

DOI: 10.13671/j.hjkxxb.2017.0399

李霄阳,李思杰,刘鹏飞,等.2018.2016 年中国城市臭氧浓度的时空变化规律[J].环境科学学报,38(4):1263-1274

Li X Y, Li S J, Liu P F, et al. 2018. Spatial and temporal variations of ozone concentrations in China in 2016 [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 38(4): 1263-1274

2016 年中国城市臭氧浓度的时空变化规律

李霄阳^{1,2,3}, 李思杰², 刘鹏飞², 孔云峰^{1,2}, 宋宏权^{1,2,3,4,*}

1. 黄河中下游数字地理技术教育部重点实验室, 开封 475004

2. 河南大学环境与规划学院, 开封 475004

3. 河南大学城市大数据研究所, 开封 475004

4. 河南省大气污染综合防治与生态安全重点实验室, 开封 475004

收稿日期: 2017-08-23

修回日期: 2017-10-06

录用日期: 2017-10-06

摘要: 随着城市化进程的加快和机动车保有量的急剧增加, 导致我国很多地区臭氧(O_3) 前体物(挥发性有机物和氮氧化物) 排放量显著增加, 臭氧污染现象日益突出. 臭氧污染对人体健康、植被生长、生态环境等具有重要影响, 已成为学术界研究的热点. 为揭示全国尺度近地面臭氧的时空变化规律, 本文基于 2016 年中国 364 个城市的监测数据分析了中国城市 O_3 浓度的时空变化特征, 并采用 Global Moran's I 和 Getis-Ord G_i^* 指数, 揭示了 2016 年中国城市 O_3 污染的空间集聚和冷热点区域的时空特征. 结果表明, 在全国尺度上, 2016 年中国城市年均 O_3 浓度为 $100.2 \mu g \cdot m^{-3}$, 北方城市和南方城市 O_3 浓度分别具有显著的倒“V”和“M”型月变化规律, 且呈现夏季高、春秋居中、冬季最低的特征; 中国城市 O_3 浓度具有显著的空间分异规律, 中部和东部是 O_3 污染的高发区, 西部地区 and 黑龙江省的 O_3 污染处于较低水平; 中国城市 O_3 浓度具有显著的集聚性特征, 且呈现 1—5 月由南向北而 6—12 月由北向南扩展的年周期循环特征, 热点地区主要集中在华北、华中和华东地区.

关键词: 中国城市; 大气污染; 空气质量; 臭氧浓度; 时空特征

文章编号: 0253-2468(2018) 04-1263-12

中图分类号: X512

文献标识码: A

Spatial and temporal variations of ozone concentrations in China in 2016

LI Xiaoyang^{1,2,3}, LI Sijie², LIU Pengfei², KONG Yunfeng^{1,2}, SONG Hongquan^{1,2,3,4,*}

1. Key Laboratory of Geospatial Technology for the Middle and Lower Yellow River Regions, Ministry of Education, Kaifeng 475004

2. College of Environment and Planning, Henan University, Kaifeng 475004

3. Institute of Urban Big Data, Henan University, Kaifeng 475004

4. Henan Key Laboratory of Integrated Air Pollution Control and Ecological Security, Kaifeng 475004

Received 23 August 2017;

received in revised form 6 October 2017;

accepted 6 October 2017

Abstract: Near-ground ozone (O_3) is one of the most hazardous air pollutants as it harms both human health and plant productivity. Ozone precursor emissions have increased significantly in most parts of China, following the acceleration of the urbanization process and the rapid increase in motor vehicle ownership. The ozone pollution has become increasingly prominent in China. In this study, we investigated spatial and temporal variations of O_3 concentrations and its agglomeration in China using indexes of Moran's I and Getis-Ord G_i^* based on observed ozone concentration datasets from 364 cities in 2016. China's O_3 pollution was particularly serious and covered most parts of China in 2016. The average O_3 concentration was $100.2 \mu g \cdot m^{-3}$ at the regional scale. Monthly O_3 concentrations in northern and southern China showed significant variations and with patterns of inverted “V” and “M”, respectively. In regions of northern and southern China, the O_3 concentration is high in summer and is low in winter. O_3 concentration had large spatial differences in China. The O_3 pollution was mainly distributed in central and eastern China. In regions of western China and Heilongjiang, however, the O_3 concentration was at low levels. The O_3 concentration has significant characteristics of agglomeration in China. Hot spots were mainly distributed in northern, central, and eastern China. Results of this study could provide scientific basis for air quality management in China.

基金项目: 国家自然科学基金(No.41401107); 河南大学科技成果转化项目(No.2015YBZH001); 河南省政府决策研究课题(No.2016B088); 河南省基础前沿与技术研究项目(No.162300410132)

Supported by the National Natural Science Foundation of China (No.41401107), the Research Program of Henan University (No.2015YBZH001), the Research Program on Decision-making of Government in Henan Province (No.2016B088) and the Research Program on Basic Science and Technology of Henan Province (No.162300410132)

作者简介: 李霄阳(1992 —), 女, E-mail: xyli1027@gmail.com; * **责任作者,** E-mail: hqsong@henu.edu.cn

Biography: LI Xiaoyang(1992 —), female, E-mail: xyli1027@gmail.com; * **Corresponding author,** E-mail: hqsong@henu.edu.cn

Keywords: China; air pollution; air quality; ozone concentration; spatial-temporal variations

1 引言 (Introduction)

近地面臭氧(O_3)是由少量天然源和大量人为源造成的氮氧化物(NO_x)和挥发性有机物(VOCs),在一定光照条件下经过一系列复杂的光化学反应产生(唐孝炎等,2016;黄亮,2014;秦瑜等,2004).随着经济的快速发展和城镇化进程的日益加快,我国城市臭氧浓度急剧上升,很多城市的臭氧浓度存在超标问题,已成为继 $PM_{2.5}$ 后影响城市空气质量的一种重要二次污染物.近地面臭氧污染可危害人体健康与植被生长(潘光等,2013;张远航等,1998),同时可加速颗粒物等污染物的形成,进而影响重污染天气发生的频率和强度(程麟钧等,2017).

受排放源强度、位置及气象条件等诸多因素影响(朱毓秀等,1994),臭氧污染呈明显的区域化特点.研究近地面臭氧浓度的时空特征,可进一步深入了解我国臭氧污染的特点与成因机制,相关学者利用观测(王雪梅等,2003; Tang *et al.*, 2012; 王占山等,2014)、遥感(Chen *et al.*, 2014; Jin *et al.*, 2015; 单源源等,2016)与模式模拟(Fu *et al.*, 2012; Hu *et al.*, 2016)等数据与方法,研究了我国臭氧污染的时空格局及机理.以上研究主要集中在单个城市或污染较为严重的京津冀、珠三角、长三角等地区,由于近地面观测数据的缺乏,利用监测数据对区域性与全国尺度 O_3 浓度时空特征的研究相对较少(段玉森等,2011; Wang *et al.*, 2017; 李礼等,2017).

自2013年以来,国家环境保护部在300多个城市布设了1497个国控监测站点,开展包括 SO_2 、 NO_2 、 PM_{10} 、 $PM_{2.5}$ 、CO和 O_3 等6种空气污染物的常规监测,为在区域与全国尺度利用近地面连续监测数据开展 O_3 污染时空特征研究提供了条件.本文选取2016年具有完整 O_3 浓度监测数据的364个城市,建立空间数据统计模型对中国主要城市的 O_3 污染进行评价,以揭示中国城市 O_3 浓度的时空变化与空间集聚特征.此研究对于从整体上了解近地面臭氧的时空特征与时空演化规律具有重要参考价值.

