在中心城区和西部地区, 最高值是位于中心城区的沙坪坝区为 $173.6 \mu g/m^3$ 。此外中心城区的巴南区、两江新区、江北区, 西部的璧山区、合川区, 西南部的江津区浓度值都超过 $160 \mu g/m^3$, 主城区、西部和西南部的其他区县 O_3 -8h 九十百分位浓度均高于 $140 \mu g/m^3$ 。 O_3 -8h 九十百分位浓度最低值是东北部的城口县浓度仅为 $96 \mu g/m^3$, 东北部的 9 各区县和东南部的 6 个区县浓度值均低于 $133 \mu g/m^3$ 。中部地区是西部高值区与东部低值区的过渡带, O_3 -8h 九十百分位浓度至西向东由长寿区的 $152 \mu g/m^3$ 降为丰都的 $122 \mu g/m^3$ 。

NO_2 污染(图 2d)主要位于中心城区, 有六个区县 NO_2 年平均浓度超过国家二级标准 $40 \mu g/m^3$, 分别是渝中区、大渡口区、两江新区、渝北区、九龙坡区、江津区, 除江津区以外其余五个区县均位于中心城区。最高值在渝中区为 $52.78 \mu g/m^3$ 。最低值在东南部的秀山县仅为 $13.65 \mu g/m^3$ 。西部的大足区, 东南部秀山县、黔江区、石柱县, 和东北部的城口县均低于 $20 \mu g/m^3$ 。而离中心城区较近的璧山区、涪陵区、丰都区 NO_2 年平均浓度在 $30 \sim 35 \mu g/m^3$, NO_2 年平均浓度从中心城区向东向西辐射减弱。

重庆地区 SO_2 污染(图 2e)程度较轻, 全区域年平均浓度都远低于国家二级标准 $60 \mu g/m^3$ 。年平均浓度最高值在西南部的南川区为 $22.79 \mu g/m^3$, 其次是西南部的万盛经开区为 $21.71 \mu g/m^3$ 和西部的璧山区为 $21.65 \mu g/m^3$ 。其余区县的年平均浓度均低于 $20 \mu g/m^3$ 。中心城区和东北部都是 SO_2 浓度的低值区, 位于中心城区的两江新区是全市浓度最低值为 $7.8 \mu g/m^3$, 与最高值的南川区有近两倍的差值。

CO 九十五百分位年平均浓度(图 2f)最高值为 $1.87 \mu g/m^3$, 位于东北部的巫溪县。次高值为 $1.53 \mu g/m^3$ 分别位于东北部的城口县和中心城区的两江新区。最低值为东南部的秀山县, 浓度仅为 $1.03 \mu g/m^3$ 。

2.2 空气质量指数超标日数空间分布和各类首要污染物分布日数特征

根据《环境空气质量指数(AQI)技术规定 HJ633-2012》, 按照 $AQI > 100$ (超标日数)、 $100 < AQI \leq 150$ (轻度污染日数)、 $150 < AQI \leq 200$ (中度污染日数)、 $200 < AQI \leq 300$ (重度污染日数)分析了 2017~2019 年三年平均污染超标日数的空间分布特征。由于重庆地区 AQI 超过 300 以上的严重污染仅在两个区县各出现过一次, 因此未对严重污染日数进行分析。

