

廖国莲,何启玄,莫雨淳,等. 南宁市臭氧质量浓度特征及其与气象因素的关系[J]. 气象研究与应用,2023,44(3):67-71.

LIAO Guolian, HE Qixuan, MO Yuchun, et al. Characteristics of ozone mass concentration and its relationship with meteorological factors in Nanning[J]. Journal of Meteorological Research and Application, 2023, 44(3): 67-71.

南宁市臭氧质量浓度特征及其与气象因素的关系

廖国莲¹, 何启玄², 莫雨淳¹, 王义耕¹, 覃海润¹

(1.广西壮族自治区气象台, 南宁 530022; 2.北海市气象局, 广西 北海 536000)

摘要: 利用2015—2020年南宁市近地面臭氧监测数据及气象观测数据, 分析南宁市近地面臭氧质量浓度时间变化特征及超标情况, 并采用相关分析等统计方法研究臭氧与气象因素的关系。结果表明, 南宁市第90百分位O₃-8h质量浓度呈逐年增高趋势。O₃月平均质量浓度呈现双峰型变化, 峰值出现在4—5月和8—10月。南宁市O₃质量浓度与日照时数、最高气温、相对湿度的相关性高。南宁市O₃超标以轻度污染为主。O₃超标时日平均气温为12.3~31.4℃, 最高气温为20.9~37.7℃, 相对湿度为46%~88%, 日平均风速为0.7~3.4 m·s⁻¹, 气压为980.3~1011.7 hPa。

关键词: 臭氧; 气象因素; 变化特征; 南宁

中图分类号: X16

文献标识码: A

doi: 10.19849/j.cnki.CN45-1356/P.2023.3.12

近年来,随着经济的发展和城市化进程的加快,人口和汽车数量激增,大量极具反应活性的大气污染物排放,使得中国许多地区在夏季和秋季面临严重的光化学污染^[1]。臭氧(O₃)污染问题正在变得越来越复杂,越来越具有地域性。在京津冀、珠三角和长三角等区域,臭氧已逐渐替代细颗粒物(PM_{2.5})成为夏季首要污染物^[2-5]。而在南宁市,臭氧作为首要污染物的天数已超过PM₁₀,接近PM_{2.5},臭氧污染已日趋严重。

学界普遍认为,我国城市臭氧污染的内因与臭氧前体物人为超标排放有关^[6-8],外因则受高温、少雨、强辐射等气象条件、天气系统的影响^[9-12],现有的研究表明晴天少云和紫外辐射强的天气有利于臭氧的产生,而多云的天气则不利于臭氧浓度的增加^[13]。高压后部、地面倒槽和锋前暖区等强暖性且不利于污染物扩散的天气类型易造成臭氧浓度超标^[14-15]。台风外围下沉气流不利于污染物扩散,导致平流层中的臭氧通过下沉气流进入对流层,从而形成臭氧污染^[16-17]。地形,如高海拔地形作用下的下沉气流,亦能使平流层的臭氧影响到地面的臭氧浓度^[18]。风

场不仅直接输送臭氧,其所携带的臭氧前体物也会影响局地臭氧污染。

气象条件是分析臭氧污染发生发展情况的关键因素。依据气象条件预报臭氧污染,对现阶段的防治工作有着重要意义。由于中国幅员辽阔,气象条件复杂多样,因此影响臭氧污染发生的因素(如太阳辐射或湿度等),在全国各个区域是不一样的。本文对2015—2020年南宁市臭氧浓度变化特征及其与气象要素的关系进行研究,以期南宁市臭氧预警预报提供参考,同时为改善南宁城市空气质量、打赢蓝天保卫战提供科学决策依据。

1 资料与方法

文中所用南宁市臭氧日最大8h平均值(以下简称为O₃-8h)浓度资料来自广西壮族自治区生态环境监测中心,气象资料来自广西壮族自治区气象信息中心CIMISS数据库,主要包括南宁市常规气象站逐日的最高气温、降水量、日照时数、总辐射、总云量、相对湿度等资料,时限为2015年1月1日—2020年12月31日。文中城市环境空气质量评价主