2 数据来源与方法 (Materials and methods)

2.1 数据来源及评价标准

本文的研究区域为中国大陆(不包括台湾、香港和澳门),数据为2016年中国环境监测总站发布

的364个城市 O_3 浓度监测日值.根据《GB3095—2012 环境空气质量标准》(国家环境保护部,2012),本文的 O_3 浓度日均值指日最大8 h平均值(连续8 h O_3 平均浓度的算术平均值),月均值指一个日历月内各日最大8 h平均浓度的算术平均值,季均值指一个日历季内各日最大8 h平均浓度的算术平均值,年均值指一个历年内各日最大8 h平均浓度的算术平均值.春季为3—5月(92 d),夏季为6—8月(92 d),秋季为9—11月(91 d),冬季为12、1和2月(91 d). O_3 浓度限值根据功能区不同具有不同的标准,一类环境功能区为自然保护区、风景名胜区和需要特殊保护的区域, O_3 浓度日最大8 h平均限值为 $100 \mu g \cdot m^{-3}$;二类环境功能区为居住区、商业交通居民混合区、文化区、工业区和农村等地区, O_3 浓度日最大8 h平均限值为 $160 \mu g \cdot m^{-3}$.我国新实施的《HJ663—2013 环境空气质量评价技术规范(试行)》(国家环境保护部,2013)要求,“日评价”以各城市 O_3 日最大8 h平均浓度判定每日达标情况,“年评价”以各城市 O_3 日最大8 h滑动平均值的第90百分位数判定年达标情况.

根据《GB3095—2012 环境空气质量标准》和《HJ663—2013 环境空气质量评价技术规范(试行)》的 O_3 浓度数据规范与标准,本文对 O_3 数据的有效性进行筛选:在计算年均值时,若某监测点全年数据少于324个 O_3 日最大8 h平均值,则认为该监测点全年数据无效并将其剔除;计算月均值时,若监测点当月数据少于27个 O_3 日最大8 h平均值(2月份少于25个 O_3 日最大8 h平均值),则认为当月数据无效并剔除(国家环境保护部,2012; 2013).本文讨论的超标率是指在一定时段内, O_3 浓度评价为超标的百分比.

为便于对结果的讨论与分析,基于地理、气候、经济等多方面因素的考虑,本文根据中国地理区域划分方法(孙继琼,2009),将全国划分为东北地区、华北地区、华中地区、华东地区、华南地区、西北地区、西南地区等七大区域.

2.2 O_3 浓度空间集聚分析方法

地理学第一定律认为任何事物在空间上都是相关联的,距离越近相关性越强(Tobler,1970),即空间自相关(Moran,1948; Getis,1991). O_3 的空间分布受污染源位置、光照、温度、湿度、风速、风向等因素影响,其空间格局呈明显的相互依赖性,本文利

用空间自相关理论与方法,分析和解释 O_3 浓度的空间集聚和变化规律(周天墨等,2013)。

2.2.1 Global Moran's I 指数 由于近地面 O_3 在空间上连续分布,同时全国各城市的光化学反应前体物在大气中相互影响,利用 Global Moran 指数 I 来检验 O_3 在全国尺度的空间自相关性(Michael *et al.*, 1993)。计算公式如下:

$$I = \frac{n}{S_0} \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} Z_i Z_j}{\sum_{i=1}^n Z_i^2} \quad (1)$$

式中, Z_i 是要素 i 的属性与其平均值 $(x_i - \bar{X})$ 的偏差; w_{ij} 是要素 i 和 j 之间的空间权重; n 为要素总数; S_0 是所有空间权重的聚合,计算公式如下:

$$S_0 = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} \quad (2)$$

标准化统计量 Z 检验的计算公式为:

$$Z_I = \frac{I - E[I]}{\sqrt{V[I]}} \quad (3)$$

$$E[I] = -1/(n-1) \quad (4)$$

$$V[I] = E[I^2] - E[I]^2 \quad (5)$$

通常, I 介于 $-1.0 \sim 1.0$ 之间,当 $I \in [-1, 0)$ 时为空间负相关,其值越接近 -1 ,说明空间单元之间的属性值差异越大;当 $I = 0$ 时则呈随机性空间分布,其值越接近 0 ,说明空间单元之间的属性值不相关;当 $I \in (0, 1]$ 时为空间正相关,其值越接近 1 ,说明空间单元之间的属性值相关性越明显。

2.2.2 基于 Getis-Ord G_i^* 的 O_3 浓度热点分析 Global Moran's I 指数虽然从整体上可反映 O_3 浓度的空间相关性,但无法反映某城市与其他城市间的相关关系及相关程度.在局部区域选取 Getis-Ord G_i^* 指数(Ord *et al.*, 1995),通过分析局部区域信息可判断区域内的空间异质性,确定 O_3 浓度的冷点与热点区域,反映某区域与相邻区域的关联程度.计算公式如下:

$$G_i^* = \frac{\sum_{j=1}^n w_{ij} x_j - \bar{X} \sum_{j=1}^n w_{ij}}{\sqrt{\frac{[n \sum_{j=1}^n w_{ij}^2 - (\sum_{j=1}^n w_{ij})^2]}{n-1}}} \quad (6)$$

式中, x_j 是要素 j 的属性值, w_{ij} 是要素 i 和 j 之间的空间权重矩阵, n 为要素总数,且:

$$\bar{X} = \frac{\sum_{j=1}^n x_j}{n} \quad (7)$$

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n x_j^2}{n} - (\bar{X})^2} \quad (8)$$

其中, G_i^* 统计是 Z 得分,若 $Z(G_i^*)$ 显著且为正,表明位置 i 周围的值高于均值,且 $Z(G_i^*)$ 得分越高,高值的聚类就越紧密(热点区);反之,若 $Z(G_i^*)$ 显著且为负,表明位置 i 周围的值低于均值,且 $Z(G_i^*)$ 得分越低,低值的聚类就越紧密(冷点区)。本文通过 ArcGIS 10.3 Desktop 的 Hot Spot Analysis (Getis-Ord G_i^*) 工具,选取 FIXED_DISTANCE_BAND 的空间关系概念化方式,分别对 2016 年中国 364 个城市 O_3 浓度的年度、季度和月度数据进行热点分析。

3 2016 年中国城市 O_3 浓度总体评价 (Overall evaluation of O_3 concentration in China in 2016)

3.1 中国城市 O_3 浓度年评价

2016 年中国 364 个城市 O_3 日最大 8 h 第 90 百分位浓度空间分布如图 1 所示,年均浓度为 $82 \sim 259 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$,所有城市年均浓度为 $158 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 。根据二类环境功能区统计($160 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$),共有 164 个城市 O_3 年均浓度超标,占 45.1%。超标城市主要集中在华东地区北部、华北地区、华中地区北部、东北地区南部、西北地区东部部分城市、川渝地区及珠江三角洲地区。若按一类环境功能区统计($100 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$),共有 354 个城市超标,占 97.3%,仅玉树州、六盘水、黑河、鸡西、大兴安岭地区、甘孜州、阿里地区、迪庆州、那曲地区、双鸭山等 10 个城市达标。

3.2 中国城市 O_3 浓度日评价

依据一级标准限值($100 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$),中国城市 O_3 浓度日超标率为 2.19%~90.44%,平均超标率为 44.65%。超标率在 50% 以上的城市有 157 个,其中,超标率最高的 10 个城市为:海北州(90.44%)、果洛州(80.05%)、阿拉善盟(78.14%)、海南州(71.98%)、嘉峪关(70.49%)、菏泽(68.03%)、胶州(67.49%)、朔州(66.94%)、张掖(66.67%)、胶南(66.12%)。若按二级标准限值($160 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$),则中国城市 O_3 浓度日超标率为 0~36.61%,主要集中在华北地区东南部、华东地区北部和东部、华中地区北部及西北地区东南部,其中,泰安、章丘、宜兴、德州、东营、成都等 27 个城市的超标率较高,达 25% 以上。