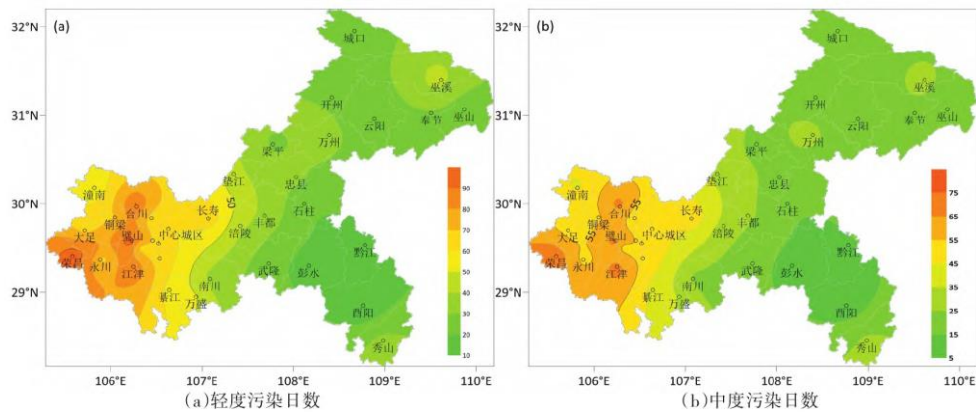


图 3 2017~2019 年重庆地区三年平均超标日数

从超标日数的空间分布来看, 重庆 2017~2019 年年平均超标日数、轻度污染日数、中度污染日数均呈现较明显的区域性差异。超标日数呈现出西部、中心城区以及西南部地区较多、东部地区较少的特点。高值区主要位于西部的合川、璧山、荣昌等地, 年平均超标日数超过 90d。低值区主要位于东南部的彭水、黔江、酉阳等地, 年平均超标日数不足 20d(图 3a)。

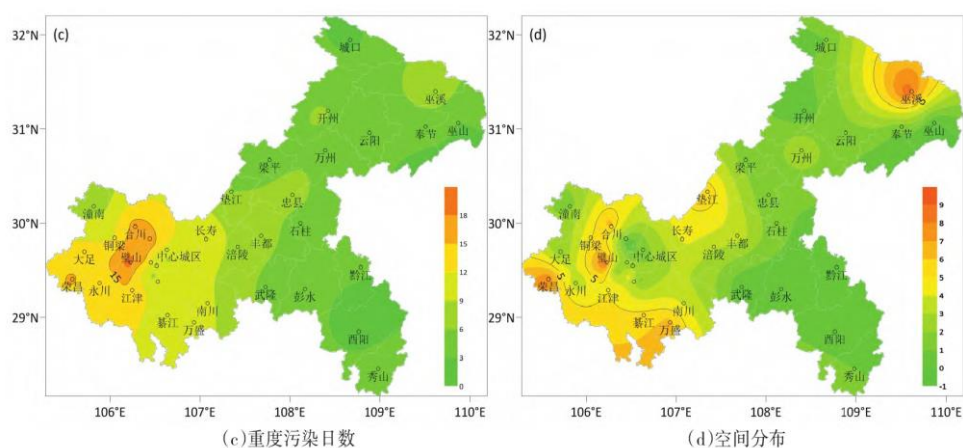


图 3 2017~2019 年重庆地区三年平均超标日数

轻度污染及中度污染日数均呈现出西部大部地区以及西南部偏西地区较多、东部较少的特点，位于西部的合川、璧山、江津以及中心城区的沙坪坝等地，年平均轻度污染日数超过 60d，轻度污染日数最少的区县是东南部的酉阳，仅有 8.6d(图 3b);西部的璧山区年平均中度污染日数为全市最高值达到 19.3d，最少日数位于东南部的酉阳，仅有 1.3d 达到中度污染(图 3c);重度污染日数西部部分地区、西南部大部地区以及东北部偏东地区偏多、东南部较少，高值区主要位于西部的璧山和东北部的巫溪，上述区县年平均重度污染日数超过 8d，东南部的武隆区、东北部的巫山县以及位于中心城区的北碚区没有出现重度污染(图 3d)。

