万方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

长江经济带$PM_{2.5}$空间异质性和驱动因素的地理探测

王丽丽，刘笑杰，李丁，孙颖琦

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心
■ 出版 科学出版社

2022年3月
第43卷 第3期
Vol.43 No.3

环境科学
(HUANJING KEXUE)
ENVIRONMENTAL SCIENCE
第43卷 第3期
2022年3月15日

目 次

Eco-Environmental Knowledge Web

环 境 科 学
Environmental Science

第43卷第3期 2022年3月
Vol.43, No.3 Mar., 2022

山东半岛近地面 O_3 浓度时空变化及潜在源区解析

李乐, 刘旻霞*, 肖仕锐, 王思远, 米佳乐
(西北师范大学地理与环境科学学院, 兰州 730070)

摘要: 为探究山东半岛在长时间序列上的臭氧(O_3)时空分布特征及潜在来源,在分析山东半岛2005~2020年 O_3 浓度时空变化的基础上,运用小波分析、熵权法和相关性分析对 O_3 及其影响因素进行了探讨,并对山东半岛 O_3 的潜在来源进行研究.结果表明:①时间格局上,山东半岛地区近地面臭氧2005~2020年间呈现出“三峰型”趋势,2010年达到最大值[(40.48±7.64) μg·m^{-3}],2013年为最小值[(36.63±5.61) μg·m^{-3}].季节表现为:夏季[(42.49±1.7) μg·m^{-3}]>春季[(40.65±0.6) μg·m^{-3}]>秋季[(36.47±0.7) μg·m^{-3}>冬季[(36.46±0.3) μg·m^{-3}].②空间格局上,2005~2020年山东半岛 O_3 浓度随着纬度的升高而逐渐升高,呈现出东西部高,中部低的特征,O_3 浓度16 a的演化过程中存在着1.5 a的主振荡周期.③气象条件分析发现,O_3 浓度与气温、降水、相对湿度和日照时数呈正相关关系、与气压和风速呈负相关关系.社会因素分析中,烟粉(尘)排放量为第三指标影响最为明显的因素,所占权重达到了0.25.④通过对不同地区(济南和青岛)模拟受点气流输送轨迹发现,海洋气流对济南贡献10.69%,对青岛贡献48.94%.远距离气团传输路径64.04%来自西北方向,近距离气团传输路径43.69%来自渤海和黄海,其次是山东本省地区占21.01%.⑤O_3 潜在源解析表明:济南潜在源主要分布在辽宁省锦州地区、江苏省北部、湖北省和安徽省交界处,其WPSCF值>0.6,青岛WPSCF值>0.6地区主要分布黄海地区.济宁市、临沂市、徐州市、淮北市和连云港市的 O_3 贡献>40 μg·m^{-3}.青岛的 O_3 贡献>45 μg·m^{-3}的地区主要在黄海.通过对山东半岛潜在源解析,要尤其重视周边地区的工业源供给和海洋大气污染提供的海洋源.

关键词: 臭氧检测仪(OMI); 山东半岛; 小波分析; 后向轨迹; 潜在源区
中图分类号: X513 **文献标识码**: A **文章编号**: 0250-3301(2022)03-1256-12 **DOI**: 10.13227/j.hjkx.202107003

Temporal and Spatial Variation in O_3 Concentration Near the Surface of Shandong Peninsula and Analysis of Potential Source Areas

