

# 江苏臭氧污染特征及其与气象因子的关系

严文莲<sup>1, 2</sup> 刘端阳<sup>1, 2</sup> 康志明<sup>2</sup> 谢真珍<sup>3</sup> 孙燕<sup>41</sup>

(1 中国气象局交通气象重点实验室, 南京 210008;

2 江苏省气象台, 南京 210008; 3 淮安市气象局, 江苏淮安 223001;

4 江苏省气象科学研究所, 南京 210009)

**【摘要】:** 本文利用 2013—2017 年江苏 70 个环境监测站资料和 13 个国家气象观测站常规观测资料, 研究江苏臭氧污染特征及其与气象因子的关系。结果表明: 江苏臭氧质量浓度和超标率逐年增长, 其空间分布特征由东部沿海城市大于西部内陆城市逐渐转为东西部城市差异不明显, 南部城市超标率总体高于北部; 4—9 月臭氧质量浓度处于较高水平, 夏季超标占一半以上; 日变化呈“单峰单谷”型, 15 时(北京时间)前后超标率最大,  $O_{3-8h}$  较  $O_{3-1h}$  峰值推后 3—4h;  $O_3$  对空气质量不达标贡献率呈逐年上升趋势; 臭氧质量浓度与颗粒物和前体物  $NO_x$  日变化呈反相关, 且存在“周末效应”。江苏地区臭氧质量浓度总体与气温正相关, 相对湿度负相关, 气温高于  $25^\circ\text{C}$ 、相对湿度 30%~50% 区间、风速低于  $4\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$  以下易出现高浓度臭氧; 苏南的城市主要在东南风向对应较高的值, 而苏北城市多在西南风向对应的较高臭氧质量浓度值。

**【关键词】:** 臭氧污染 气象因子 周末效应 江苏

**【分类号】:** X515 **【文献标识码】:** A

## 引言

近地面臭氧( $O_3$ )是由氮氧化物( $NO_x$ )和挥发性有机物(VOCs)在太阳光照射下, 经过一系列光化学反应生成的。近年来, 随着城市化进程加快, 臭氧的污染问题日益突出, 对流层中高浓度的臭氧对人体健康和生态环境具有严重的破坏作用<sup>[1, 2, 3]</sup>, 臭氧浓度的升高对非意外死亡风险及心血管疾病死亡风险的增加也有显著性影响<sup>[4]</sup>。

随着中国臭氧观测的开展, 许多城市对臭氧质量浓度的变化特征进行了研究<sup>[5, 6, 7, 8]</sup>, 指出臭氧质量浓度逐年增加, 超标现象也越来越严重, 我国大多数城市的臭氧处于 VOC 控制区; 臭氧污染是多重空间和时间积累的过程, 本地污染源排放和周边区域污染输送是臭氧污染的重要来源<sup>[9]</sup>, 而气象条件对近地层臭氧的生成和转化作用也不容忽视, 同一排放源在不同的气象条件下可能产生不同的污染状况<sup>[10, 11, 12, 13]</sup>。陆克定等<sup>[14]</sup>、易睿等<sup>[15]</sup>、程念亮等<sup>[16]</sup>、王闯等<sup>[17]</sup>分别对珠三角、长三角、北京和沈阳等地臭氧污染的气象条件进行了研究, 认为  $O_3$  浓度与气压、湿度以及能见度成反比, 而与风速、温度成正比, 且区域输送特征明显; 梁碧玲等<sup>[18]</sup>认为综合气象条件是  $O_3$  污染变化的重要因子, 较高的温度、充足的日照、干燥、无雨及弱风是臭氧污染的重要气象条件; 刘建等<sup>[19]</sup>

**基金项目:** 国家重点研发计划(2016YFC0201901; 2016YFC0201903); 国家自然科学基金重点项目(91544229; 91544231); 江苏省政府 333 项目(B) RA2016565); 江苏省局青年基金(Q201605); 国家自然科学基金资助项目(41575010)

**通信作者:** 刘端阳. liuduanyang2001@126.com

通过观测综合分析前体物和气象因子对臭氧的影响,指出一定的  $\text{NO}_x$  浓度,  $27^\circ\text{C}$  以上的气温及 55% 以下以及受偏西风控制的相对湿度是珠三角地区发生光化学污染的关键性因子。另外,臭氧质量浓度超标常出现在高压后部、地面倒槽、锋前暖区和高压控制等天气型下<sup>[20,21]</sup>;总体来说,臭氧污染的发生是多种因素共同作用的结果,而气象条件又因地而异,为此,有必要开展影响江苏臭氧污染的气象因子研究。

本文利用江苏省臭氧质量浓度资料,结合 13 个城市的气象资料,分析江苏近地面层臭氧质量浓度的时空变化规律以及臭氧质量浓度与气象要素的关系,为江苏省臭氧污染的预报预警提供诊断参考。

## 1 资料与方法

本研究所用的污染物浓度数据来源于环保部环境监测总站江苏的 70 个国控点 2013 至 2017 年监测数据;同期气象数据(气温、相对湿度、风向风速、降水资料)来源于江苏省 13 市基本气象站逐时观测数据。

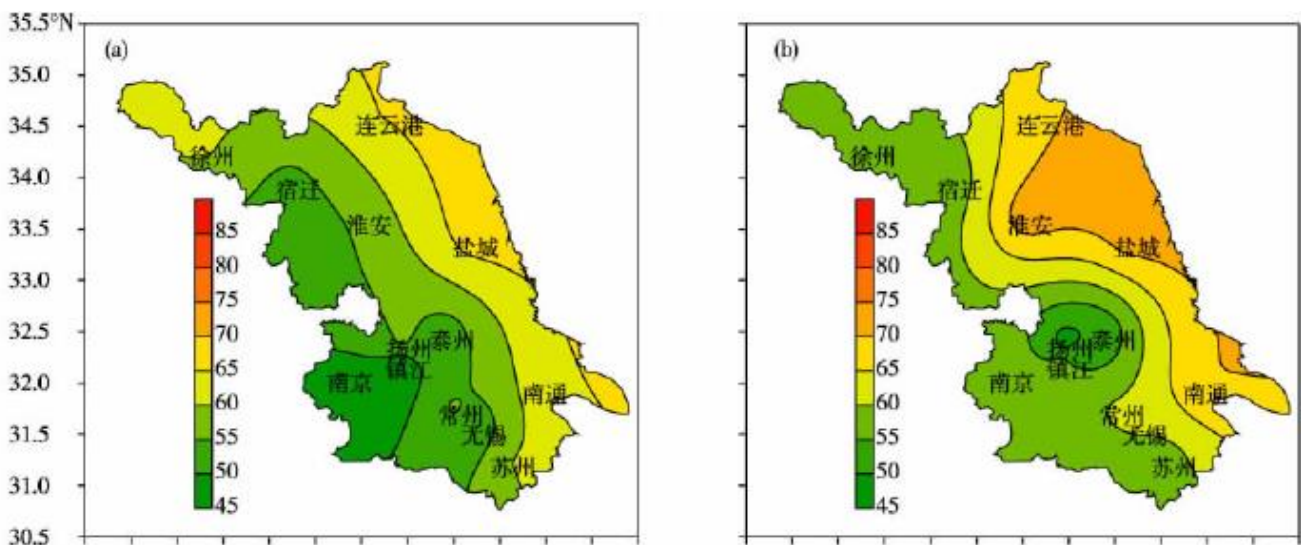
$\text{O}_{3-1h}$ 、 $\text{O}_{3-8h}$  是指臭氧小时最大值和臭氧 8h 滑动平均值, $\text{O}_{3-8\text{max}}$  为日滑动 8h 平均最大值,各市污染物浓度值平均是指各城市的若干环境监测点的平均值。臭氧小时超标指  $\text{O}_{3-1h}$  浓度高于  $200 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ ,日值超标指  $\text{O}_{3-8\text{max}}$  浓度超过  $160 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 。各指标的含义、计算方法和评价方法详见《环境空气质量标准》(GB3095—2012)<sup>[22]</sup>和《环境空气质量(AQI)技术规定》(试行)(HJ633—2012)<sup>[23]</sup>。研究气象因子对臭氧影响时,均考虑日间 07—18 时(北京时间,下同)无降水情况。