收稿日期: 2023-06-01

基金项目: 广西气象科研计划项目(桂气科2020Z04)、中国气象局预报员专项(CMAYBY2020-097)、广西气象局创新团队项目

第一作者简介: 廖国莲(1982—),女,硕士,高级工程师,主要从事环境气象预报及研究工作。E-mail: liuxi623@163.com

要依据《环境空气质量指数(AQI)技术规定(试行)》(HJ633-2012)和《环境空气质量标准》(GB3095-2012),利用臭氧日最大8小时均值资料计算了臭氧空气质量分指数(IAQI),从而得出逐日臭氧污染等级。按照二类功能区所对应的二级标准,当 O_3-8h 超过 $160\mu g\cdot m^{-3}$ 时,空气质量不达标。

2 结果与分析

2.1 臭氧质量浓度特征

2.1.1 O_3 质量浓度年变化特征及超标情况

图1为2015—2020年南宁第90百分位 O_3-8h 质量浓度和 O_3 超标天数。由该图可知,2015—2020年南宁市第90百分位 O_3-8h 质量浓度呈逐年增高趋势,其中2019年第90百分位 O_3-8h 质量浓度达到了 $126\mu g\cdot m^{-3}$ 。而2015—2020年南宁 O_3-8h 超标天数分别为22、10、19、17、16、3d,呈现出逐年减少的趋势。在南宁市第90百分位 O_3-8h 逐年增高的情况下,超标天数能被控制住并逐年减少,估计与这几年南宁市不断提高的臭氧污染预警预报能力及日益精准的大气污染管控工作密切相关。

南宁市臭氧超标天数以轻度污染为主,其中95.5%为轻度污染,4.5%为中度污染。臭氧作为首要污染物的超标天数占全年超标天数的比例为0%~46.9%,已成为影响南宁市城市环境空气质量的一项重要重要大气污染物。

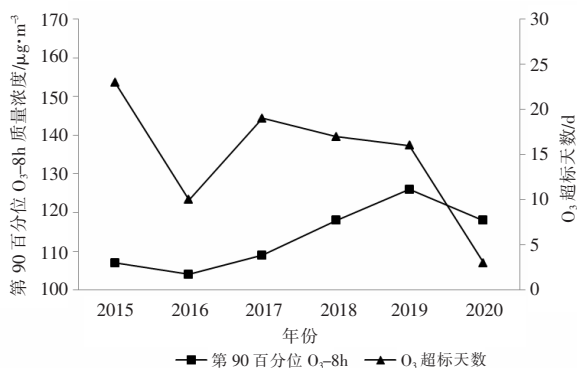


图1 2015—2020年南宁第90百分位 O_3-8h 质量浓度和 O_3 超标天数

2.1.2 O_3 质量浓度月变化特征

经统计,除了1月和12月,其他月份南宁市均出现过臭氧超标天。图2为2015—2020年南宁市 O_3 月平均质量浓度变化及第90百分位 O_3-8h 变化图。由该图可知,南宁市 O_3 月平均质量浓度呈现双峰型变化,峰值出现在4—5月和8—10月,第90百

分位 O_3-8h 质量浓度在10月达到最大值 $161.5\mu g\cdot m^{-3}$,12月达到最低值 $109\mu g\cdot m^{-3}$ 。6、7月,由于南宁市气温高、湍流活动旺盛、混合层高、降水频繁等原因,有利于大气污染物的垂直扩散和湿沉降,臭氧的生成和积累受阻,因此,6、7月臭氧质量浓度相对降低,但与其他月份相比,4—10月臭氧质量浓度总体较高,臭氧已成为影响南宁市夏秋季环境空气质量的主要污染物。而11月—次年3月南宁市气温低,阴天日数多,日照少,太阳辐射弱,不利于臭氧的生成,臭氧质量浓度较低。