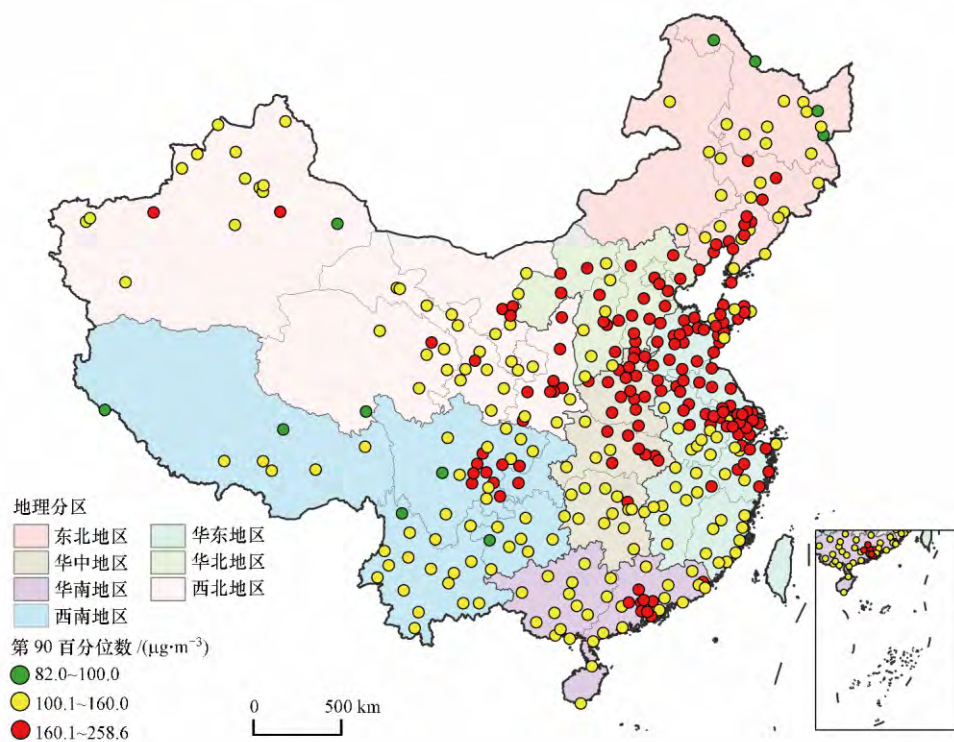


图1 2016年中国城市O₃日最大8 h浓度第90百分位空间分布

Fig.1 Spatial distribution of Chinese cities' 90th percentile of maximum daily 8-hour O₃ concentrations in 2016

4 2016年中国城市O₃浓度时空特征(Spatial and temporal variations of O₃ concentration in China in 2016)

4.1 时间变化趋势

本文将全国城市视为二类环境功能区,即按O₃浓度日最大8 h限值160 μg·m⁻³进行讨论分析.2016年中国364个城市O₃年均浓度为100.2 μg·m⁻³,有196个城市的年均浓度值大于100.2 μg·m⁻³,最高的10座城市为宜兴(140.87 μg·m⁻³)、章丘(136.73 μg·m⁻³)、海北州(133.15 μg·m⁻³)、泰安(132.80 μg·m⁻³)、胶州(132.59 μg·m⁻³)、菏泽(131.78 μg·m⁻³)、东营(131.10 μg·m⁻³)、湖州(130.5 μg·m⁻³)、胶南(130.04 μg·m⁻³)、平度(128.47 μg·m⁻³).高污染地区主要集中在华东与华北地区,O₃浓度年均值分别为106.43和104.27 μg·m⁻³,华中(103.78 μg·m⁻³)与西北地区(102.06 μg·m⁻³)次之,华南、东北与西南地区O₃浓度较小,年均O₃浓度分别为94.53、92.76和90.66 μg·m⁻³.

4.1.1 季节性变化规律 我国城市O₃污染具有明显的季节性特征(图2a),除冬季外,其他3个季节均有O₃污染现象.夏季全国气温较高,受太阳辐射的影响,氮氧化物和挥发性有机物的光化学反应加

剧(陈世俭等,2005;徐家骝等,1994),导致夏季O₃浓度较高(121.83 μg·m⁻³).东北(图2b)、华北(图2c)和西北(图2d)地区O₃浓度均呈现夏高冬低、春秋居中的季节性变化规律,而华东(图2e)、华中(图2f)和西南(图2h)地区O₃浓度则呈现春秋高、夏季减弱、冬季最低的季节性规律.华南地区(图2g)城市O₃浓度超标时间跨度大,全年均可能发生O₃污染.

4.1.2 月度变化规律 气象条件和污染物排放强度具有明显的月际变化特征且可直接影响O₃浓度.5—10月为中国城市O₃污染高发时段,且不同地区O₃污染时间跨度和峰值出现时间具有明显差异.东北(图2b)、华北(图2c)和西北地区(图2d)城市月均O₃浓度呈倒“V”型变化特征.东北地区1—5月O₃浓度呈逐渐上升趋势,6—12月逐渐下降,峰值出现在5月(192.15 μg·m⁻³).华北与西北地区1—6月O₃浓度呈上升趋势,7—12月呈下降趋势,峰值出现在6月,分别为204.00和153.58 μg·m⁻³.受南方梅雨季节的影响,华东、华中、西南和华南地区城市O₃浓度月变化基本呈“M”型规律.华东地区(图2e)1—5月O₃浓度呈稳定上升趋势,5月出现第1个峰值(174.88 μg·m⁻³),6—8月O₃浓度略有降低但基本平稳,9月出现第2个峰值(196.20 μg·m⁻³).华中

地区(图 2f) 1—6 月 O_3 浓度逐步上升, 6 月出现第 1 个峰值($166.79 \mu g \cdot m^{-3}$), 随后下降并上升至 9 月出现第 2 个峰值($199.37 \mu g \cdot m^{-3}$), 10—12 月快速下降. 西南地区 1—5 月 O_3 浓度呈逐渐上升趋势并于 5

月出现最大值($143.85 \mu g \cdot m^{-3}$), 之后逐步下降, 在 8 月出现第 2 个峰值($139.81 \mu g \cdot m^{-3}$). 华南地区全年基本平稳, 月均 O_3 浓度波动较小, 两个峰值分别出现在 5 月和 9 月.