## 2 江苏臭氧污染特征

### 2.1 江苏臭氧质量浓度基本特征

#### 2.1.1 年月分布

江苏 13 市臭氧小时年平均质量浓度在  $45 \sim 85 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$  之间。从逐年变化看,2013—2017 年总体是逐年增加的;空间分布看,东部沿海城市浓度要高于内陆城市,其中扬州和泰州站相比其他城市臭氧浓度要低一些;近两年,东部沿海城市增幅小或略有下降,但西部增加明显,如盐城站 2016 年较 2015 年还出现了明显下降,而泰州、扬州、南京等站的浓度明显上升,这使得本省东西部的臭氧质量浓度差异缩小。



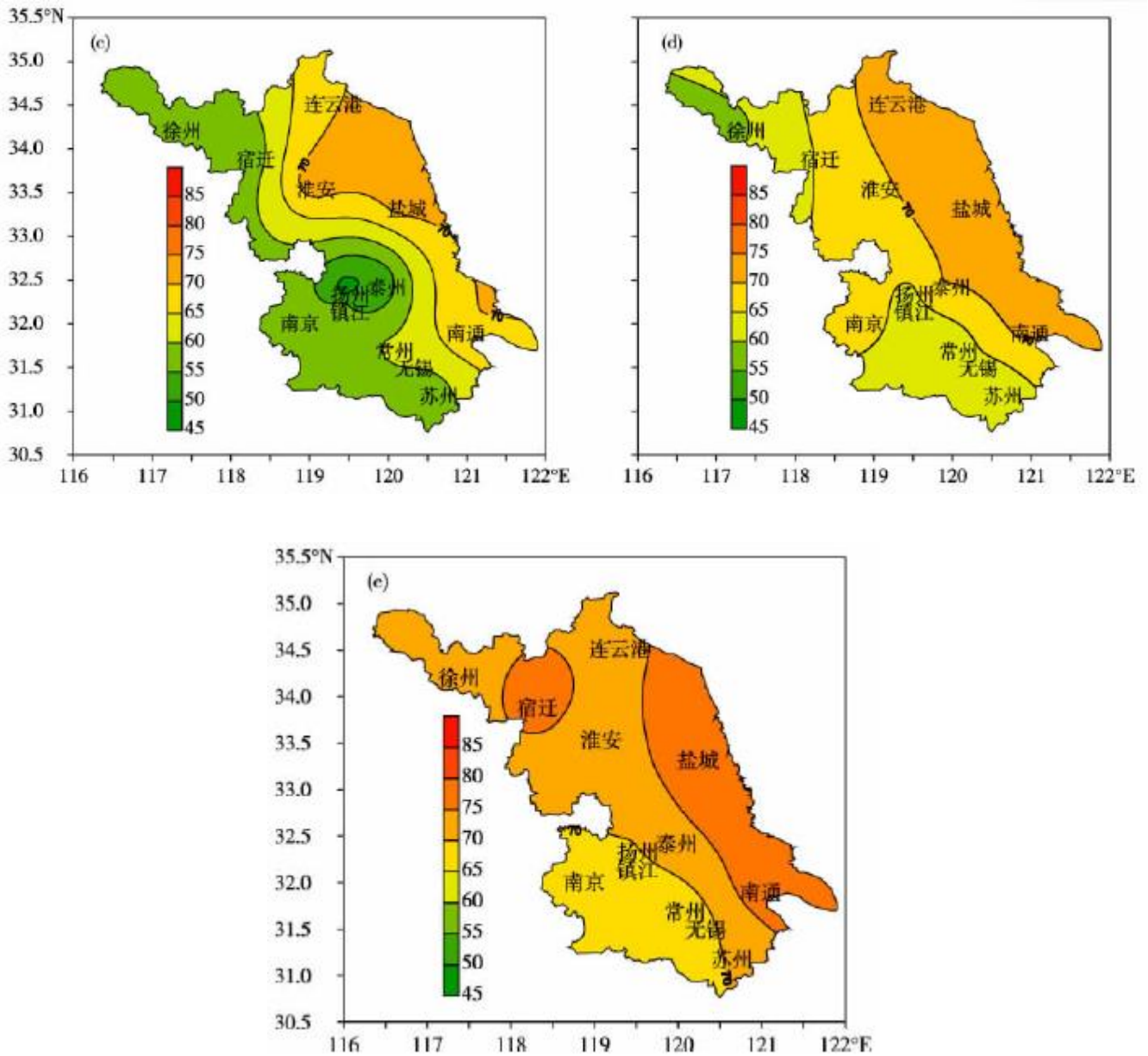


图1 江苏小时 $O_3$ 年均浓度分布

(a) 2013; (b) 2014; (c) 2015; (d) 2016; (e) 2017

从月变化(图2)看,每年的1—4月臭氧质量浓度处于不断上升的状态,在9月之后开始快速下降,4—9月处于较高的水平,其中最高出现在5—6月和8—9月,7月前后出现一个下降或相对的低值,这与江苏在6月中下旬至7月上旬进入梅雨期,降水较多有关。不同年份比较看,在秋末—春初这段时间,差异不大,而在4—9月这段时间,每年的质量浓度水平变化较大,总体是一个上升趋势,但不同年份由于当年集中降水时段的偏差和降水多寡而有所不同,如2016年夏季降水较多,臭氧质量浓度较2015年反而下降,2017年4—6月臭氧质量浓度较往年有大幅提高。整个季节分布看,夏季和春季质量浓度均较高,秋季明显下降,冬季最低。

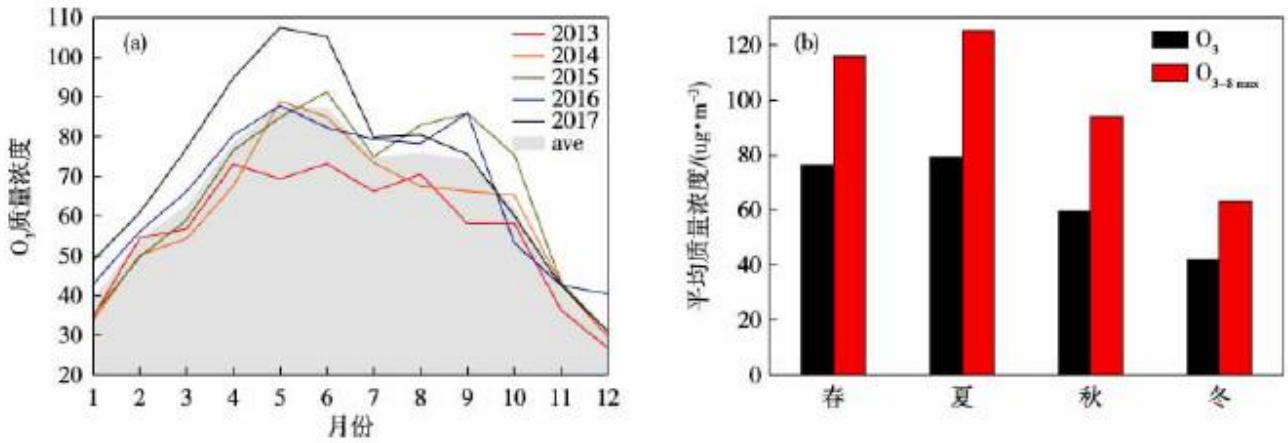


图2 江苏 2013—2017 年平均臭氧质量浓度月变化 (a) 和季节分布 (b)