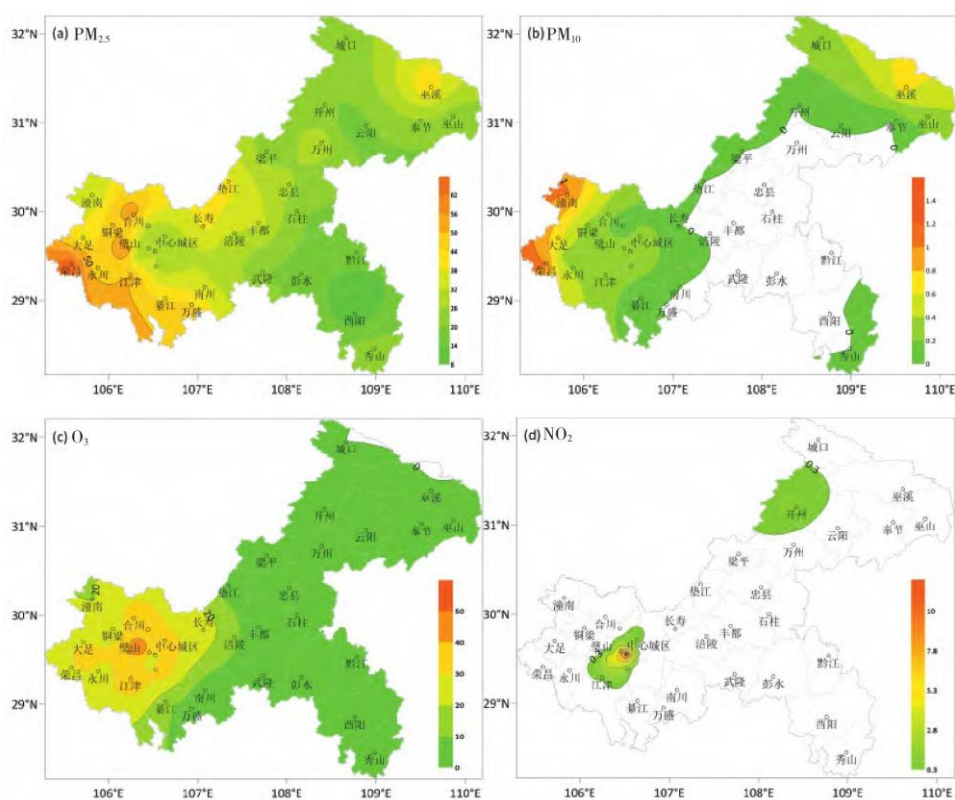


图 4 2017~2019 年重庆地区 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 、 O_3 、 NO_2 三年平均超标日数空间分布

据统计, 2017~2019 年重庆各区县 CO 均未超标, SO₂ 也仅在南川造成 2d 轻度污染, 重庆地区的空气污染主要是由 PM_{2.5}、PM₁₀、O₃、NO₂ 这四种污染物造成的。从各主要大气污染物超标日数的空间分布(图 4)来看, PM_{2.5} 超标日数高值区主要位于西部大部地区、西南部部分地区以及中部偏北地区, 西部的荣昌区是全市 PM_{2.5} 超标日数最多的区县, 年平均日数为 66d, 东北部大部地区以及东南部较少出现 PM_{2.5} 超标现象(图 4a); PM₁₀ 超标日数分布特征与 PM_{2.5} 类似, 同样呈现西高东低的特征, 高值区位于西部地区, 中部大部地区以及东部大部地区未出现 PM₁₀ 超标现象(图 4b); O₃(日 O₃ 浓度滑动平均值 O_{3-8h}) 超标日数呈现出中心城区、西部部分地区以及西南部偏西地区较多、中部偏东地区以及东部地区较少的特点, 位于中心城区的沙坪坝区是全市最高值达到 49.3d, 位于东北部的城口县、东南部的彭水县未出现臭氧超标现象(图 4c); NO₂ 超标日数中心城区相对较多, 渝中区超标日数为全市最高值达到 11.3d, 除此以外位于中心城区的九龙坡区、渝北区、两江新区、大渡口区以及西部的江津区和东北部的开州区有低于 5d 的 NO₂ 超标日数, 其余区县未出现 NO₂ 超标现象(图 4d)。