LI Le, LIU Min-xia*, XIAO Shi-rui, WANG Si-yuan, MI Jia-le
(College of Geography and Environmental Science, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: The purpose of this study was to explore the temporal and spatial distribution characteristics and potential sources of ozone (O_3) in the Shandong Peninsula over a long period of time based on the analysis of the temporal and spatial changes in O_3 concentration in Shandong Peninsula from 2005 to 2020. We used wavelet analysis, the entropy weight method, and correlation analysis to discuss O_3 and its influencing factors and researched the potential sources of O_3 in Shandong Peninsula. The results showed that: ① in terms of the time pattern, the near-surface O_3 in Shandong Peninsula showed a “triple peak” trend from 2005 to 2020, reaching the maximum value of [(40.48±7.64) μg·m^{-3}] in 2010 and a minimum value of [(36.63±5.61) μg·m^{-3}] in 2013. The season was expressed as: summer [(42.49±1.7) μg·m^{-3}]>spring [(40.65±0.6) μg·m^{-3}]>autumn [(36.47±0.7) μg·m^{-3}]>winter [(36.46±0.3) μg·m^{-3}]. ② In terms of the spatial pattern, the O_3 concentration of Shandong Peninsula gradually increased with the increase in latitude from 2005 to 2020, showing the characteristics of high concentrations in the east and west and low in the middle region. During the 16-year evolution of the O_3 concentration, there was a 1.5 a main oscillation period. ③The analysis of meteorological conditions revealed that O_3 concentration was positively correlated with temperature, precipitation, relative humidity, and sunshine hours, whereas pressure and wind speed were negatively correlated. In the analysis of social factors, soot (dust) emissions were the most obvious factor affecting the third indicator, with a weight of 0.25. ④ Through simulating the trajectory of airflow from different regions (Ji'nan and Qingdao), it was found that the ocean airflow contributed 10.69% to Jinan and 48.94% to Qingdao. There was 64.04% of the long-distance air mass transmission path coming from the northwest, and 43.69% of the short-distance air mass transmission path was from the Bohai Sea and the Yellow Sea, followed by Shandong Province with 21.01%. ⑤ The analysis of potential sources of O_3 showed that the potential sources of Ji'nan were mainly distributed in Jinzhou, Liaoning Province, northern Jiangsu Province, Hubei Province, and Anhui Province, with a WPSCF value >0.6, and Qingdao's WPSCF value of >0.6 was mainly distributed in the Yellow Sea area. The O_3 contribution of Jining City, Linyi City, Xuzhou City, Huaibei City, and Lianyungang City was >40 μg·m^{-3}. The area with >45 μg·m^{-3} in Qingdao was mainly in the Yellow Sea. Through the analysis of potential sources in the Shandong Peninsula, particular attention should be paid to the supply of industrial sources in the surrounding areas and the marine sources provided by marine air pollution.

Key words: ozone detector; Shandong Peninsula; wavelet analysis; backward trajectory; potential source area

随着我国经济发展和城镇化水平的提高,环境问题日趋严重[1],人类活动排放的挥发性有机物(volatile organic compounds, VOCs)和氮氧化物(NO_x)等污染物通过光化学反应生成臭氧(O_3)[2,3].O_3 是大气中重要的微量气体之一,平流层的 O_3 对紫外线有强烈的吸收作用,能有效阻止过多的太阳紫外辐射到达地面,还能使底层大气增温.但是近地面 O_3 是一种污染气体,会对人和动物的呼

收稿日期: 2021-07-01; **修订日期**: 2021-08-25
基金项目: 国家自然科学基金项目(31760135); 甘肃省自然科学基金项目(20JR10RA089)
作者简介: 李乐(1996~),男,硕士研究生,主要研究方向为大气污染,E-mail:a965021333@163.com
* 通信作者,E-mail:xiaminl@163.com

吸系统造成伤害,并损害植被的健康[4]. 目前已有国内外许多学者[5~8]利用地面观测资料和遥感资料对各地区的近地面 O_3 浓度开展了研究,结果表明 O_3 浓度较以往有上升的趋势,并与研究区域的气象要素和人文因素有密切的关系,但对长时间序列 O_3 的来源探究比较鲜见.