### 2.1.2 日分布

臭氧小时平均值和臭氧滑动 8h 平均值日变化分布都呈“单峰单谷”型, 峰值分别出现在 15 时左右和 18—19 时前后, 谷值分别在 07 时左右和 08—09 时前后; 相比较而言, 臭氧滑动八小时平均最大值较臭氧小时最大值平均推后 3—4h (图 3)。不同年份日变化看, 2015 和 2016 年浓度较 2013 和 2014 年有所增加, 峰宽整体有所加宽。城市之间的日变化趋势差别不大, 但是逐年的平均日变化各城市略有差异, 总体趋势是逐年增加, 小部分城市有的年份夏季降水或阴雨天气多, 导致该年略偏低; 另外, 背景浓度(早上)也是逐年增加的趋势。

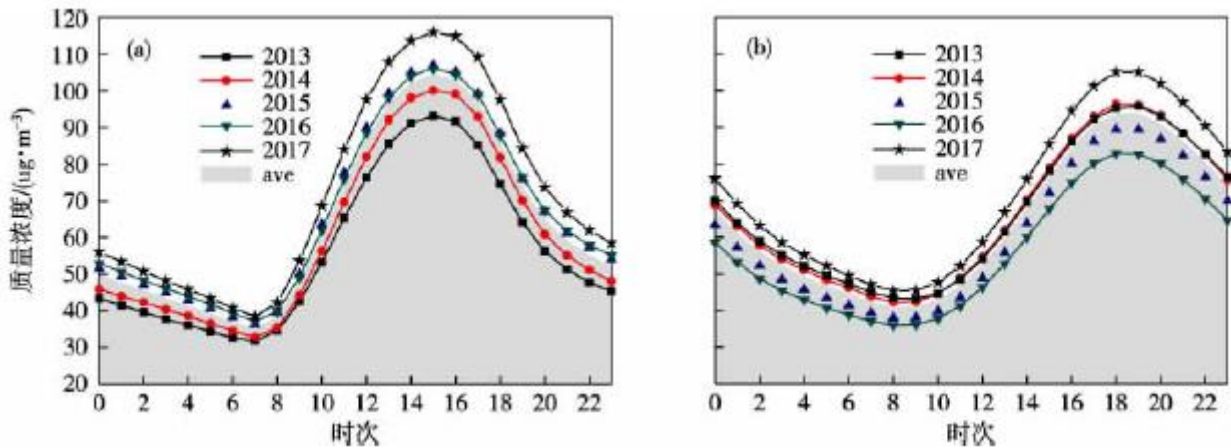


图3 江苏臭氧质量浓度小时平均 (a) 和滑动 8h 平均值 (b) 日变化

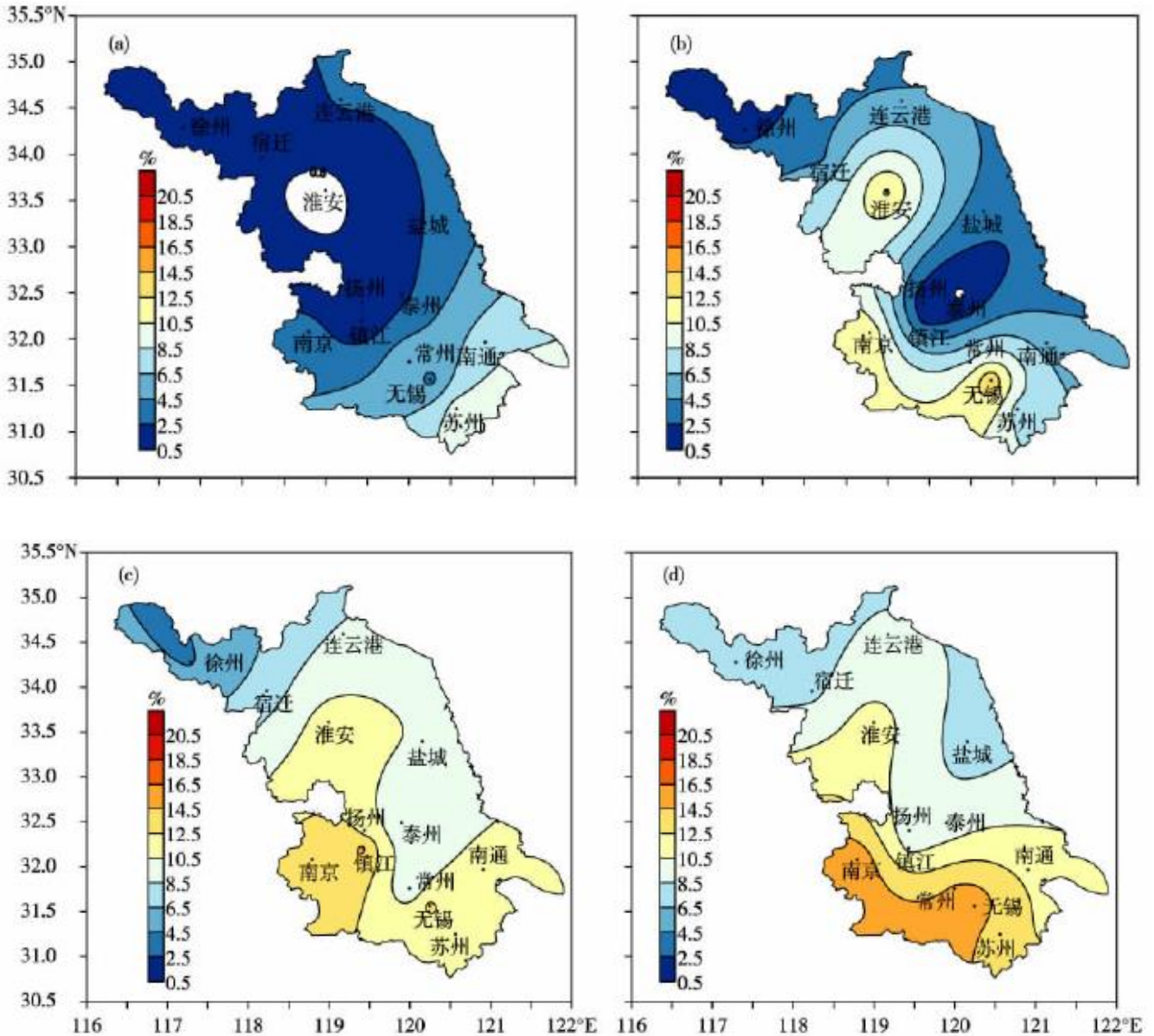
## 2.2 江苏臭氧污染情况

### 2.2.1 江苏臭氧质量浓度超标空间分布

分析  $O_{3-8max}$  质量浓度超过二级标准的情况 (图 4), 可以看到, 江苏的臭氧超标南部明显高于北部, 且 2013 年后超标高值区逐步向北扩展, 超标比例总体也呈增长趋势。南京和苏锡常, 南通、淮安等地近年处于较高的水平, 特别是 2016 年南京的臭氧超标率全省最高。2017 年, 全省超标分布由以往的南北分布转变为东西分布, 西部明显高于东部沿海, 且西北部臭氧超标率明显增加, 如