2.3 重庆地区不同污染物月变化

从各类污染物浓度月变化的曲线(图 5a)来看, 重庆地区 PM_{2.5}、PM₁₀、NO₂、SO₂、CO 与 O_{3-8h} 的浓度月变化呈现一个相反的趋势。PM_{2.5}、PM₁₀、NO₂、SO₂、CO 浓度曲线呈 U 型分布, 五种污染物都是秋末到初春(11 月至次年 3 月)平均浓度较高, 而最高值都出现在一月, 分别为 74.6 μg/m³、98.1 μg/m³、37.7 μg/m³、16.7 μg/m³、1.2mg/m³。夏季(6~8 月)平均浓度较低, 最低值都出现在 7 月, 分别为 20 μg/m³、35.1 μg/m³、21.9 μg/m³、12 μg/m³、0.8mg/m³。年变化幅度最大的是 PM_{2.5}, 7 月的平均浓度是 1 月浓度的 27%, 变化幅度最小的是 SO₂, 7 月的平均浓度是 1 月浓度的 72%。O_{3-8h} 浓度的月变化呈抛物线型分布, 夏季(6~8 月)平均浓度较高, 最高值都出现在 8 月, 为 126.1 μg/m³。秋末到初春(11 月至次年 3 月)平均浓度低, 最低值出现在 12 月为 34.9 μg/m³, 年变化幅度较大, 12 月平均浓度是 8 月的 27%, 与 PM_{2.5} 的变化幅度相当。

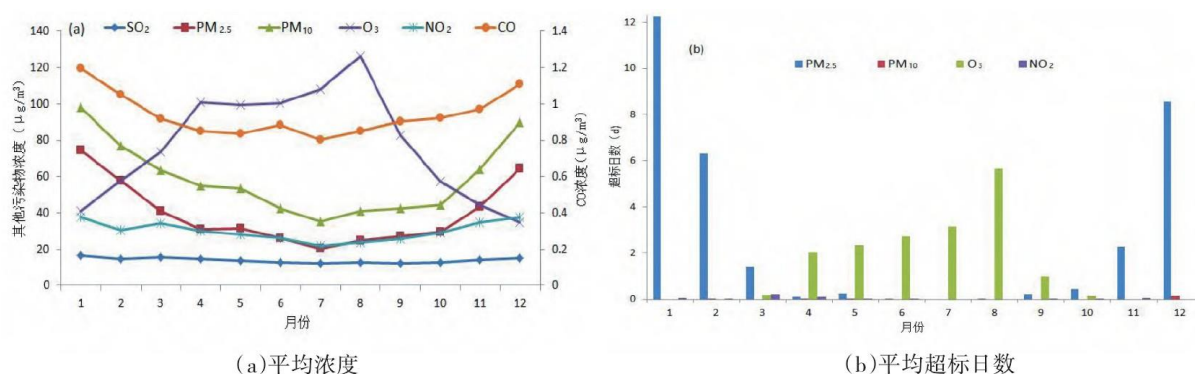


图 5 2017~2019 年重庆地区 PM_{2.5}、PM₁₀、O_{3-8h}、NO₂、SO₂、CO 平均浓度、平均超标日数月变化

统计了六种污染物 2017 年~2019 年平均的逐月超标日数发现, CO 没有造成轻度以上污染, SO₂ 也仅在 5 月和 8 月产生了不到 0.01d 的污染。图 5(b)给出了 PM_{2.5}、PM₁₀、O_{3-8h}、NO₂ 平均超标日数月变化。发现重庆地区超标日数全年呈现两个峰值, 一个是在 12 月到次年 2 月, 另一个是在 8 月, 每个月份主要污染物不同, 冬半年以 PM_{2.5} 超标为主, 夏半年以 O_{3-8h} 超标为主。超标日数最多在 1 月, 有 12.3d, 其中 PM_{2.5} 为 12.25d, NO₂ 有 0.05d。其次是 12 月, 有 8.6d, 其中 PM_{2.5} 为 8.5d, PM₁₀ 有 0.1d。污染日数排在第三位的是 2 月, 有 6.3d, 也是以 PM_{2.5} 污染为主。污染日数排在第四位的是 8 月, 有 5.68d, 与 1 月、12 月、2 月不同的是, 8 月主要污染是由 O_{3-8h} 造成的, O_{3-8h} 超标日数为 5.65d, 占 8 月所有污染日数的 99%。污染日数最少的月份是 10 月仅有 0.62d, 其中 PM_{2.5} 为 0.44d, O_{3-8h} 为 0.15d, NO₂ 为 0.03d。