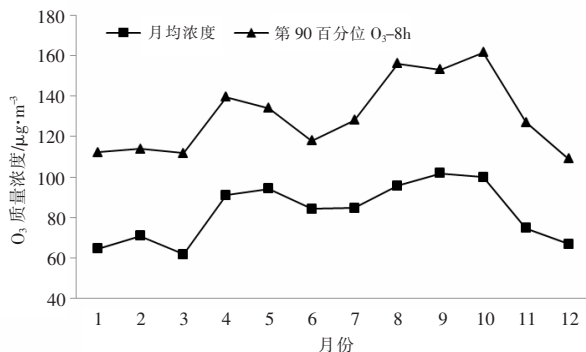


图2 2015—2020年南宁市 O_3 月均质量浓度变化及第90百分位 O_3-8h 变化图

2.2 臭氧质量浓度与气象因素的关系

2.2.1 臭氧质量浓度与气象要素的相关分析

利用MATLAB软件统计2015—2020年南宁市逐日 O_3-8h 质量浓度与各气象要素的相关系数(表1),从表1可知南宁市 O_3-8h 质量浓度与日照时数、最高气温、日均气温呈现正相关关系,与相对湿度、总云量、风速、气压、降水量呈现负相关关系。其中, O_3-8h 质量浓度与日照时数及最高气温的相关关系分别达到了0.68和0.52,表明 O_3-8h 质量浓度与日照时数、最高气温显著相关,日照时数越长,总辐射越大,气温越高,越有利于 O_3 的生成。这是因为 O_3 的生成是其前体物在太阳辐射作用下发生光化学反应,而温度变化和太阳辐射强弱正相关。 O_3 浓度与相对湿度的相关关系达到了-0.56,呈现显著负相关关系,说明相对湿度高不利于 O_3 的产生。在相对湿度高的天气条件下,水汽充足,云量较多,从而减少到达地面的紫外辐射,使光化学反应减弱,不利于 O_3 的生成。由于风速越大越不利于 O_3 及其前体物的聚集和积累,因此风速在一定程度上也影响 O_3 的生成,与 O_3 质量浓度存在负相关关系。当气压较低时,南宁经常是受热带气旋外围下沉气流控制,容易出

表 1 2015—2020 年南宁市 O₃-8h 质量浓度与气象要素相关性(均通过了 α=0.01 的显著性检验)

天气类型	气温	最高气温	总云量	风速	日照时数	相对湿度	降水量	气压
相关系数	0.40	0.52	-0.24	-0.18	0.68	-0.56	-0.12	-0.23

现高温、晴空天气,有利于发生光化学反应生成 O₃,因此,气压与 O₃ 质量浓度存在负相关关系。

2.2.2 O₃ 质量浓度超标的气象因子阈值

本文选取南宁市 O₃-8h 质量浓度超标 (大于 160 μg·m⁻³) 及对应的气象因子进行统计分析 (表 2),表明当南宁 O₃-8h 质量浓度超标时,日平均气温的范围为 12.3~31.4 ℃,最高气温的范围为 20.9~37.7 ℃,相对湿度的范围为 46%~88%,风速的范围为

0.7~3.4 m·s⁻¹,气压的范围为 980.3~1011.7 hPa。说明当南宁市最高气温低于 20.9 ℃或相对湿度高于 88%时,O₃-8h 质量浓度超标的概率比较小。表 2 日照时数平均值为 9.1 h,总云量均值 0.6,降水量均值为 0.6 mm,由此可见,南宁市 O₃-8h 质量浓度超标时气象要素的平均情况是日平均气温 25.5 ℃,相对湿度小于 66.9%,日照时数 9.1 h,天空总云量近乎为 0,基本无降水。

表 2 2015—2020 年南宁市 O₃-8h 质量浓度超标 (大于 160μg·m⁻³) 的气象因子阈值

要素	O ₃ /μg·m ⁻³	气温 /℃	最高气温 /℃	总云量	风速 /m·s ⁻¹	日照时数 /h	气压 /hPa	相对湿度 /%	降水量 /mm
平均值	176.9	25.5	31.8	0.6	1.7	9.1	994.4	66.9	0.6
最大值	228	31.4	37.7	5.3	3.4	11.6	1011.7	88	16.8
最小值	161	12.3	20.9	0	0.7	4	980.3	46	0

2.2.3 不同范围气象要素对 O₃ 质量浓度的影响分析

与 O₃ 质量浓度相关最大的三个气象因子是日照时数、最高气温和相对湿度。图 3 至图 5 给出了这三个气象因子不同范围下的 O₃-8h 质量浓度均值和超标率。由图 3 可见,当 T_{max} 高于 35 ℃时,O₃-8h 质量浓度均值和 O₃ 超标率均明显升高,O₃-8h 质量浓度均值达到了 124.1 μg·m⁻³,O₃ 超标率达到了 13.3%。当 T_{max} 低于 20 ℃时,超标率非常低。当 T_{max} 低于 15 ℃时,没有出现 O₃ 超标情况。臭氧是在太阳辐射下通过光化学反应由一次污染物经反应生成的,而温度是因太阳辐射而逐渐升高,因此 O₃-8 h 质量浓度和 O₃ 超标率随着最高气温 T_{max} 的升高