徐州 2017 年臭氧超标占全年超标日的 21%, 位居全省第一。

进一步分析不同等级的臭氧污染的空间分布(图略), 发现臭氧污染以轻度污染为主, 污染日数南部多于北部, 内陆多于沿海城市, 且污染日数呈逐年上升趋势; 中度污染日数在 0~18d 不等, 且主要集中在江苏南部, 每年的大值区中心略有不同, 如 2014 年出现在苏南和淮安较多, 2015 年在沿江一带相对较多, 2016 年主要在东南部一带。江苏出现重度臭氧污染的日数较少, 仅少部分城市每年出现 1~2d。2017 年不同等级的臭氧污染空间分布有所改变, 污染日数总体上升, 轻度和中度污染除东北部略低外, 其他地区都较多, 且内陆明显高于沿海, 重度污染在南通地区出现较多, 达 5d。



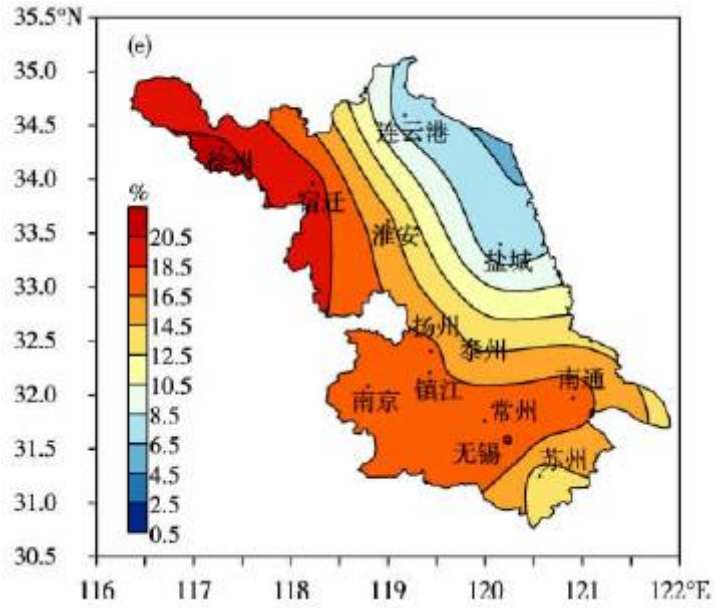


图 4 2013—2017 年臭氧日超标率分布对比

(a) 2013; (b) 2014; (c) 2015; (d) 2016; (e) 2017

### 2.2.2 臭氧污染贡献逐年上升

图 5 给出了江苏 2013—2017 年 AQI 年不达标率及各污染物对 AQI 不达标的贡献比例, 可以看到, 各市 AQI 年不达标率总体是呈下降趋势, 其中 2017 年西(北)部几个城市出现了上浮(徐州、宿迁、扬州、镇江), 这与 2017 年臭氧超标的大幅上升是密不可分的。分析几种主要污染物的贡献发现,  $PM_{2.5}$  对 AQI 不达标的贡献整体是明显下降的,  $PM_{10}$  较 2013 年也是下降明显, 但近几年变化不大, 而  $O_3$  的贡献率则是总体呈现上升的趋势, 特别是 2017 年, 除东北部的盐城和连云港下降外, 其他城市都是明显上升的。

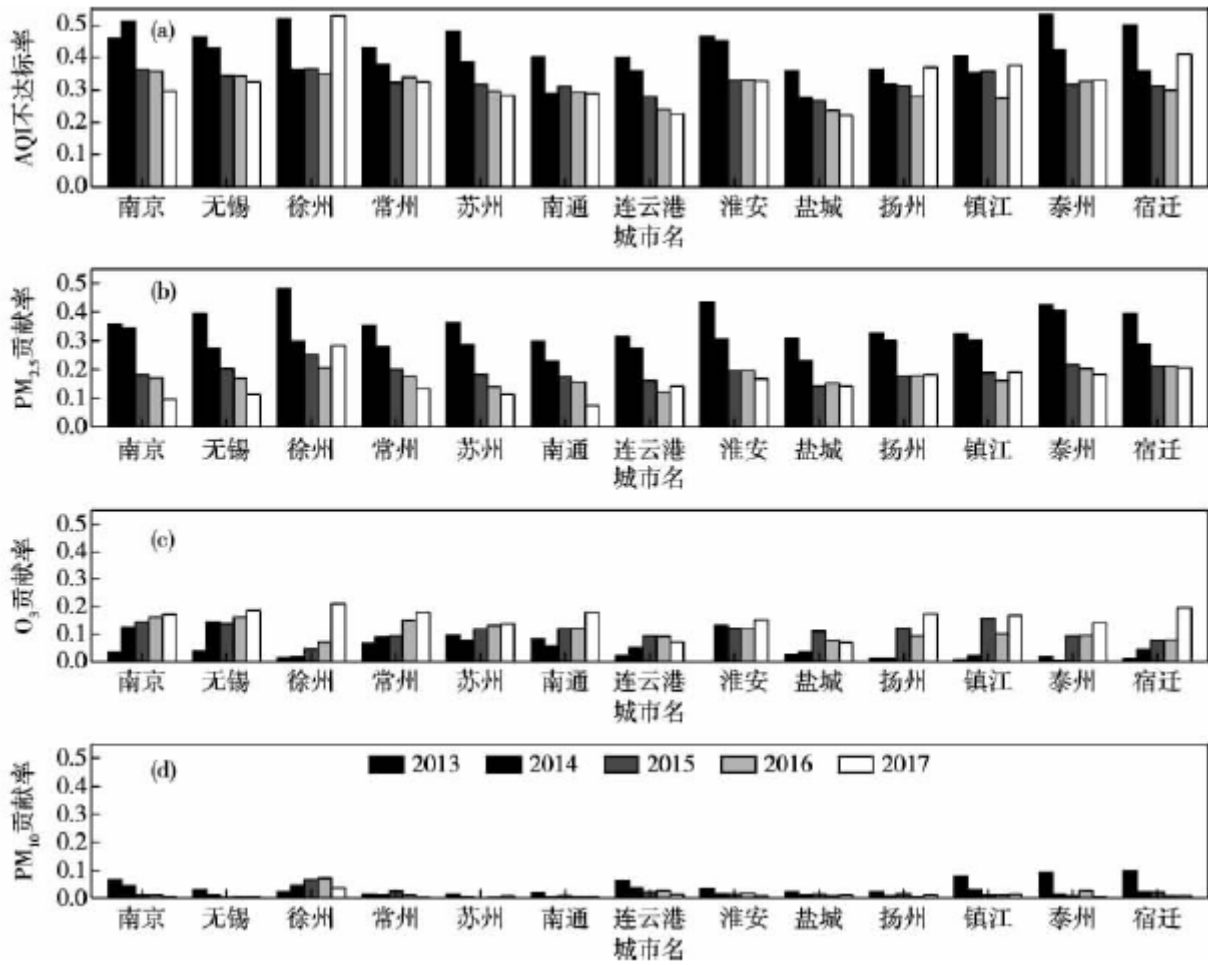


图5 2013—2017年(a)AQI 不达标比率以及(b)PM<sub>2.5</sub>、(c)O<sub>3</sub>和(d)PM<sub>10</sub>对AQI 不达标的贡献