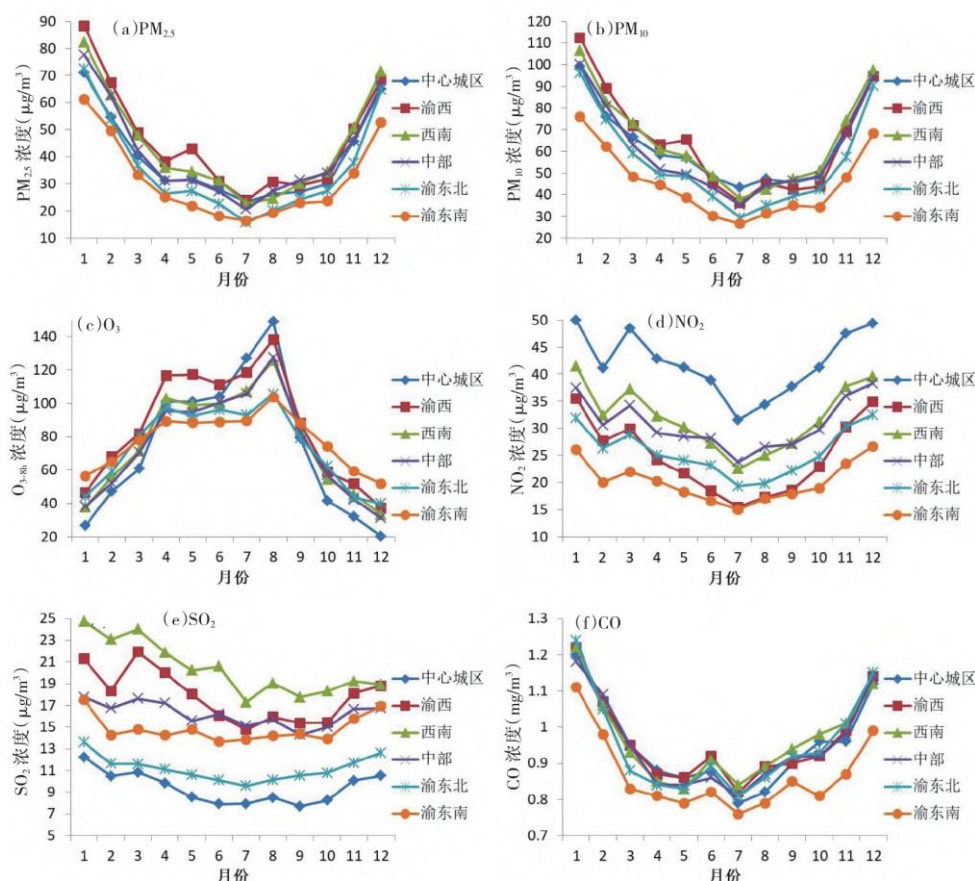


图6 2017~2019年重庆地区PM_{2.5}、PM₁₀、O₃、NO₂、SO₂、CO平均浓度月变化

重庆地区不同污染物浓度月变化的区域差异(图6)较小,变化趋势各区域基本一致,只是变化幅度有所差异。PM_{2.5}和PM₁₀全年变化趋势一致,呈U型分布,1月值最高,1到7月逐月降低,但渝西地区在5月都出现了污染物浓度的增加,而其他五个区域则是一致下降的趋势,7月以后浓度值开始增加,12月到达全年的次高值。中心城区和渝西、渝西南地区浓度高于其他区域,渝东南的浓度是全市最低的。O₃月变化特征来看,中心城区的变化幅度大于其他区域,1~3月中心城区的浓度值低于其他五个区域,4~6月浓度值仅次于渝西地区,从六月开始浓度值激增,7月和8月都超过了其他几个区域,成为全市O₃浓度最高的区域,9到10月浓度值迅速降低,10月以后中心城区O₃浓度值又成为全市最低值。NO₂浓度各区域都在1月达到全年的峰值,1到7月总体呈现下降趋势,3月出现一个弱的反弹,7月到达全年的最低值,7月以后浓度值开始逐月上升,12月达到全年的次高值,区域浓度比较来看,中心城区的浓度值在每个月份都远高于其他区域。SO₂月平均浓度各区域的变化曲线呈U型分布,年变化幅度都较小,峰值都出现在1月,但最低值各区域出现的月份略有不同,渝东南最低值出现在6月,渝东北、渝西、西南出现在7月,中心城区和中部地区出现在9月。SO₂月平均浓度值的大小来看,西南地区是六个区域中SO₂浓度最高的,浓度最低的区域是中心城区。CO月平均浓度各区域都有相似的变化趋势,1月是全年的最高值,7月达到全年最低值。比较来看渝东南各月的CO浓度都是六个区域最低的,其他五个区域浓度值较为接近。