而增加。

从图 4 可知,相对湿度 RH 与 O₃ 超标率呈“倒 V 型”关系。当 50%≤RH<60%时,O₃-8h 质量浓度平均值 126.2 μg·m⁻³ 和 O₃ 超标率 20.8%均达到最高。当 RH<40%或 RH≥80%时,几乎不出现 O₃ 超标情况。当 RH≥60%时,O₃-8h 质量浓度随着相对湿度的升高明显降低。在相对湿度较高的情况下,水蒸气饱和度较高,空气中水汽所含的自由基迅速将臭氧分解为氧分子,降低臭氧浓度^[11]。

太阳辐射强度与近地面臭氧浓度密切相关,变化趋势相同。太阳辐射强弱直接影响光化学反应速度,从而导致臭氧浓度发生变化。日照时数 t 越长,

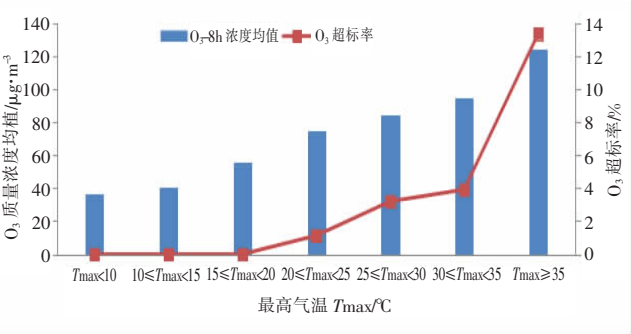


图 3 2015—2020 年南宁市不同最高气温条件下 O₃-8h 质量浓度均值和达标率

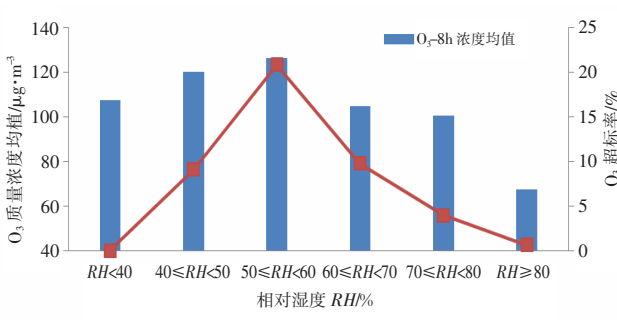


图 4 2015—2020 年南宁市不同相对湿度条件下 O₃-8h 质量浓度均值和达标率

太阳辐射越强, O_3 -8h 质量浓度和 O_3 超标率越高。由图 5 可见,当 $t < 4$ h 时, O_3 超标率近乎为 0。当 $t \geq 8$ h 时, O_3 超标率明显上升。当 t 超过 10 h 时, O_3 -8h 质量浓度均值达到 $124.3 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, O_3 超标率达到 14.9%。

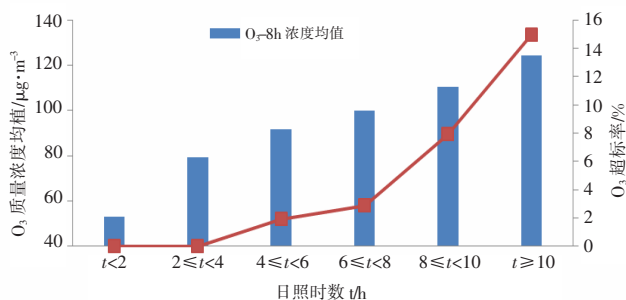


图 5 2015—2020 年南宁市不同日照时数条件下 O_3 -8h 质量浓度均值和达标率

上述臭氧与气象因素变化规律的分析结果与其它地区基本一致,具体还与各地地域气候特征有关。青藏高原典型城市拉萨当日均气温大于 10°C 时, O_3 超标率达到 60% 以上^[18],当日照时数仅为 2~4 h 时, O_3 超标率也较高,超过 20%,其相对湿度与超标率呈“倒 U 型”关系,当 $RH \geq 70\%$ 时, O_3 超标率大幅度下降,但当 $30\% \leq RH < 70\%$ 时, O_3 超标率基本超过 50%,远高于南宁 O_3 超标率。同处于南岭地区的珠三角地区, O_3 浓度分别随着温度和相对湿度的增加以指数的形式增大和降低^[8],当气温大于 27°C 时, O_3 超标率超过 20%,当相对湿度低于 55% 时, O_3 超标率高于 30%。