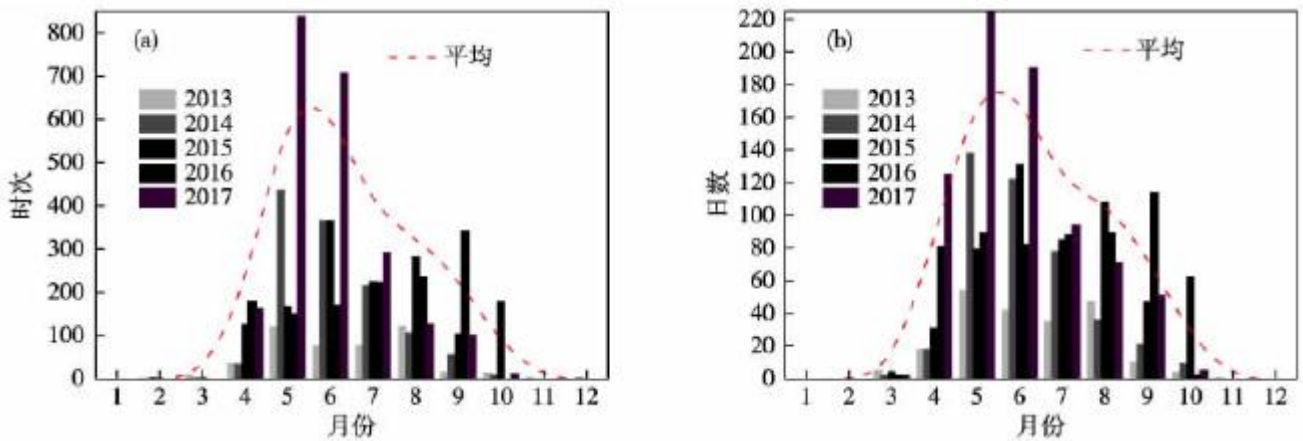


图6(a)小时臭氧超标的总时次和(b)O<sub>3-smax</sub>超标日数月变化

### 2.2.3 臭氧质量浓度超标月分布

小时臭氧超标在2—11月都有出现,其中5—8月最为常见,2月和11月极少,每年的具体分布各有差异,如2014年和2017年在5—6月较多,2015年集中在6—8月,而2016年在7—9月较多(图6a)。从臭氧8h滑动平均日最大值月分布看,3—10月均有出现日超标现象,主要出现在4—9月,夏季超标占约53%,冬季基本无超标情况。分析不同等级超标的月分布看,臭氧重度污染多在5—9月出现,中度污染4—10月,轻度污染在3—10月(图略)。

#### 2.2.4 小时臭氧质量浓度超标的日分布

小时臭氧质量浓度超标的日变化(图7)看,一天当中,11时后开始出现超标现象,随着太阳辐射增强,臭氧的生成速率增加,小时臭氧质量浓度超标时次逐渐增多,在15时前后出现超标峰值,随着辐射减弱,超标时数逐渐下降,日落后,快速下降;2017年逐小时超标情况也是较往年有一个大幅上升。另外,值得注意的是,在夜间,也有少数时次出现超标情况。

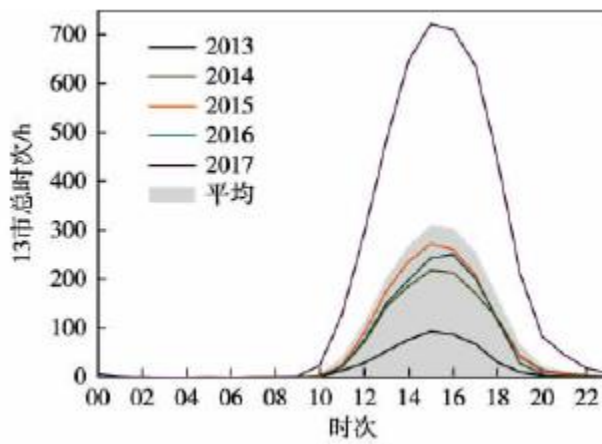


图7 2013—2017年小时臭氧质量浓度超标日分布

### 3 臭氧污染与气象要素的关系

气象条件在臭氧形成,沉降,传输和稀释中扮演着重要角色,也是造成臭氧质量浓度年月日变化的主要原因,观测结果也表明臭氧质量浓度变化与地面气温、相对湿度、风速、太阳辐射的波动有一定的联系。

#### 3.1 气温对臭氧污染的影响

太阳辐射强度对大气光化学反应具有重要影响,大部分站点缺少相应的太阳辐射,而大气温度的变化能较好的反映出太阳辐射强度的变化。统计分析不同温度范围所对应的 $O_3$ 超标率和 $O_3$ 平均质量浓度。如图8a所示,当温度高于 $20^{\circ}C$ , $O_3$ 超标率大于0,也就是说臭氧超标主要出现在 $20^{\circ}C$ 以上,且臭氧超标率与气温呈指数上升趋势;当温度高于 $25^{\circ}C$ 时, $O_3$ 超标率开始大幅上升,如气温在 $25\sim 30^{\circ}C$ 、 $30\sim 35^{\circ}C$ 、 $35^{\circ}C$ 以上的超标率分别为3.9%、9.9%以及14.2%。 $O_3$ 平均质量浓度的变化趋势随着温度的上升也增加,当温度高于 $25^{\circ}C$ 时, $O_3$ 平均质量浓度高于 $100.0\mu g\cdot m^{-3}$ ,在 $35^{\circ}C$ 以上区间达到最大值,为 $151.9\mu g\cdot m^{-3}$ 。

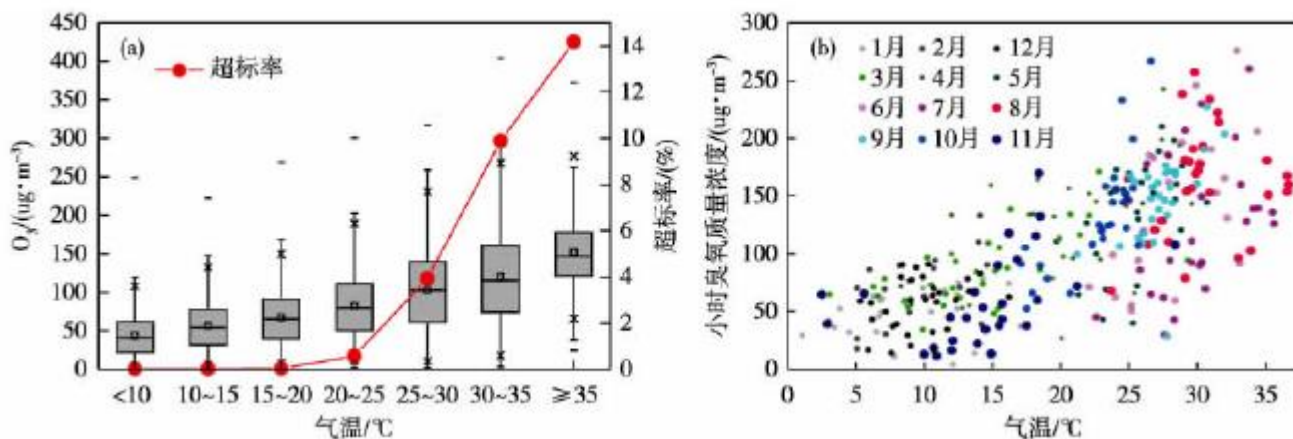


图 8(a) 不同温度区间臭氧质量浓度和超标率变化和 (b) 不同月份对应的气温和臭氧质量浓度散点图

以南京 2015 年 14 时的污染资料和气象要素资料统计不同月份臭氧质量浓度和气温的相关性(图 8b), 可以看到, 臭氧质量浓度与温度呈正相关性, Pearson 相关系数为 0.719, 在 0.01 水平上显著相关; 不同月份相关系数有差异, 春秋两季相关性较好, 最好的月份出现在 2 月和 10 月, 即臭氧污染开始上升或下降的过渡月份; 在 7—8 月和 12—01 月, 气温与臭氧质量浓度相关系数并不高, 其他因素的作用(如夏季多降水和冬季污染输送)也较为重要。