2.4 大气污染与气象因子的相关分析

一个地区污染状况的形成,除了受本地区污染物排放的影响^[12]以外,气象因子也直接影响该地区污染物的扩散与输送^[13,14]。利用地面常规气象观测资料,选取降水、温度、湿度、风速、能见度这五个对污染物影响较大的气象因子,分析了各个区域代表

站主要污染物($\text{PM}_{2.5}$ 、 O_{3-8h} 、 NO_2)浓度与气象要素的相关关系。各区域代表站分别为:位于中心城区的沙坪坝、西部的铜梁、西南部的綦江、中部的涪陵、东北部的万州和东南部的黔江。

通过对 6 个站点不同大气污染物与气象因子的相关分析,可以看出 O_{3-8h} 浓度变化与气象因子的相关性普遍高于 $\text{PM}_{2.5}$ 和 NO_2 。特别是与日照时数和相对湿度的相关性,以沙坪坝站为例, O_{3-8h} 浓度变化与日照时数和相对湿度相关系数分别达到 0.8 和 0.68,而 $\text{PM}_{2.5}$ 和 NO_2 与日照时数和相对湿度均低于 0.2 未通过显著性检验。说明二次污染物 O_{3-8h} 浓度变化相比一次污染物更易受气象条件的影响。

从地域差别来看,东部地区 $\text{PM}_{2.5}$ 与气象因子的相关性略高于中西部地区。 $\text{PM}_{2.5}$ 和最低气温的相关系数最高,东北部的万州相关系数达到-0.53,而中西部地区该相关系数为-0.45~-0.5。 NO_2 和气象因子相关系数最高的是最低气温,东北部的万州相关系数达到-0.53,而中西部地区该相关系数为-0.45~-0.5。而 O_{3-8h} 与气象因子的相关性西部地区高于中东部地区,西部沙坪坝相关性最好,最高气温与 O_{3-8h} 的相关系数达到了 0.83,而位于东南部地区的黔江,气象因子与 O_{3-8h} 的相关性最差,相关系数的绝对值都低于 0.6。

3 结论

利用 2017 年~2019 年重庆地区 40 个站点主要污染物浓度监测资料,分析总结出各类污染物的时空分布特点,比较各大片区污染状况的区域性差异。结果表明:

3.1 $\text{PM}_{2.5}$ 与 PM_{10} 年平均浓度以及 O_{3-8h} 的九十百分位浓度年平均都呈现西高东低的分布特征,浓度高值区县都位于西部和西南部地区; NO_2 年平均浓度的高值区位于中心城区,从中心城区向东向西辐射减弱; SO_2 在重庆的污染较轻,全区域浓度都低于国家二级标准; CO 浓度高值区位于重庆东北部,其次是中西部地区,东南部 CO 浓度最低。

3.2 超标日数的空间分布来看,西部、中心城区以及西南部大部地区较多、东部地区较少,高值区主要位于西部的合川、璧山、荣昌等地,低值区主要位于东南部的彭水、黔江、酉阳等地。