2.3 典型污染过程分析

2.3.1 天气形势分析

2018 年 10 月 5—8 日南宁市出现一次臭氧轻度污染过程, O_3 -8h 质量浓度最高达到 $190 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。污染过程前期(9 月 30 日—10 月 4 日)南宁市低层受冷高压脊控制,污染过程期间(10 月 5—8 日)为变性高压脊控制,气压梯度力小,近地面风速较小,不利于污染物的水平扩散。中高层 500 hPa 受副热带高压控制,以下沉气流为主,抑制对流活动,不利于大气污染物的垂直扩散。同时,副高控制下南宁天气晴朗,气温高,辐射强,有利于光化学反应的发生,而造成此次臭氧污染过程。10 月 9 日,随着冷空气和切变线自北向南影响广西,南宁下起了中雨。由于降水的湿沉降作用,大气污染物浓度迅速降低,污染过程结束。

2.3.2 气象要素分析

统计该污染过程南宁市各气象要素可知,污染

过程期间相对湿度日均值均低于 70%,总云量日均值在 4 成以下,日最高温度大于 30°C ,日照时数均高于 9 h,太阳辐射强烈,光化学反应剧烈,促进了臭氧的生成。同时过程期间日降雨量均为 0 mm,有利于臭氧及其前体物的积累,致使该次过程 O_3 -8h 质量浓度均值达到 $177 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。说明南宁市在云量少、气温高、日照时数长、相对湿度低、没有降水的条件下,更容易发生光化学反应,达到臭氧超标,这与前面的分析结果是一致的。

2.3.3 后向轨迹分析

利用 NOAA HYSPLIT 模型绘制 2018 年 10 月 5—8 日南宁市逐日 48 h 大气气流后向轨迹图,从中可见南宁市区 10 月 5—7 日中低层大气气流主要来自湖南、湖北等省份,10 月 8 日气流主要来自广东珠三角沿海地区。

通过分析 10 月 5—8 日全国 O_3 实况分布图可知,该段时间湖南、湖北、长三角以及珠三角地区均出现大范围 O_3 污染,结合南宁市后向轨迹分析,推测该段时间南宁市 O_3 污染过程与来自湖南、湖北以及珠三角地区的远距离外来区域输送存在一定的关系。

3 结论与讨论

(1)2015—2020 年南宁市第 90 百分位 O_3 -8h 质量浓度呈逐年增高趋势,而 O_3 月均质量浓度呈现双峰型变化,峰值出现在 4—5 月和 8—10 月。

(2)2015—2020 年南宁 O_3 -8h 超标天数分别为 22、10、19、17、16、3 d,呈现出逐年减少的趋势。南宁市 O_3 超标天数以轻度污染为主, O_3 作为首要污染物的超标天数占全年超标天数的比例为可高达 46.9%,已成为影响南宁市城市环境空气质量的一项重要大气污染物。

(3)南宁市 O_3 与日照时数、最高气温、相对湿度相关性最高,相关系数分别为 0.68、0.52、-0.56。当南宁市 $T_{\max} \geq 35^\circ\text{C}$ 、 $50\% \leq RH < 60\%$ 、 $t \geq 8$ h 时,容易出现 O_3 超标;当 $T_{\max} < 15^\circ\text{C}$ 、 $RH < 40\%$ 或 $RH \geq 80\%$ 、 $t < 4$ h 时,极少出现 O_3 污染。

(4)南宁市 O_3 超标的日平均气温变化范围为 $12.3 \sim 31.4^\circ\text{C}$,最高气温变化范围为 $20.9 \sim 37.7^\circ\text{C}$,相对湿度变化范围为 46%~88%,日均风速变化范围为 $0.7 \sim 3.4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,气压的范围为 980.3~1011.7 hPa,各气象要素的平均情况是日平均气温 25.5°C ,相对湿度小于 66.9%,日照时数 9.1 h,天空总云量近乎为 0,基本无降水。

参考文献:

- [1] 程麟钧, 王帅, 宫正宇, 等. 中国臭氧浓度的时空变化特征及分区[J]. 中国环境科学, 2017, 37(11): 4003–4012.
- [2] CHEUNG V T F, WANG T. Observational study of ozone pollution at a rural site in the Yangtze River Delta of China [J]. *Atmospheric Environmental*, 2001(35): 4947–4958.
- [3] 孟晓艳, 宫正宇, 张霞, 等. 全国及重点区域臭氧污染现状[J]. 中国环境监测, 2017, 33(4): 17–25.
- [4] 王占山, 李云婷, 陈添, 等. 北京城区臭氧日变化特征及与前体物的相关性分析[J]. 中国环境科学, 2014, 34(12): 3001–3008.
- [5] 程麟钧, 王帅, 宫正宇, 等. 京津冀区域臭氧污染趋势及时空分布特征[J]. 中国环境监测, 2017, 33(1): 14–21.
- [6] 陆克定, 张远航, 苏杭, 等. 珠江三角洲夏季臭氧区域污染及其控制因素分析[J]. 中国科学: 化学, 2010, 40(4): 407–420.
- [7] 王雪松, 李金龙. 人为源排放 VOC 对北京地区臭氧生成的贡献 [J]. 中国环境科学, 2002, 22(6): 22–26.
- [8] 刘建, 吴兑, 范绍佳, 等. 前体物与气象因子对珠江三角洲臭氧污染的影响[J]. 中国环境科学, 2017, 37(3): 813–820.
- [9] 黄俊, 廖碧婷, 吴兑, 等. 广州近地面臭氧浓度特征及气象影响分析[J]. 环境科学学报, 2018, 38(1): 23–31.
- [10] 陈镭, 马井会, 瞿元昊, 等. 2019—2020 年上海地区空气质量变化特征及气象影响因素分析[J]. 气象研究与应用, 2022, 43(1): 59–65.
- [11] 王闯, 王帅, 杨碧波, 等. 气象条件对沈阳市环境空气臭氧浓度影响研究[J]. 中国环境监测, 2015, 31(3): 32–37.
- [12] 王义耕, 廖国莲, 陈丹, 等. 广西一次大范围长时间臭氧污染过程分析[J]. 气象研究与应用, 2021, 42(4): 123–126.
- [13] 谢汶静, 王盛繁, 何林宴, 等. 2015—2019 年贵港市臭氧污染特征及其与气象要素的关系[J]. 气象研究与应用, 2021, 42(1): 58–62.
- [14] 唐贵谦, 李昕, 王效科, 等. 天气型对北京地区近地面臭氧的影响 [J]. 环境科学, 2010, 31(3): 573–578.
- [15] 王宏, 林长城, 陈晓秋, 等. 天气条件对福州近地层臭氧分布的影响[J]. 生态环境学报, 2011, 20(增刊 2): 1320–1325.
- [16] JIANG C Y, ZHAO L T, LIU J, et al. Why does surface ozone peak before a typhoon landing in Southeast China? [J]. *Atmospheric Chemistry & Physics*, 2015, 15(23): 24623–24642.
- [17] 张容菁, 廖国莲, 陈明璐, 等. 玉林市 2019 年秋季一次臭氧污染过程特征分析[J]. 气象研究与应用, 2020, 41(1): 84–88.
- [18] 王彩红, 张惠芳, 尼霞次仁, 等. 青藏高原典型城市拉萨市近地面臭氧污染特征[J]. 中国环境监测, 2017, 33(4): 159–166.

Characteristics of ozone mass concentration and its relationship with meteorological factors in Nanning

LIAO Guolian¹, HE Qixuan², MO Yuchun¹, WANG Yigeng¹, QIN Hairun¹

(1. Guangxi Meteorological Observatory, Nanning 530022, China;

2. Beihai Meteorological Bureau, Guangxi Beihai 536000, China)

Abstract: Based on the monitoring data of near-surface ozone and meteorological observation data in Nanning city from 2015 to 2020, the variation characteristics of near-surface ozone concentration and its exceedance were analyzed, and the relationship between ozone and meteorological factors was also studied by using statistical methods such as correlation analysis. The results showed that the 90th percentile O_3 -8h mass concentration in Nanning showed an increasing trend. The monthly mean mass concentration of O_3 showed a bimodal change, with peaks appearing in April–May and from August–October. The correlation between O_3 mass concentration and sunshine duration, maximum temperature and relative humidity in Nanning was high. The excessive ozone in Nanning was mainly manifested as mild pollution. When O_3 exceeded the standard, the average daily temperature varied from 12.3 °C to 31.4 °C, the maximum temperature from 20.9 °C to 37.7 °C, the relative humidity from 46% to 88%, and the average daily wind speed from 0.7 m·s⁻¹ to 3.4 m·s⁻¹. The pressure ranged from 980.3 hPa to 1011.7 hPa.

Key words: ozone; meteorological factors; variation characteristics; Nanning