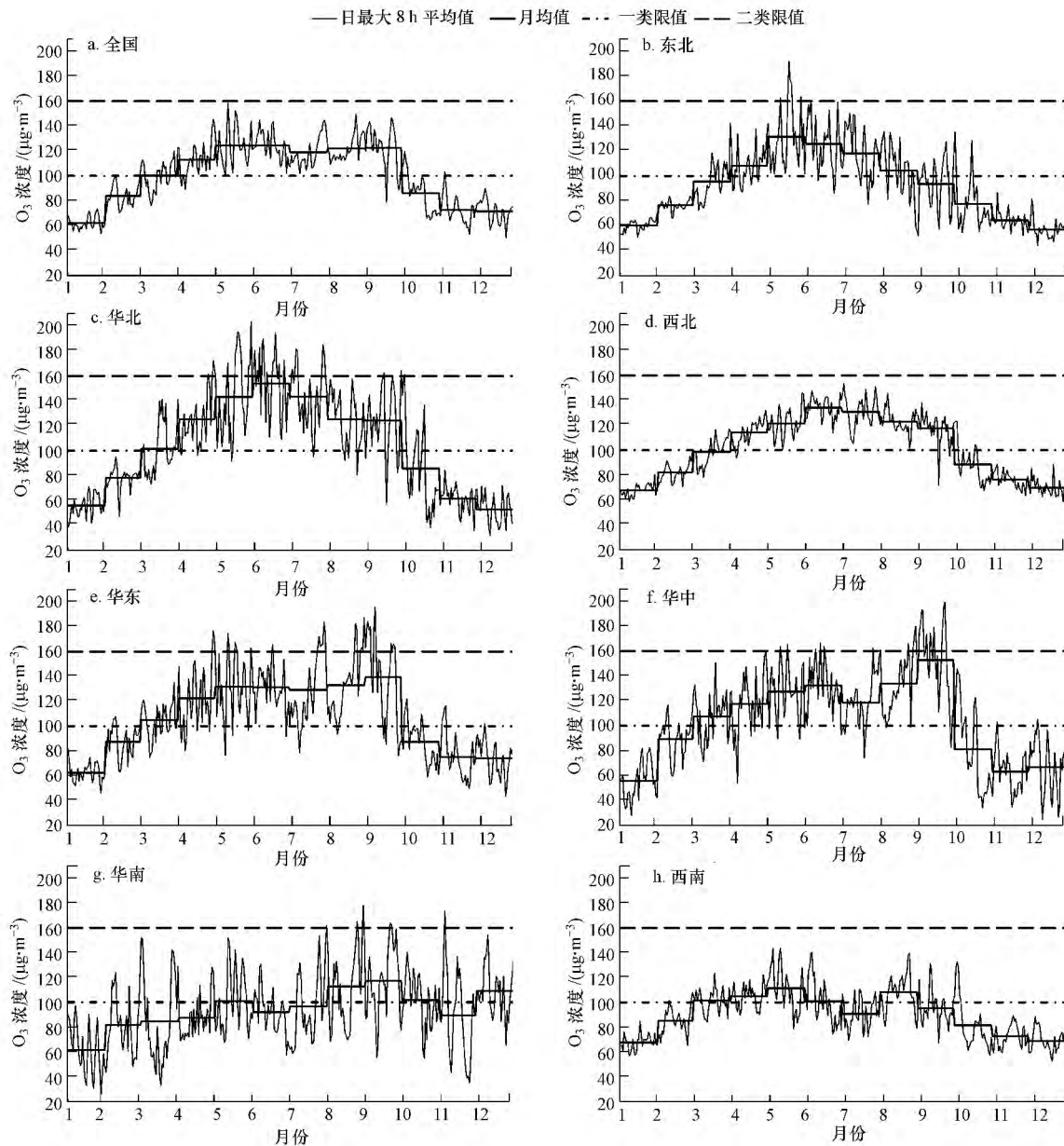


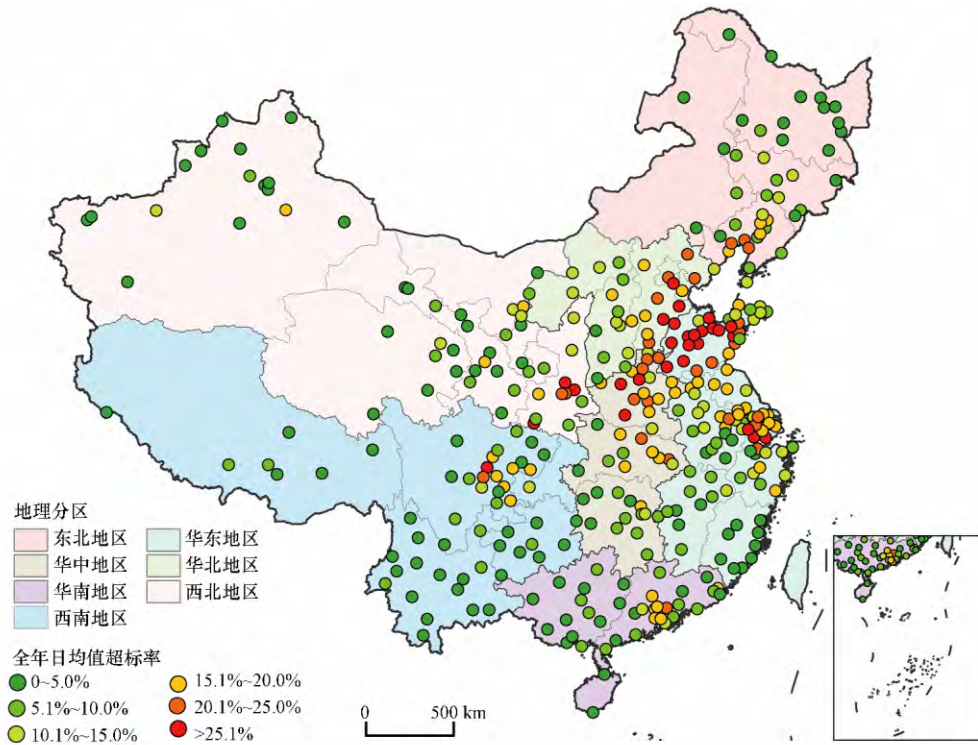
图 2 2016 年中国城市 O_3 浓度时间变化规律

Fig.2 Trends in daily and monthly ozone concentrations of Chinese cities in 2016

4.2 空间分异特征

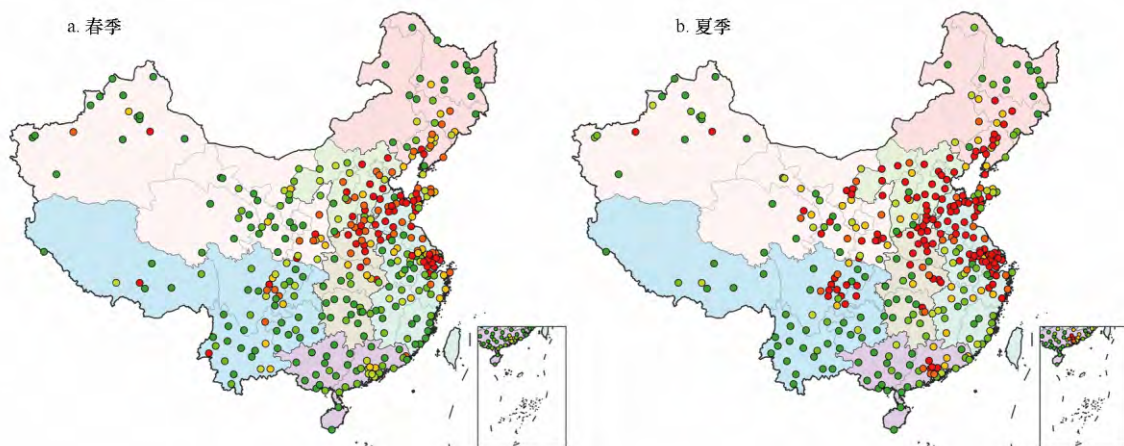
4.2.1 2016 年 O_3 浓度空间分异规律 按 O_3 浓度全年日均值超标率统计, 全国 364 个城市 O_3 浓度超标率为 0~36.61%. 其中, 华中地区中北部和华东地区的泰安、章丘、宜兴、德州、东营等 14 个城市日最大 8 h O_3 浓度超标天数大于 100 d. 150 个城市超标 36~

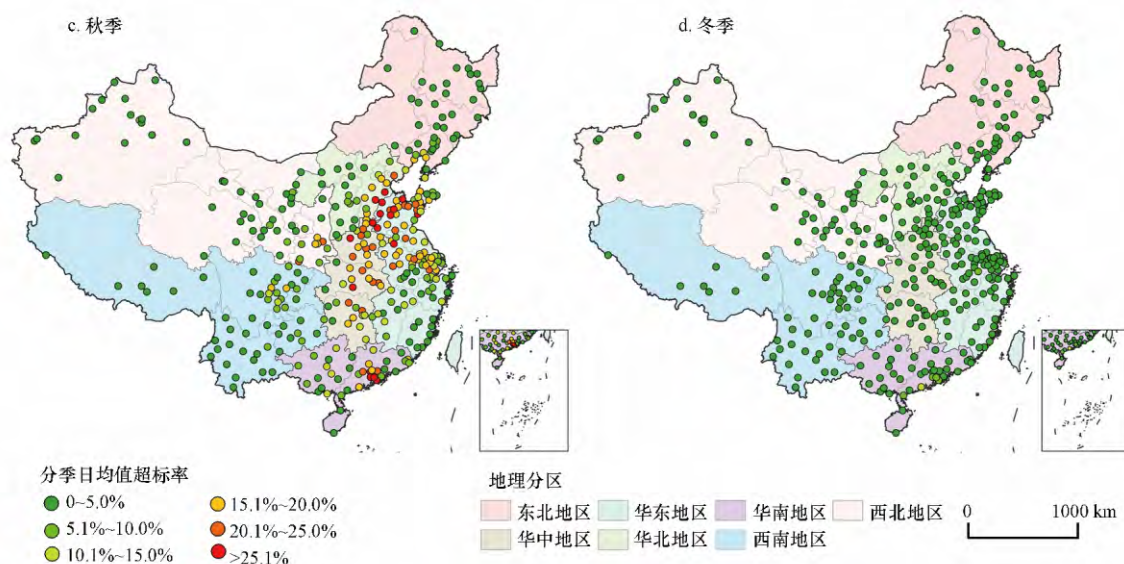
100 d, 主要集中在东北地区中南部、华北地区大部、华中地区中北部、华东地区中北部、华南地区东南部的珠三角地区和西北地区的中东部. 西南地区的楚雄州、毕节、林芝等 12 个城市的 O_3 浓度不超标 (图 3).