在全国 $PM_{2.5}$、SO_2、NO_2、CO 和 PM_{10} 等大气污染物浓度逐年下降的情况下,O_3 浓度同比持续增长,并已成为仅次于 $PM_{2.5}$ 的大气污染物[9]. 不同区域经济水平、能源结构、气象条件和地理环境等都存在较大差异,受到 O_3 污染的情况也不尽相同[10],因此深入开展 O_3 浓度研究是大气环境研究的热点之一. Zhao 等[11]以长三角地区 O_3 为研究对象,基于 Allwine 和 Whiteman 方法,发现高温加剧了研究区的 O_3 污染,而相对湿度的影响可以忽略不计. Chen 等[12]对中国南方对流层 O_3 进行了研究,发现地表 O_3 有显著上升趋势,已成为令人关注的主要污染物. 刘楚薇等[13]的研究发现我国 O_3 污染高值区出现在华东和华北,污染事件主要集中在夏、秋季,冬季污染较少,大部分地区 O_3 浓度逐年上升.

山东半岛位于我国参与东北亚区域合作的前沿地区,经济发展水平较高,产业基础雄厚,城镇体系较为完善,综合交通网络发达[14]. 作为我国重要的沿海地区之一,其发展备受关注. 然而,在近几年的经济发展过程中,大气污染不断加重,尤其是 O_3 的污染,严重制约了山东半岛空气质量的改善和经济可持续发展. 目前,山东半岛 O_3 污染的相关研究主要集中在 O_3 浓度局部短期的时空分布特征及气象条件分析,缺乏对 O_3 进行长时间序列的分析和对其潜在来源的追踪. 基于此,本研究使用山东半岛 2005 ~ 2020 年的遥感数据,对其进行时空分布和潜在源区的深入探讨,以期为山东半岛今后的大气污染防控治理提供指导.

1　材料与方法

1.1　研究区概况

山东半岛地区（34°22′ ~ 38°24′N, 114°47′ ~ 122°43′E,图 1)以济南和青岛为中心,包括济南市、青岛市、淄博市、枣庄市、东营市、烟台市、潍坊市、济宁市、泰安市、威海市、日照市、滨州市、德州市、聊城市、临沂市和菏泽市. 山东半岛气候属暖温带季风气候类型. 降水集中在夏季,年气温平均值为 11 ~ 14℃,山东省气温地区差异东西大于南北. 山东半岛突出于渤海和黄海之中,同辽东半岛遥相对峙；内陆部分自北而南与河北、河南、安徽和江苏这 4 省接壤,东部是缓丘起伏,西北和西南是低洼平坦,中部是山地突起[15].