### 3.2 相对湿度对臭氧的影响

如图 9a 所示, 臭氧的平均质量浓度和超标率均随着相对湿度的增加先上升后下降的变化趋势, 在 30%~50% 区间相对较高, 平均质量浓度超过 100.0 μg·m<sup>-3</sup>, 当相对湿度进一步增大, 臭氧质量浓度和超标率呈现下降的趋势, 相对湿度高于 80% 时, O<sub>3</sub> 污染事件极低, 平均浓度不足 50 μg·m<sup>-3</sup>。这一结论与其他地区研究有一致性<sup>[18,19]</sup>。大气中的水汽通过影响太阳紫外辐射在光化学反应中扮演重要的角色, 有研究也指出, 前体物 NO<sub>x</sub> 和 CO 在相对湿度 60% 左右存在光化学反应强度临界值, 60% 之后随相对湿度的增加而减小<sup>[24]</sup>; 另外, 高相对湿度也是形成湿清除的重要指标, 因此高相对湿度将不利于 O<sub>3</sub> 质量浓度的积累。

仍以南京 2015 年 14 时的污染资料和气象要素资料统计不同气温区间下相对湿度与臭氧质量浓度的相关性(图 9b), 可以看到, 臭氧质量浓度与相对湿度存在一定的负相关性, Pearson 相关系数 -0.42, 在 0.01 水平上显著相关; 不同温度区间相关性有差异, 在 0.35~0.69 之间, 其中在 20 °C < T ≤ 25 °C 和 25 °C < T ≤ 30 °C 温度区间较为明显, 随着温度上升相关性下降。

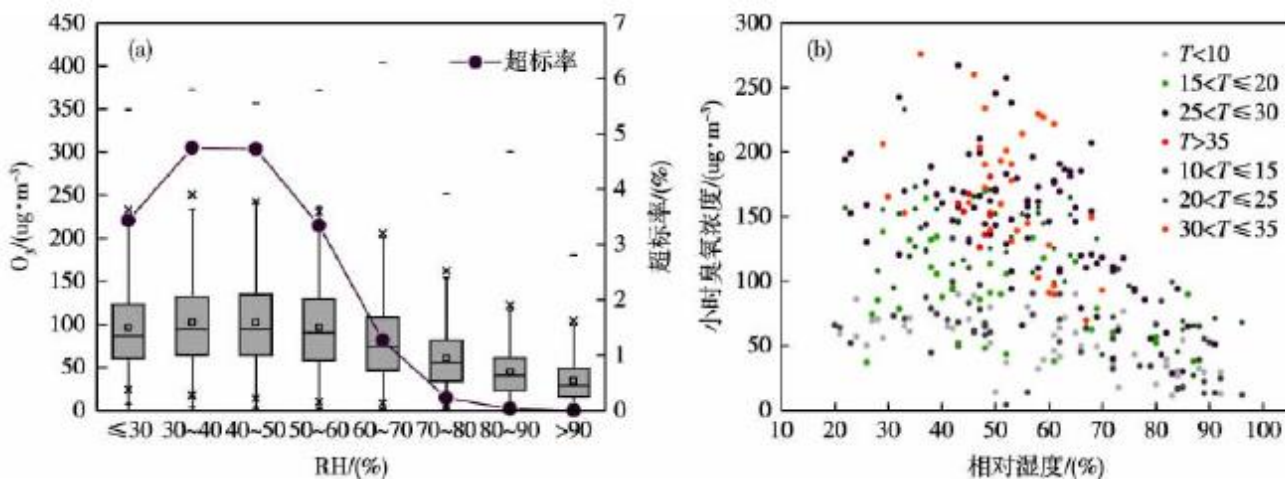


图 9 (a) 不同相对湿度区间臭氧浓度和超标率变化及 (b) 不同温度区间内相对湿度和臭氧浓度的散点图

### 3.3 风对臭氧的影响

风场对污染物的输送具有重要的影响,不同的风向决定了污染物输送的不同来向,而风速大小则能反映污染物的输送效率或者污染物的清除效率。较高的风速(相对小风来说),可以使得大气边界层高度增大,上下层臭氧混合,从而增加近地层臭氧质量浓度;另一方面,风速大,水平扩散作用又会使得臭氧质量浓度减少。当风速达到一定时,水平扩散作用占主导,臭氧浓度减少。由于地域结构和周边环境不同,各地风场对当地臭氧质量浓度的影响差异也较大,因此,本研究将对江苏 13 个城市分别进行分析,力求找到各地风向风速对臭氧超标的主要影响。