图3 中国城市 O_3 浓度日均值超标率空间分布Fig.3 Spatial distribution of daily average exceeding rate of O_3 concentrations in China

4.2.2 O_3 浓度季节性空间变化规律 按季节统计全国城市的 O_3 日最大 8 h 平均值超标率, O_3 浓度具有明显的季节性特征(图 4). 夏季 364 个城市日最大 8 h O_3 浓度超标率范围为 0~70.33%. 超标率 50% 以上的 27 个城市主要集中在华北和山东半岛, 其中, 山东半岛占 13 个; 超标率 25% 以上的 140 个城市主要分布在东北地区南部、华北地区大部、华中地区北部、华东地区北部、西北地区东部、珠三角及成渝地区; 超标率 10% 以上的 218 个城市遍布整个

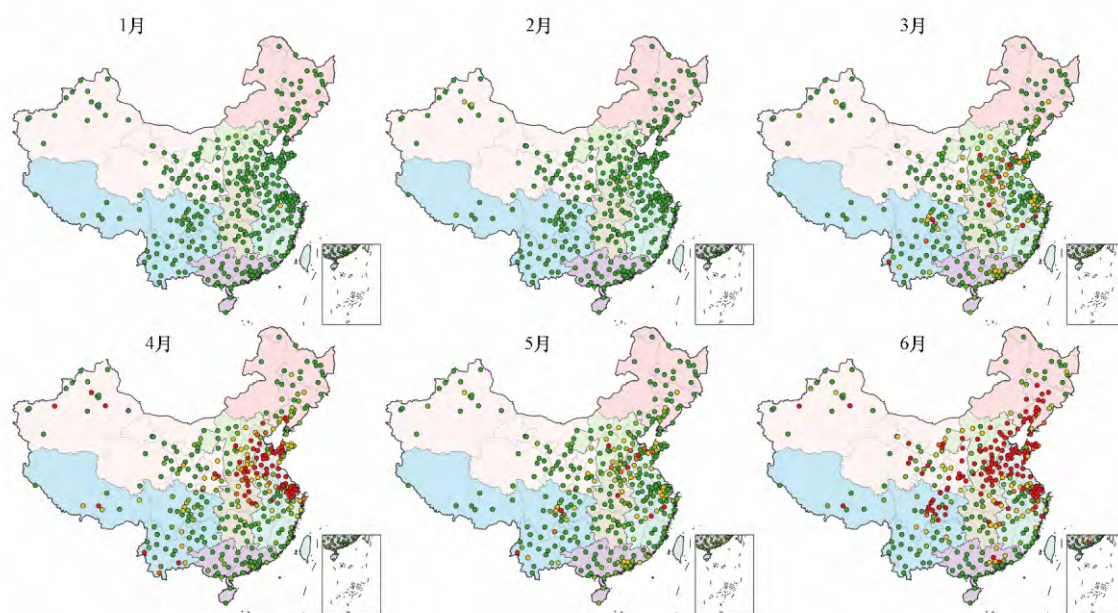
中国的中部和东部(图 4b). 春季 O_3 浓度超标率(0~43.48%) 小于夏季, 超标 25% 以上的 67 个城市主要集中在华北地区、华中地区北部、华东地区中北部及川渝地区(图 4a). 秋季 O_3 污染程度和范围均小于春季(0~36.26%), O_3 污染城市较春季南移, 其中, 超标率 25% 以上的 17 个城市主要集中在华东地区北部和珠三角地区(图 4c). 冬季 O_3 浓度超标率范围为 0~7.69%, 仅珠三角地区的 5 个城市超标率大于 5%, 全国大部分城市均无 O_3 污染现象(图 4d).



图 4 中国城市 O_3 浓度日均值超标率季节性空间分布Fig.4 Seasonal variations of daily average exceeding rates of O_3 concentrations in China

4.2.3 O_3 浓度月度空间变化规律 通过分析 2016 年全国 364 个城市逐月 O_3 浓度的空间分布(图 5), 可知 1 月和 2 月 O_3 污染范围较小, O_3 浓度平均超标率分别为 0.2% 和 0.5%. O_3 浓度超标率在 3 月、4 月和 5 月逐步上升, 超标率分别为 5.3%、12.3% 和 20.4%, 其中, 华北地区南部、华东地区中北部、华中地区北部、西南地区中南部、华南地区南部和西北地区北部的 O_3 污染范围逐步扩大. O_3 污染在 6 月范围最广, O_3 浓度平均超标率达 23.0%, 超标率在 25% 以上的城市有 137 个, 主要集中在东北地区南部、华

北地区大部、华中地区北部、华东地区中北部、西南的川渝地区、西北地区东部和西部的新疆地区. O_3 浓度平均超标率在 7 月、8 月和 9 月分别为 20.0%、18.9% 和 21.3%, O_3 污染范围开始逐步缩小并由北向南转移, 其中, 东北地区南部、华北地区北部、西北地区中东部、西南地区的污染范围持续缩小, 而华中地区、华东地区和华南地区南部污染范围不断扩大. O_3 浓度平均超标率在 10 月、11 月和 12 月分别为 4.1%、1.3% 和 0.8%, 污染范围较 9 月急剧缩小且主要集中在华南地区南部.



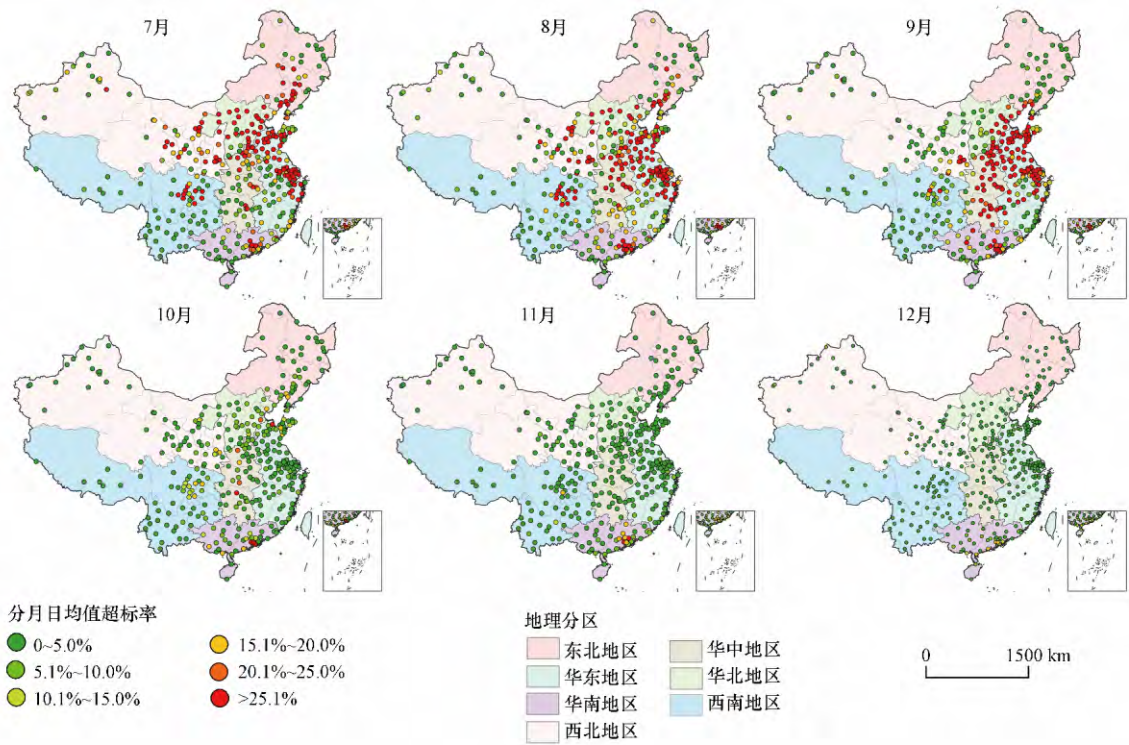


图5 中国城市 O₃ 浓度日均值超标率月度空间分布

Fig.5 Monthly spatial distributions of daily average exceeding rates of O₃ concentrations in China

5 2016 年中国城市 O₃ 浓度空间集聚特征(Spatial agglomeration of China's O₃ concentrations in 2016)

5.1 O₃ 浓度空间自相关检验

运用 ArcGIS 10.3 Desktop 的 Spatial Autocorrelation Model 工具,分别对 2016 年中国 364 个城市 O₃ 浓度的年度、季度、月度数据进行空间自相关检验.通常情况下,分析要素处于 [-2.58,2.58] 的置信区间内,反映置信度为 99% 的统计显著性;分析要素处于 [-1.96,1.96] 的置信区间内,反映置信度为 95% 的统计显著性;分析要素处于 [-1.65,1.65] 的置信区间内,反映置信度为 90% 的统计显著性. $Z(I) > 2.58$ 表明 O₃ 浓度空间单元间具有正空间自相关性; $-2.58 < Z(I) < 2.58$ 表明 O₃ 浓度的空间自相关性不明显; $Z(I) < -2.58$ 则表示 O₃ 浓度空间单元存在负的空间自相关性.表 1 与表 2 结果显示, Moran's I 指数均为正值,且 $Z(I) > 2.58$,均通过 1% 水平的显著性检验,表明中国城市 O₃ 浓度存在显著的空间正相关.