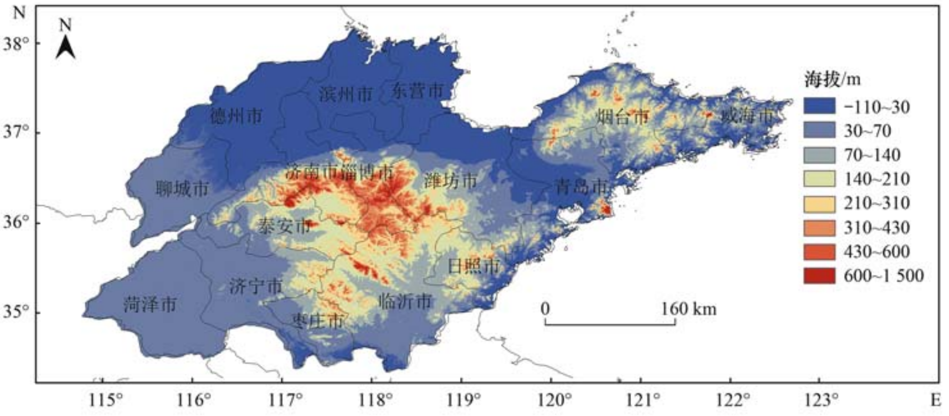


图 1　山东半岛地形

Fig. 1　Topographic map of Shandong Peninsula

1.2　数据来源

近地面 O_3 研究的数据源主要来源于地面观测站数据,但由于观测站的限制,研究时间一般较短,空间上分布不平衡且不连续[16],利用对流层遥感 O_3 数据便可以弥补这些不足. 对流层 O_3 浓度数据来自于 Aura 地球观测系统卫星上携带的 4 个传感器之一,即 O_3 检测仪和微波临边探测器 MLS 提供的大气 O_3 总量和平流层 O_3 廓线数据为基础,通过残差法反演得到对流层 O_3 数据[17]. 时间分辨率为 1 个月,空间分辨率为 1° × 1.25°,过境时间一般在当地时间 13:40 ~ 13:50[18],为进一步提高数据精度,本研究对云量大于 20% 及误差大于 10% 的数据进行剔除以减少云量所带来的反演误差[19,20]. 2020 年 O_3 污染物数据来自全国空气质量实时发布平台,气象数据来源于中国气象数据共享网(http://data.cma.cn/)下载的“中国地面气候资料月值数据集(V3.0)”,研究区内选取气象站点 32 个(莘县、临清、陵县、武城、定陶、曹县、兖州、鱼台、台儿庄、

滕州、费县、沂南、莒县、五莲、黄岛、莱西、成山头、乳山、长岛、龙口、垦利、广饶、寿光、安丘、惠民、阳信、莘县、临清、莱芜、长清、淄川和沂源). 2017～2019 年山东半岛污染来源和社会经济因素均来自中国城市统计年鉴和各省、市的统计年鉴. 后向轨迹模型使用的数据来自美国国家环境预报中心(NCEP)提供的 2019 年 12 月～2020 年 11 月的全球资料同化数据.

1.3 指标体系的构建

指标确定的合理性可直接影响评价结果的准确性与科学性[21]. 本文以影响 O_3 的污染来源和社会经济因素构建了影响 O_3 浓度的指标体系(表 1),一级指标层 3 个,二级指标层 4 个,三级指标层有 9 个,指标都具有正功效即与 O_3 呈正相关.

表 1 影响 O_3 浓度的指标体系

Table 1 Indicator systems affecting O_3 concentrations

一级指标层	二级指标层	三级指标	单位
城市化与土地利用(B1)	人口数量(C1)	人口(D1)	人
	城市建设(C2)	城市建成区面积(D2)	km^2
		建成区绿化覆盖率(D3)	km^2
	产业结构与经济水平(C3)	第二产业占 GDP 总重(D4)	%
		工业生产总值(D5)	万元
		人均地区生产总值(D6)	元
污染来源(B2)	工业源(C4)	二氧化硫排放量(D7)	t
		氮氧化物排放量(D8)	t
		烟粉(尘)排放量(D9)	t

1.4 研究方法

1.4.1 Morlet 小波分析

小波分析在信号滤波方面的设计与应用,相比于传统的非线性滤波器中值滤波,小波去噪的滤波方式更能够有效地消除瞬时脉冲对信号的干扰[22]. Morlet 小波它是高斯包络下的单频率副正弦函数,没有尺度函数,而且是非正交分解. 因此,不同时间尺度下的 Morlet 小波系数可以反映系统在该时间尺度下的演变特性和突变[23]. Morlet 函数如下:

$$\psi(t) = e^{iw_0 t} \cdot e^{-t^2/2} \tag{1}$$

式中, t 为时间, i 表示虚数, w_0 为无量纲频率.

1.4.2 相关性分析

相关性计算方法是一种基于像元的分析方法[24],可以通过选取各种气象因子分析其与 O_3 浓度的相关关系. 计算公式如下:

$$r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^{n}[(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})]}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^{n}(y_i - \bar{y})^2}} \tag{2}$$

式中, r_{xy} 为 O_3 浓度与影响因子的相关性系数; x_i 表示第 i 月 O_3 浓度均值; y_i 表示第 i 月影响因子; $\bar{x}$ 表示 O_3 浓度的多月均值; $\bar{y}$ 表示影响因子的多月平均; n 为样本数量. $r_{xy} > 0$,表示二者呈正相关关系; $r_{xy} < 0$,表示二者呈负相关关系.