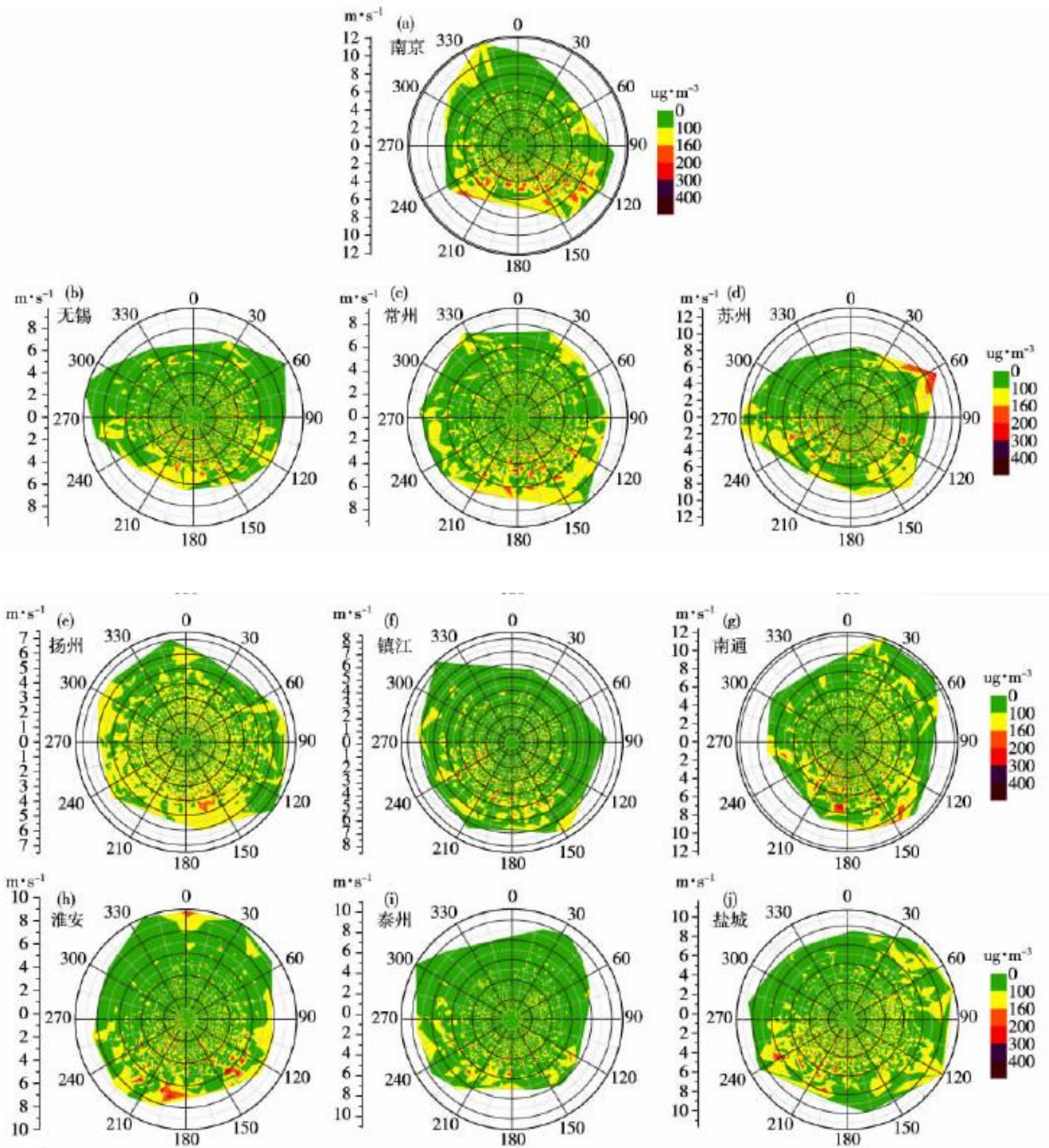
如图 10 所示,总体来看,江苏大部分城市在偏南风作用下,臭氧质量浓度易达到高值。当风速较小时,不同城市各风向上均有些高值出现,总体以偏南风居多,这与风速小利于污染物聚集反应有关;当风速增大,苏南的城市主要在东南风较大时,对应较高的值,苏北城市多在西南风向对应的较高值。不同城市臭氧质量浓度超标时对应的主导风向具体有所差异(表 1),若上游地区高污染,常携带排放的大量污染物造成本地臭氧质量浓度增加,如南京在 E-SW 方位对应高值,在 SE 方位较大时,由于输送影响,仍有较高值;而海上气团对本地污染物起到稀释减小作用,江苏沿海城市高臭氧质量浓度主要集中在西南风向和偏南风向,偏东气流下浓度总体较低。超标情况下,风速在  $8\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$  以内,多数在  $4\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$  内,部分城市在  $6\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$  左右,受输送影响也可造成臭氧超标。

表 1 臭氧质量浓度超标下 13 城市主导风向

城市	主风向	城市	主风向
南京	E-SE	扬州	E-SE
苏州	W, ESE-SSE	盐城	S-SW
无锡	NE-S	淮安	SSE-SW
常州	NE-E, SE-SSE	宿迁	SE, W, N
镇江	ENE-WSW	徐州	SE
泰州	ESE-S	连云港	ENE-E, SSW-W
南通	ESE-SSW		

## 4 前体物和颗粒物对臭氧的影响

臭氧与其颗粒物和前体物也有密切关系。如图 10(左)可以看到,颗粒物  $\text{PM}_{2.5}$ 、 $\text{PM}_{10}$  和  $\text{O}_3$  质量浓度日变化总体呈负相关,大气颗粒物浓度升高使得气溶胶光学厚度增加,抑制光化学活动光解反应,造成大气中氧化性自由基减少,导致地面臭氧浓度的降低<sup>[25, 26]</sup>。; $\text{NO}_2$  有相似的变化趋势,由于其主要来自于机动车的尾气排放,其日变化表现出较弱的双峰结构,分别于早上 08—09 时和 20—21 时前后,15 时左右出现谷值,傍晚前后又开始上升,这与早晚下班高峰有密切关系;由于夜间边界层高度降低,大气扩散能力变差,使得  $\text{NO}_2$  质量浓度处于较高浓度值。臭氧与前体物白天呈相反变化趋势,上午随着阳光增强和  $\text{NO}_2$  质量浓度的下降,臭氧生成反应占主导,浓度开始上升,其峰值对应  $\text{NO}_2$  的低值,峰值延后前体物大约 6~7h。下午随着阳光的减弱, $\text{NO}_2$  光解受到抑制,于是反应趋于缓慢,产物浓度相继下降。



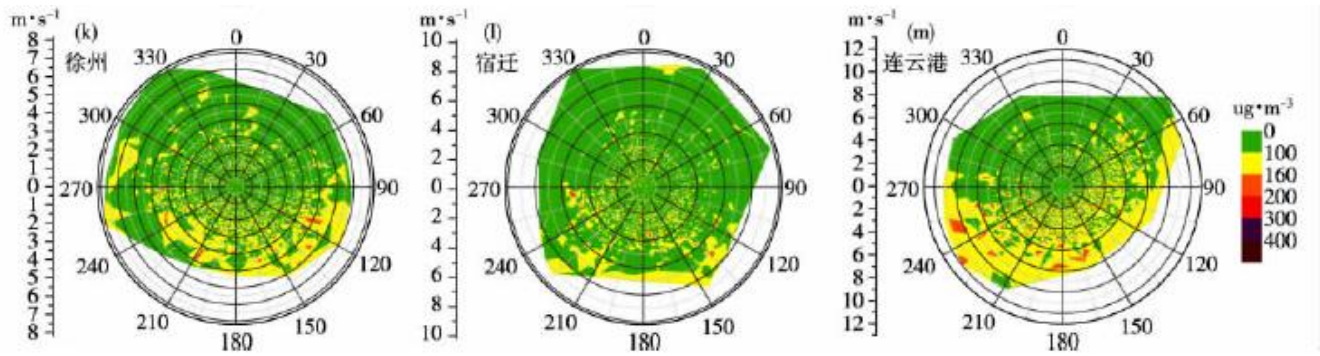


图 10 江苏省 13 个城市不同风向风速下对应的质量浓度均值分布

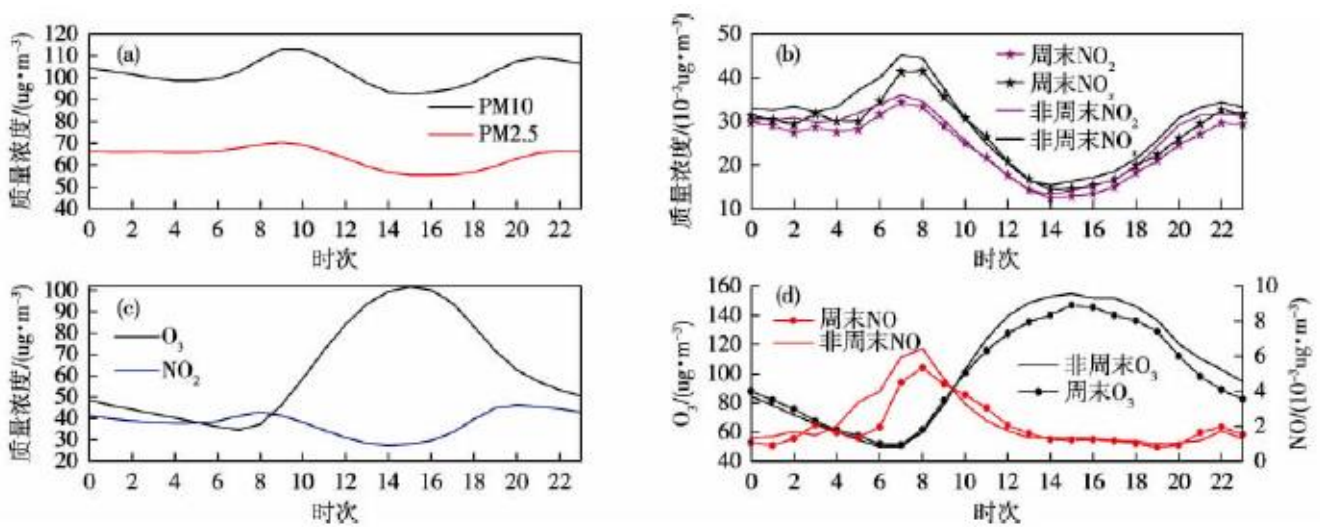


图 11  $O_3$  和前体物  $NO_2$ 、颗粒物的日变化 (a、c) 及周末与非周末  $NO_x$ 、 $NO_2$ 、 $NO$  和  $O_3$  的日变化 (b、d)