表 1 2016 年中国城市 O₃ 浓度季度空间自相关指数

Table 1 Spatial autocorrelation index of seasonal average O₃ concentrations of Chinese cities in 2016

季节	Moran's I	Z(I)
春	0.27	43.58
夏	0.31	49.33
秋	0.16	26.06
冬	0.09	15.21
全年	0.25	25.68

表 2 2016 年中国城市 O₃ 浓度月度空间自相关指数

Table 2 Spatial autocorrelation index of monthly average O₃ concentrations of Chinese cities in 2016

月份	Moran's I	Z(I)
1	0.05	8.45
2	0.04	6.06
3	0.10	15.85
4	0.31	48.45
5	0.32	50.56
6	0.38	59.92
7	0.29	46.51
8	0.19	30.32
9	0.38	59.64
10	0.09	14.23
11	0.09	15.31
12	0.26	41.75

5.2 2016 年 O_3 浓度空间集聚特征

全年的 $Z(I)$ 指数为 25.68, 表明 O_3 浓度在空间上呈集聚态势. 图 6 显示, 热点主要集中在华北地区、东北地区南部、西北地区东部、华中地区北部及华东地区的中部和北部; 冷点主要集中在新疆北部、东北地区北部、西南地区中南部、华南地区;

东北地区中部、西北地区中南部、华中地区中部、华东地区南部及西南地区北部的分散监测城市 O_3 空间自相关性不明显. 由此表明, O_3 浓度在华北地区、华中地区北部、东部沿海地区形成了较为稳定和持续的污染城市群.

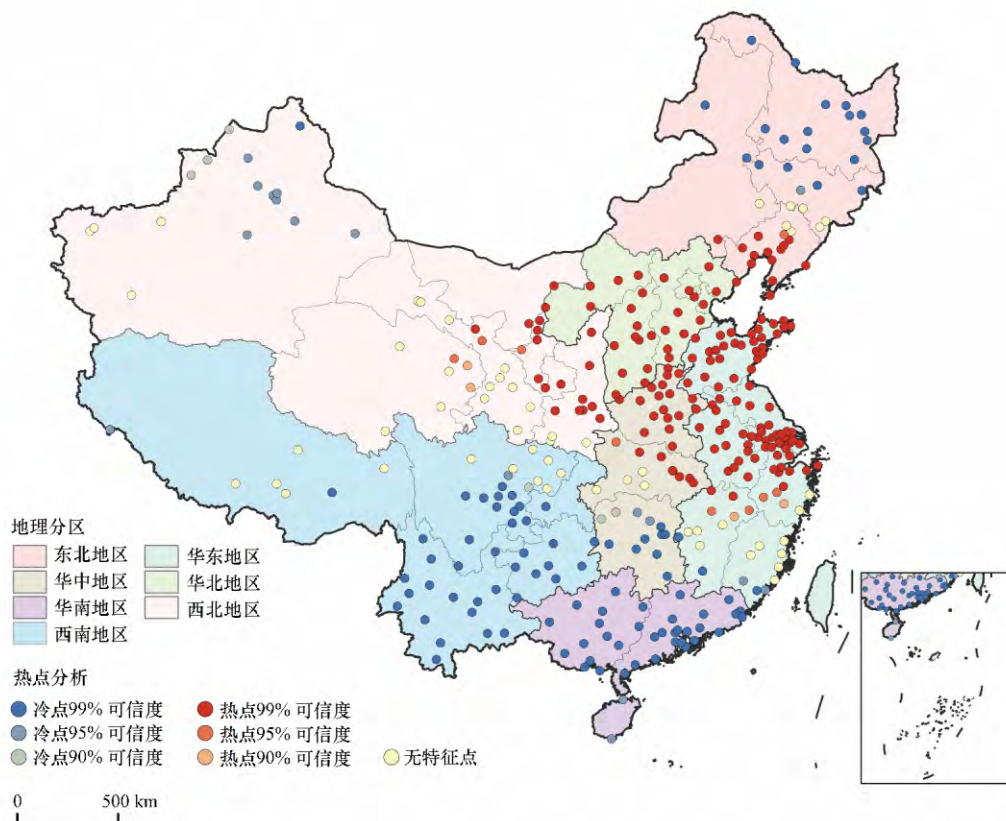


图 6 2016 年中国城市 O_3 浓度空间集聚

Fig.6 Spatial agglomeration of Chinese cities' annual O_3 concentrations in 2016

5.3 O_3 浓度季节性空间集聚特征

气象条件尤其是气温对近地面 O_3 浓度具有重要影响, 不同季节由于太阳辐射强度的变化导致 O_3 浓度集聚性具有较大的季节性差异, 并呈现周期性变化. 春季热点城市主要分布在东北地区南部、华北地区、西北地区东部、华中地区北部及华东地区北部(图 7a); 夏季热点城市分布范围进一步扩大, 且由东部沿海向内陆地区扩展, 表明夏季由于太阳辐射引起的 O_3 前体物光化学反应增强(图 7b); 秋季热点城市范围急剧缩小且向东南沿海方向扩散, 主要集中在华北地区、华东地区、华中地区北部及华南地区南部(图 7c); 冬季热点城市范围进一步缩小并继续向南扩展, 主要集中在西南地区南部部分城

市、华东地区南部和华南地区(图 7d). 春季(图 7a)与夏季(图 7b)的冷点区域主要集中在西南与华南地区; 秋季冷点城市集中在西南地区、东北地区及北疆地区(图 7c); 冬季冷点城市主要集中在东北地区、华北地区、新疆北部、华中地区北部及华东地区北部(图 7d). 除西北地区北部和东北地区北部部分城市外, 全国没有稳定而持续的 O_3 浓度优良区.

5.4 O_3 浓度月度空间集聚特征

从月份来看, 中国城市 O_3 浓度的空间集聚性呈现更显著的周期性变化规律. 1 月热点城市主要集中在西南地区与西北地区中东部, 而在华北、华中及华南地区冷点占主导地位, 东部地区以无特征点居多. 2 月全国以无特征点为主, 热点城市主要