1.4.3 熵权法

熵权法是根据指标反映信息的客观情况确定权重,由其得出的权重有较强的数学理论数据支撑[25]. 对指标进行标准化具体方法如下.

正向指标:

$$x'_{ij} = \frac{x_{ij} - \min\{x_{1j}, \cdots, x_{nj}\}}{\max\{x_{1j}, \cdots, x_{nj}\} - \min\{x_{1j}, \cdots, x_{nj}\}} \tag{3}$$

计算第 i 个方案下第 j 个指标占该指标的比重:

$$p_{ij} = x_{ij} \Big/ \sum_{i=1}^{n} x_{ij} \tag{4}$$

式中, $i = 1, 2, \cdots, n$; $j = 1, 2, \cdots, m$.

采用自然对数,此时第 j 个评价指标的熵可定义为:

$$e_i = -k \sum_{i=1}^{n} p_{ij} \ln p_{ij} \tag{5}$$

式中, $k = 1/\ln m$, m 为待评方案数.

确定各指标权重:

$$w_i = k_i \Big/ \sum_{i=1}^{n} k_i \tag{6}$$

式中, $k_i = 1 - e_i$, k_i 为指标 x_{ij} 的差异性系数, e_i 为评价指标的熵. k_i 越大,该指标对应的权重也越大.

1.4.4 后向轨迹与聚类分析

HYSPLIT(混合单粒子拉格朗日积分轨道模型)是一种计算分析气流运动、沉降、大气污染物输送和扩散轨迹过程的综合模式系统[26]. 有学者将此模型运用于研究空气污染物的输送扩散和来源解析[27]. 本文利用 Trajstat 软件对山东半岛地区两个典型城市济南(省会)和青岛(沿海城市) 进行气流轨迹分析和研究,解析山东半岛地区近地面大气 O_3 来源. 以济南市和青岛市为模拟受点,选取的气流模拟高度为 500 m,该高度的气流场可以较准确地反映边界层平均气场特征,但为准确反映近地面大气

O_3 的气流来源,模拟出 2019 年 3 月到 2020 年 3 月逐日 12 个时间段到达到受点的 72 h 后向轨迹,再利用聚类分析方法以季节进行聚类.

1.4.5　污染物潜在贡献源分析法（PSCF）

PSCF(潜在源贡献分析法)是污染物浓度达到一定水平的包裹经过特定迎风源区域后到达受体点的条件概率,应用 PSCF 模型对潜在 O_3 源的分布进行了描述和说明. 此外,该方法不仅更适合于分析相对清洁的区域,也适用于污染严重的区域[28,29]. PSCF 值会有很大的不确定性,为了使不确定性降低以减小误差,引入权重系数 W,即 WPSCF.

$$\mathrm{WPSCF}_{ij} = W_{ij} \times (m_{ij}/n_{ij}) \tag{7}$$

式中, n_{ij}为落在网格单元内的端点总数, m_{ij}为与高于给定判据值的空气污染物浓度相关的同一网格内端点数(i, j).

1.4.6　浓度权重轨迹分析法（CWT）

PSCF 无法确定对潜在源区的污染程度贡献的大小,所以引入 CWT(权重潜在源贡献分析法)分析方法计算每个网格中轨迹的污染权重指数来反映不同轨迹的污染程度[30]. 函数 W 也适用于 CWT 分析法,即 WCWT.

$$\mathrm{WCWT}_{ij} = W_{ij} \cdot \left(\sum_{k=1}^{M} T_{ijk}\right)^{-1} \cdot \sum_{k=1}^{M} C_k \tau_{ijk} \tag{8}$$

式中, C_k 为轨迹 k 经过网格(i, j)时对应的污染物浓度, τ_{ijk}为轨迹 k 在网格(i, j)停留时间, M 为总气流轨迹数目.