3.3 重庆地区 $\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_{10} 、 NO_2 、 SO_2 、 CO 与 O_{3-8h} 的浓度月变化呈现一个相反的趋势。 $\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_{10} 、 NO_2 、 SO_2 、 CO 浓度月变化曲线呈 U 型分布,最高值都出现在 1 月,最低值都出现在 7 月; O_{3-8h} 浓度的月变化呈抛物线型分布,最高值都出现在 8 月,最低值出现在 12 月。 $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 中心城区和渝西、渝西南地区浓度高于其他区域,渝东南的浓度是全市最低的。 O_{3-8h} 中心城区的变化幅度大于其他区域,1~3 月中心城区的浓度值低于其他五个区域,从 6 月开始浓度值激增,7 月和 8 月都超过了其他几个区域,成为全市 O_{3-8h} 最高的区域。 NO_2 浓度中心城区的值在每个月份都远高于其他区域。 SO_2 浓度值的大小来看,西南地区是六个区域中 SO_2 浓度最高的,浓度最低的区域是中心城区。 CO 月平均浓度渝东南各月的浓度都是六个区域最低的,其他五个区域浓度值较为接近。

3.4 重庆地区 O_{3-8h} 浓度变化与气象因子的相关性高于 $\text{PM}_{2.5}$ 和 NO_2 ,说明二次污染物 O_{3-8h} 浓度变化相比一次污染物更易受气象条件的影响。 $\text{PM}_{2.5}$ 和 NO_2 与气象因子的相关性东部地区略高于西部地区,而 O_{3-8h} 则是西部地区高于东部地区。

重庆地区污染特征时空差异显著,在预测大气污染物浓度变化及评估扩散条件时,应根据不同区域和季节的污染特征而有所侧重。

参考文献:

[1]刘德,张亚萍,等.重庆市天气预报技术手册[M].北京:气象出版社,2012:1-7.

-
- [2]韩余,周国兵,陈道劲,等. 重庆臭氧污染及其气象因子预报方法对比研究[J]. 气象与环境学报, 2020, 36(4):59-66.
- [3]ZHANG X Y,WANG Y Q,NIU T,et al. Atmospheric aerosol compositions in China:spatial/temporal variability, chemical signature,regional haze distribution and comparisons with global aerosols[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2012, 11:26571-26615.
- [4]张小曳,孙俊英,王亚强,等. 我国雾 G 霾成因及其治理的思考[J]. 科学通报, 2013, 58(13):1178-1187.
- [5]苏榕,陆定克,余家燕,等. 基于观测模型的重庆大气臭氧污染成因与来源解析[J]. 中国科学:地球科学, 2018, 48(1):102-112.
- [6]江文华,陈道劲. 2015 年重庆主城区空气质量状况及气象条件分析[J]. 四川环境, 2016, 35(3):90-93.
- [7]刘萍,翟崇治,余家燕,等. 重庆大气中 O₃ 浓度变化及其前体物的相关性分析[J]. 环境科学与管理, 2013, 38(1):42-44.
- [8]刘芮伶,翟崇治,李礼,等. 重庆主城区夏秋季 VOCs 浓度特征及来源研究[J]. 环境科学学报, 2017, 37(1):1260-1267.
- [9]刘姣姣,蒋昌潭,宋丹,等. 重庆夏季近地面臭氧变化规律及影响因素分析[J]. 重庆大学学报, 2014, 37(8):91-98.
- [10]韩余,刘德,白莹莹. 重庆市春节期间典型空气污染过程分析[J]. 中国环境监测, 2014, 30(1):43-48.
- [11]何佳玥,韩余,等. 万盛大气污染特征分析及污染预报模型的建立[J]. 四川环境, 2020, 39(2):65-71.
- [12]陈可雅,肖卿,熊万明,等. 重庆都市功能核心区和都市功能拓展区环境空气质量比较[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2016, 38(10):154-160.
- [13]曾胜兰,王雅芳. 成都地区污染天气分型及其污染气象特征研究[J]. 长江流域资源与环境, 2016, 25(S1):59-67.
- [14]倪超,李新江,向涛,等. 重庆涪陵大气污染物特征及其与气象要素的关系[J]. 西南师范大学学报(自然科学版), 2018, 43(9):123-130.