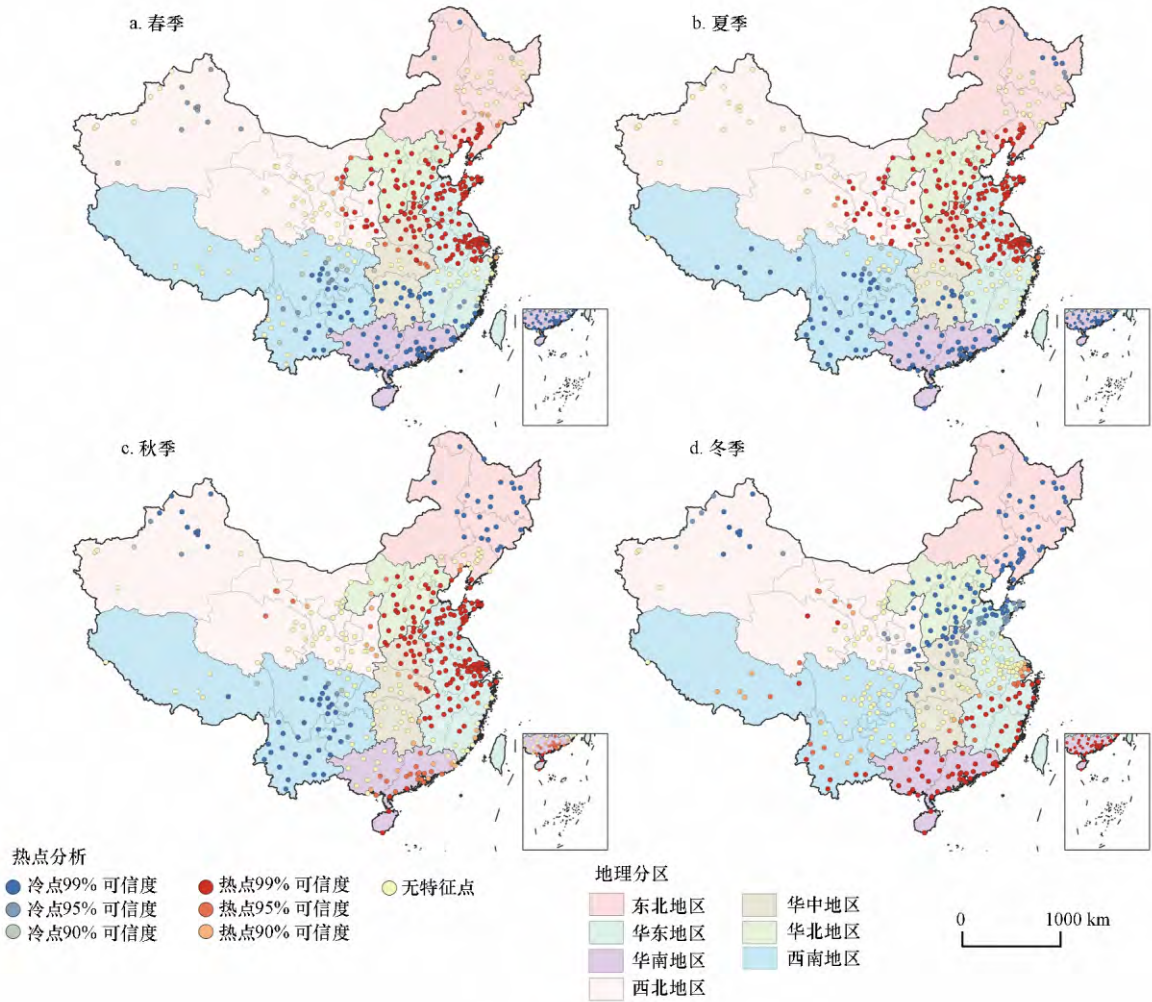
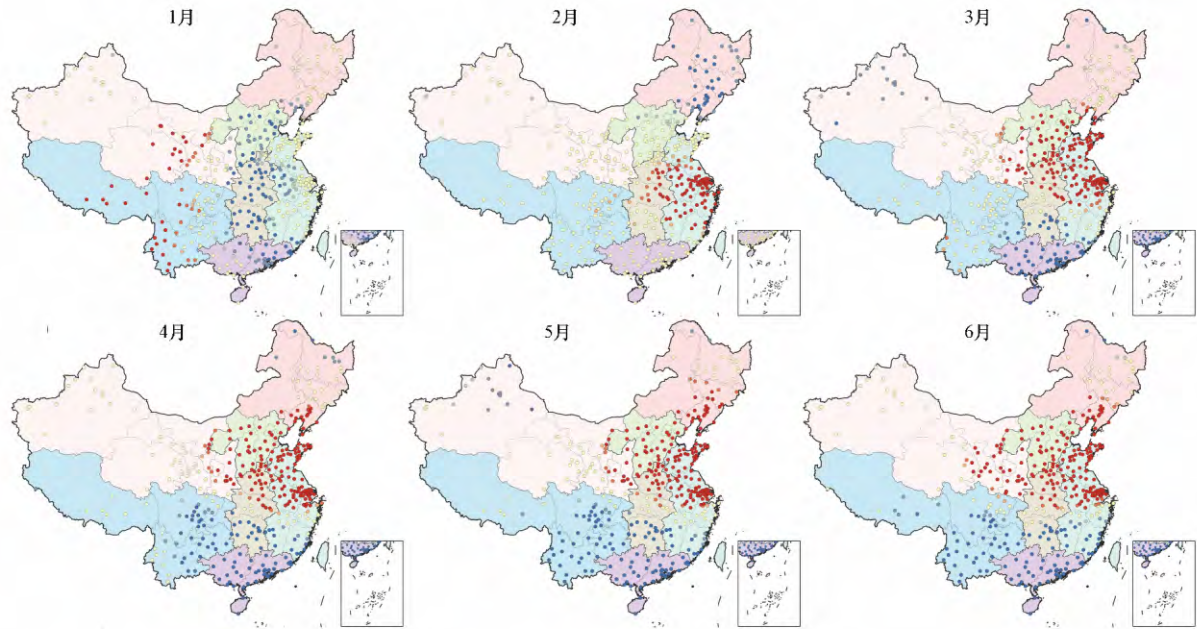
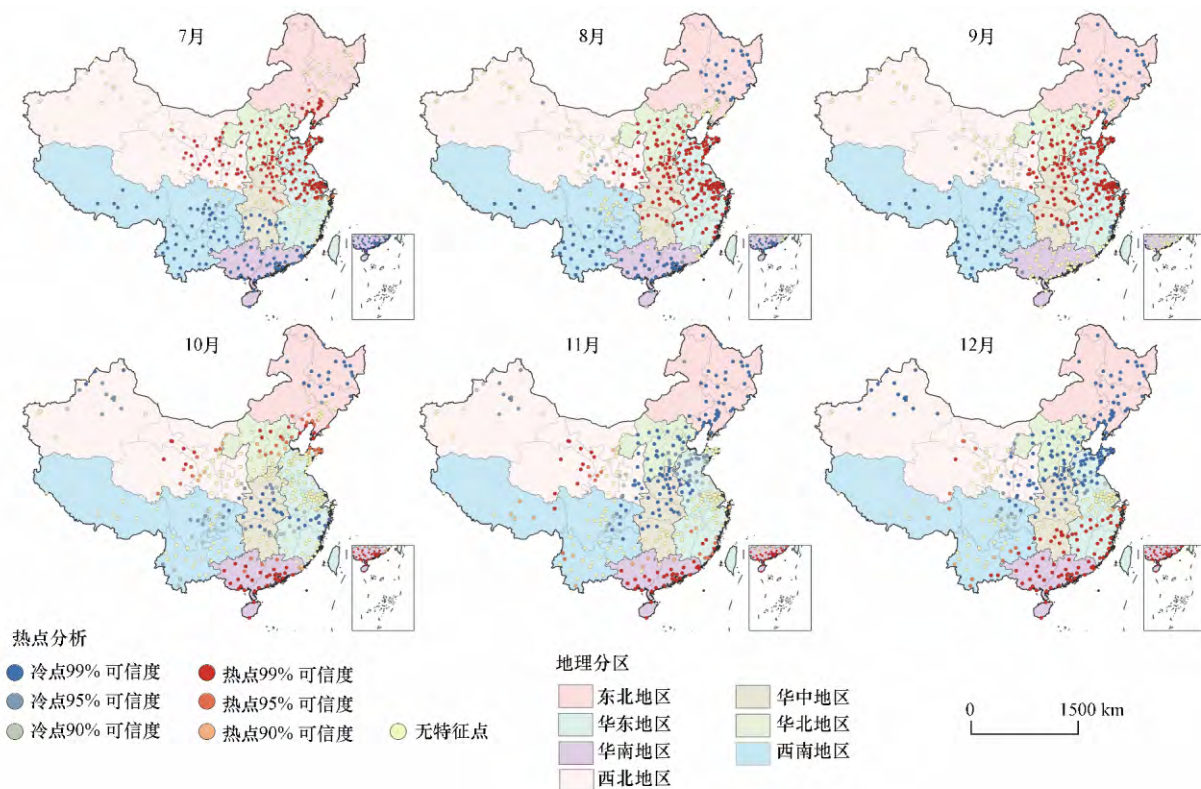


图 7 2016 年中国城市 O₃ 浓度季度空间集聚

Fig.7 Spatial agglomeration of Chinese cities' seasonal O₃ concentrations in 2016



图 8 2016 年中国城市 O_3 浓度月度空间集聚Fig.8 Spatial agglomeration of Chinese cities' monthly O_3 concentrations in 2016

集中在华东与华中地区,冷点城市集中在东北地区。3—7 月热点城市集中分布在我国中东部,且其污染范围由东向西逐步扩大,形成了稳定的 O_3 污染区域;冷点城市主要集中在西南地区东部、华中地区南部与华南地区;西北地区 and 东北地区城市的 O_3 浓度空间自相关不明显。8 月与 9 月热点区域主要集中在华北地区、华中地区和华东地区,且其范围逐步缩小并向南转移,在 9 月华南地区城市 O_3 浓度的空间自相关性不显著。随着全国气温降低,太阳辐射强度减弱,10—12 月热点城市进一步向南转移,全国城市 O_3 浓度以冷点和无特征点为主,由于华南地区为热带气候,冬季太阳辐射仍旧强烈,导致热点城市集中分布在华南地区。