( $NO_x$  单位:  $10^{-3} \mu g \cdot m^{-3}$ ;  $O_3$ ,  $PM_{2.5}$  和  $PM_{10}$  单位:  $\mu g \cdot m^{-3}$ )

以淮安为例分别计算周末和非周末前体物 ( $NO_x$ 、 $NO_2$ 、 $NO$ ) 和臭氧质量浓度的日变化 (图 10 (右))。可以看到周末对应的小时质量浓度均低于非周末, 臭氧前体物  $NO$ , 周末较非周末平均下降 10.0%~25.1%, 特别是在早晚上下班高峰期差值增大 ( $NO$  这种差异不明显); 相应的, 白天臭氧的生成率在周末有所下降, 在午后臭氧质量浓度高值时段 (12—14 时) 下降 8.3%~8.9%。

## 5 结论

通过统计分析 2013—2017 年臭氧污染特征及其与气象条件的关系, 得到以下结论:

(1) 江苏臭氧质量浓度近年来总体是逐年增加的, 其分布特征由东部沿海城市大于西部内陆城市逐渐转为东西部城市差异不明显; 臭氧质量浓度 4—9 月处于较高水平, 梅雨期相对较低; 春夏季浓度较高, 冬季最低; 江苏各城市臭氧质量浓度日变化特征差异较小, 呈“单峰单谷”型, 臭氧滑动 8h 平均值较臭氧小时最大值平均推后 3~4h。

(2) 江苏的臭氧超标率南部明显高于北部, 以轻度污染等级为主, 近年来超标比例总体呈增长趋势, 且超标高值区逐步向北扩

展;5—8月臭氧超标现象最为常见,且夏季超标占一半以上,一天中15时前后超标概率最大;PM<sub>2.5</sub>对AQI不达标的贡献呈逐年下降趋势,而O<sub>3</sub>的贡献率则是总体呈现上升的趋势。

(3) 臭氧污染浓度与颗粒物和前体物NO<sub>x</sub>负相关,且存在“周末效应”。

(4) 风向、风速、温度和相对湿度等气象要素对臭氧质量浓度变化具有重要影响。江苏地区臭氧质量浓度总体与气温正相关,相对湿度负相关;气温超过20℃可出现臭氧超标现象,且超标率与气温呈指数上升趋势;相对湿度30%~50%区间超标率较高;高浓度臭氧多出现在风速低于4m·s<sup>-1</sup>下,各城市高浓度臭氧出现的主导风向略有差异,苏南的城市主要在东南风向对应较高的值,而苏北城市多在西南风向对应的较高臭氧质量浓度值。

#### 参考文献:

- [1]孔琴心,刘广仁,李桂忱. 近地面臭氧浓度变化及其对人体健康的可能影响. 气候与环境研究, 1999, 4(1):63-65.
- [2]王春乙,白月明,郑昌玲,等. CO<sub>2</sub>和O<sub>3</sub>浓度倍增对作物影响的研究进展. 气象学报, 2004, 62(5):875-881.
- [3]WU Rongrong, XIE Shaodong. Spatial distribution of ozone formation in China derived from emissions of speciated volatile organic compounds. Environ. Sci. Technol., 2017, 51(5):2574-2583.
- [4]陈琦,孙宏,陈晓东,等. 南京市臭氧短期暴露人群急性健康效应研究. 江苏预防医学, 2017, 28(4):366-368.
- [5]耿福海,刘琼,陈勇航. 近地面臭氧研究进展. 沙漠与绿洲气象, 2012, 6(6):8-14.
- [6]段玉森,张懿华,王东方,等. 我国部分城市臭氧污染时空分布特征分析. 环境监测管理与技术, 2011, 23(S1):34-39.
- [7]贾海鹰,李矛,程兵芬,等. 长沙市城区臭氧浓度特征研究. 环境科学与技术, 2017, 40(2):168-173.
- [8]崔蕾,倪长健,王超,等. 成都市O<sub>3</sub>浓度的时间变化特征及相关因子分析. 中国环境监测, 2015, (6):41-46.
- [9]蒋维楣,蔡晨霞,李昕. 城市低层大气臭氧生成的模拟研究. 气象科学, 2001, 21(2):154-161.
- [10]黄艳玲,陈慧娴. 佛山市臭氧浓度时间变化特征及主要影响因子. 环境监控与预警, 2017, 9(1):54-58.
- [11]蒋维楣,蔡晨霞,杨涛,等. 城市交通废气与低层大气臭氧形成和分布的数值模拟. 气象科学, 2001, 21(4):409-416.
- [12]廉丽姝,高军靖,束炯. 城市大气污染特征及其与气象因子的关系——以济南、青岛市为例. 环境污染与防治, 2011, 33(5):22-26.
- [13]贾海鹰,李矛,程兵芬,等. 长沙市城区臭氧浓度特征研究. 环境科学与技术, 2017, 40(2):168-173.
- [14]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. 中国科学:化学, 2010, 40(4):407-420.
- [15]易睿,王亚林,张殷俊,等. 长江三角洲地区城市臭氧污染特征与影响因素分析. 环境科学学报, 2015, 35(8):2370-2377.

- 
- [16]程念亮,李云婷,张大伟,等.2014年北京市城区臭氧超标日浓度特征及与气象条件的关系.环境科学,2016,37(6):2041-2051.
- [17]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.中国环境监测,2015,31(3):32-37.
- [18]梁碧玲,张丽,赖鑫,等.深圳市臭氧污染特征及其与气象条件的关系.气象与环境学报,2017,33(1):66-71.
- [19]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.中国环境科学,2017,37(3):813-820.
- [20]洪盛茂,焦荔,何曦,等.杭州市区大气臭氧浓度变化及气象要素影响.应用气象学报,2009,20(5):602-611.
- [21]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.生态环境学报,2011,20(8/9):1320-1325.
- [22]环境保护部.GB3095—2012环境空气质量标准.北京:中国环境科学出版社,2016.
- [23]环境保护部.HJ633—2012环境空气质量指数(AQI)技术规定(试行).北京:中国环境科学出版社,2016.
- [24]安俊琳,王跃思,孙扬.气象因素对北京臭氧的影响.生态环境学报,2009,18(3):944-951.
- [25]蔡彦枫,王体健,谢旻,等.南京地区大气颗粒物影响近地面臭氧的个例研究.气候与环境研究,2013,18(2):251-260.
- [26]邵平,辛金元,安俊琳,等.长三角工业区夏季近地层臭氧和颗粒物污染相互关系研究.大气科学,2017,41(3):618-628.