2　结果与讨论

2.1　山东半岛 O_3 季节空间布局

为便于研究山东半岛地区 2005 ~ 2020 年 O_3 浓度的分布和变化情况,在时间序列上按照春季(3 ~ 5 月)、夏季(6 ~ 8 月)、秋季(9 ~ 11 月)和冬季(12 月及次年 1、2 月) 的标准进行季度均值分析. 图 2 表明,山东半岛 O_3 浓度季均值为:夏季 > 春季 > 秋季 > 冬季, 夏季 $\rho(O_3)$ 达到 [(42.49 ± 1.7) μg·m^{-3}], 冬季 $\rho(O_3)$ 达到 [(36.46 ± 0.3) μg·m^{-3}]. 春夏季 O_3 浓度较高,这主要是因为在低纬度地区平流层通过光化学作用产生的 O_3 被大气环流输送到高纬度地区. 这种极向环流存在明显的季节变化,极向环流在春夏季节较强,而平流层 O_3 的向下扩散流动也是对流层 O_3 的重要来源之一[31]. O_3 浓度与纬度呈现正相关关系,秋冬季不如春夏季南北梯度明显,正是因为秋冬季这种环流较弱,使该时期 O_3 浓度较低并且对流层 O_3 总量的经向梯度也较小. 沿海地区春季最高,与沿海地区海陆风条件密不可分. 虽然夏季海陆风信号最强,但是在夏季的日间能够缓解沿海地区的高温并输送水汽,形成雾或降水,从而降低 O_3 浓度. 而相应的内陆地区夏季 O_3 浓度远超于其他季节,夏季主要受低压系统控制,气象条件有利于促进光化学反应速率,并且在内陆地区的城市工业发达,为 O_3 提供大量的前体物[32]. 说明内陆地区局部光化学反应对于 O_3 浓度的影响占主导地位.

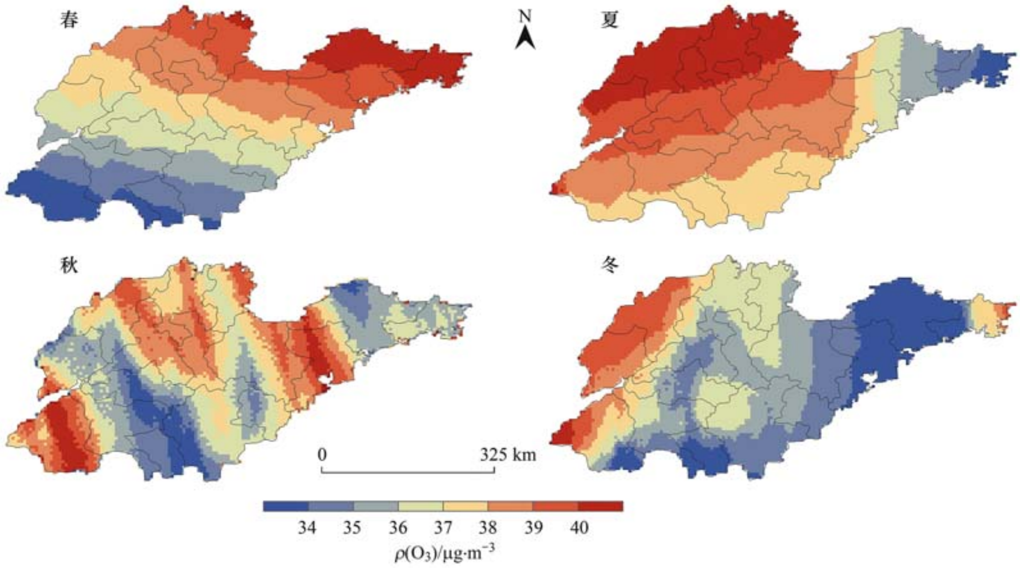


图 2　山东半岛地区 O_3 浓度季节分布

Fig. 2　Seasonal distribution in O_3 concentration in Shandong Peninsula

2.2　O_3 浓度年际变化

图 3 反映了山东半岛 2005 ~ 2020 年 O_3 浓度变化规律,呈现出"三峰型"趋势. 于 2010 年到达顶峰,为[(40.48 ± 7.64) μg·m^{-3}], 2010 年夏季高温