6 结论 (Conclusions)

1) 2016 年中国 364 个城市 O_3 污染较为严重,主要分布在华北地区、华中地区北部、华东地区北部、东北地区南部、西北地区东部、川渝地区及珠三角地区。

2) 中国北方和南方城市 O_3 浓度分别具有显著的倒“V”形和“M”形月变化规律,且南方地区超标

时间跨度较大,这与南方地区高温天气持续时间较久密不可分。全国城市平均超标天数为 39 d,夏季最多、春秋次之、冬季最少,其中,5、6、7 和 9 月 O_3 浓度超标率均在 20% 以上,4 月和 8 月在 10% ~ 20% 之间,而 1、2、3、10、11 和 12 月低于 10%,严重 O_3 污染天气集中在 6 月。

3) 2016 年中国城市 O_3 浓度呈现显著的空间分异特征。华北地区、华中地区北部、华东地区北部是 2016 年的 O_3 高污染区域,年均超标天数均超过了 50 d;东北、西北与华南地区次之,超标天数在 27 d 左右;西南地区城市的 O_3 污染水平较低,年均超标天数为 20 d。2016 年中国 O_3 污染具有季节性和月度空间变化规律,其中,夏季污染范围最广,春秋次之,冬季最小,1 月 O_3 污染主要集中在西南地区与西北地区中东部,从 2 月开始 O_3 污染范围逐步扩大,6 月 O_3 污染范围最大,然后从东北地区南部、华北地区、西北地区东部、华中地区北部、华东地区北部逐渐由北向南转移至华南地区,且范围不断缩小。

4) 2016 年中国城市 O_3 浓度具有显著的空间集聚特征,东部沿海及中部内陆地区是 O_3 污染的核心区域。中国城市 O_3 浓度具有季节性和月度周期性变

化特征,春季 O_3 污染主要集中在华北地区、华中地区北部及华中地区南部,夏季由东部沿海向西部内陆扩大,秋季由西北向东南沿海转移,冬季主要集中在华南地区、华东地区及西南地区南部。1—7 月 O_3 污染区域由东部沿海逐步向北、向西扩张,7—9 月污染范围开始向长江以南缩小,10—12 月主要聚集在华南地区。

本文分析了 2016 年我国城市臭氧污染物的时空变化规律和空间集聚特征,由于 O_3 污染的形成机理复杂,前体物浓度、排放强度及与气象条件等诸多因素均可影响臭氧浓度,需进一步研究各影响因子间的相互作用关系。只有充分揭示不同地区 O_3 的成因及来源,量化 O_3 污染的主导因子,才能有效提高 O_3 污染的防控途径。因此,加强我国近地面臭氧的监测,研究多时空尺度下不同区域臭氧污染的形成机理与主导因素,是未来应对臭氧污染亟待解决的科学问题。

责任作者简介:宋宏权(1986—),男,副教授,主要从事地理信息科学、地表过程建模与模拟、视频 GIS 等研究。

参考文献(References):

- Chen L, Yu B, Chen Z, *et al.* 2014. Investigating the temporal and spatial variability of total ozone column in the Yangtze River Delta using satellite data: 1978—2013 [J]. *Remote Sensing*, 6 (12): 12527-12543
- 陈世俭,童俊超,Kazuhiko,等.2005.气象因子对近地面层臭氧浓度的影响 [J]. *华中师范大学学报(自科版)*, 39(2): 273-277
- 程麟钧,王帅,宫正宇,等.2017.京津冀区域臭氧污染趋势及时空分布特征 [J]. *中国环境监测*, 33(1): 14-21
- 段玉森,张懿华,王东方,等.2011.我国部分城市臭氧污染时空分布特征分析 [J]. *环境监测管理与技术*, 23(S1): 34-39
- Fu Y, Liao H. 2012. Simulation of the interannual variations of biogenic emissions of volatile organic compounds in China: Impacts on tropospheric ozone and secondary organic aerosol [J]. *Atmospheric Environment*, 59(7): 170-185
- Getis A. 1991. Spatial interaction and spatial autocorrelation: A cross-product approach [J]. *Environment and Planning A*, 23 (9): 1269-1277
- 国家环境保护部.2012.中华人民共和国国家环境保护标准(GB3095-2012) 环境空气质量标准 [EB/OL]. 2017-08-23. http://kjs.mep.gov.cn/hjbhbz/bzwb/dqhjbh/dqhjlz/201203/t20120302_224165.shtml
- 国家环境保护部.2013.中华人民共和国国家环境保护标准(HJ 663-2013) 环境空气质量评价及数规范(试行) [EB/OL]. 2017-08-23. http://kjs.mep.gov.cn/hjbhbz/bzwb/jcffbz/201309/t20130925_260809.shtml
- Hu J, Chen J, Ying Q, *et al.* 2016. One-year simulation of ozone and particulate matter in China using WRF/CMAQ modeling system [J]. *Atmospheric Chemistry & Physics*, 16(16): 10333-10350
- 黄亮.2014.我国臭氧污染特征及现状分析 [J]. *环境保护与循环经济*, 34(5): 64-66
- Jin X, Holloway T. 2015. Spatial and temporal variability of ozone sensitivity over China observed from the ozone monitoring instrument [J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 120 (14): 7229-7246
- 李礼,王帅,宫正宇,等.2017.我国城市空气臭氧监测与污染特征分析 [J]. *环境科学导刊*, 36(2): 121-126
- Michael G, Robert H, Stephen W, *et al.* 1993. Integrating GIS and spatial data analysis: problems and possibilities [J]. *Geographical Information Systems*, 6(6): 407-423
- Moran P A P. 1948. The interpretation of statistical maps [J]. *Journal of the Royal Statistical Society*, 10(2): 243-251
- Ord J K, Getis A. 1995. Local spatial autocorrelation statistics: distributional issues and an application [J]. *Geographical Analysis*, 27(4): 286-306
- 潘光,潘齐,张广卷.2013.臭氧污染的危害及开展臭氧监测的意义 [J]. *中国环境科学学会 2013 年学术年会*. 昆明: 6224-6228
- 秦瑜,赵春生.2004.大气化学基础 [J]. *气象*, 30(4): 64-64
- 单源源,李莉,刘琼,等.2016.基于 OMI 数据的中国中东部臭氧及前体物的时空分布 [J]. *环境科学研究*, 29(8): 1128-1136
- 孙继琼.2009.中国农业公共投资绩效的空间差异—基于 7 大区域的实证研究 [J]. *中南财经政法大学学报*, (2): 57-61
- Tang G, Wang Y, Li X, *et al.* 2011. Spatial-temporal variations of surface ozone and ozone control strategy for northern China [J]. *Atmospheric Chemistry & Physics*, 11(9): 26057-26109
- 唐孝炎,张远航,邵敏.2006.大气环境化学(第 2 版) [M]. 北京: 高等教育出版社
- Tobler W R. 1970. A computer movie simulating urban growth in the detroit region [J]. *Economic Geography*, 46(Supp 1): 234-240
- Wang W N, Cheng T H, Gu X F, *et al.* 2017. Assessing spatial and temporal patterns of observed ground-level ozone in China [J]. *Scientific Reports*, 7(1): 3651
- 王雪梅,韩志伟,雷孝恩.2003.广州地区臭氧浓度变化规律研究 [J]. *中山大学学报(自然科学版)*, 42(4): 106-109
- 王占山,李云婷,陈添,等.2014.北京城区臭氧日变化特征及与前体物的相关分析 [J]. *中国环境科学*, 34(12): 3001-3008
- 徐家骝,朱毓秀.1994.气象因子对近地面臭氧污染影响的研究 [J]. *大气科学*, 18(6): 751-757
- 张远航,邵可声,唐孝炎,等.1998.中国城市光化学烟雾污染研究 [J]. *北京大学学报: 自然科学版*, 34(2): 392-400
- 周天墨,付强,诸云强,等.2013.空间自相关方法及其在环境污染领域的应用分析 [J]. *测绘通报*, (1): 53-56
- 朱毓秀,徐家骝.1994.近地面臭氧污染过程和相关气象因子的分析 [J]. *环境科学研究*, 7(6): 13-18