闷热,多地出现 40℃以上高温. 秋冬季持续少雨干旱,降水量较常年偏少 85.1%,为 1951 年以来历史同期最小值. 气候变化异常是 O_3 浓度增加的主要驱动力[33],当地的气象条件为 O_3 的形成提供了有利条件. 2010 年之后山东半岛的气象条件趋于稳定,O_3 浓度也随之有所下降. 2013 年为 16 年间 $\rho(O_3)$ 最小值[(36.63 ± 5.61) $\mu g \cdot m^{-3}$],2013 年的年气温平均值为 10.11℃,较 2010 年下降 1.2℃,降水增加 12 mm,气象条件不利于 O_3 的形成. 2013 年颁布了大气污染防治十条措施,O_3 浓度却有不降反升趋势,说明工业排放对于山东半岛 O_3 的形成不占主导地位. 2015 年和 2018 年均达到峰值,与当年的气象条件密不可分. 通过对 O_3 浓度数值进行标准差计算,然后对其进行稳定性分析,2010 年的 O_3 浓度稳定性最差,与 2010 年的气候异常也有较大的关系. 其余年份标准差稳定在 1 ~ 3 之间,相对于 2010 年较稳定.

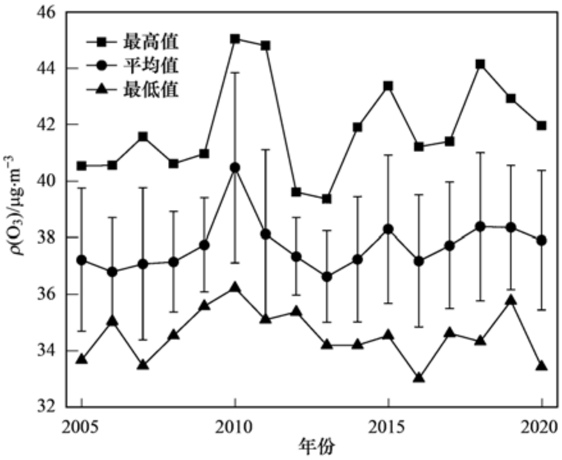


图 3 2005 ~ 2020 年山东半岛地区 O_3 浓度年均值变化趋势

Fig. 3 Annual mean variation trend of O_3 concentration in Shandong Peninsula from 2005 to 2020

2.3 山东半岛 O_3 空间格局

图 4 表明,2005 ~ 2020 年山东半岛 O_3 浓度随着纬度的升高而逐渐升高,呈现出东西部高,中部低的特征. 2005 ~ 2014 年 O_3 浓度污染区域格局基本不变,呈现出济南市、德州市和滨州市等地区浓度较高以及菏泽市和济宁市等地区浓度较低的现象. 覆盖范围上,济南附近高值区相比于往年有一定程度的扩大,可能是山东省经济快速增长,而作为省会城市的济南市引起虹吸效应,将周边城市的生产要素聚集使排放源逐年加强[34],并且济南南区被泰山包围不利于 O_3 前体物的扩散,只能向北部城市扩散. 2015 年之后山东西部 O_3 浓度高值区向南偏移,这可能与 O_3 受太阳辐射和光化学反应速率密切相关,纬度越低,太阳辐射越强,光化学反应速率越快[35]. 沿海地区在 2013 年之后 O_3 浓度逐渐下降,青岛附近的城市群高值范围减少,可能跟当地政府发展沿海旅游有关.

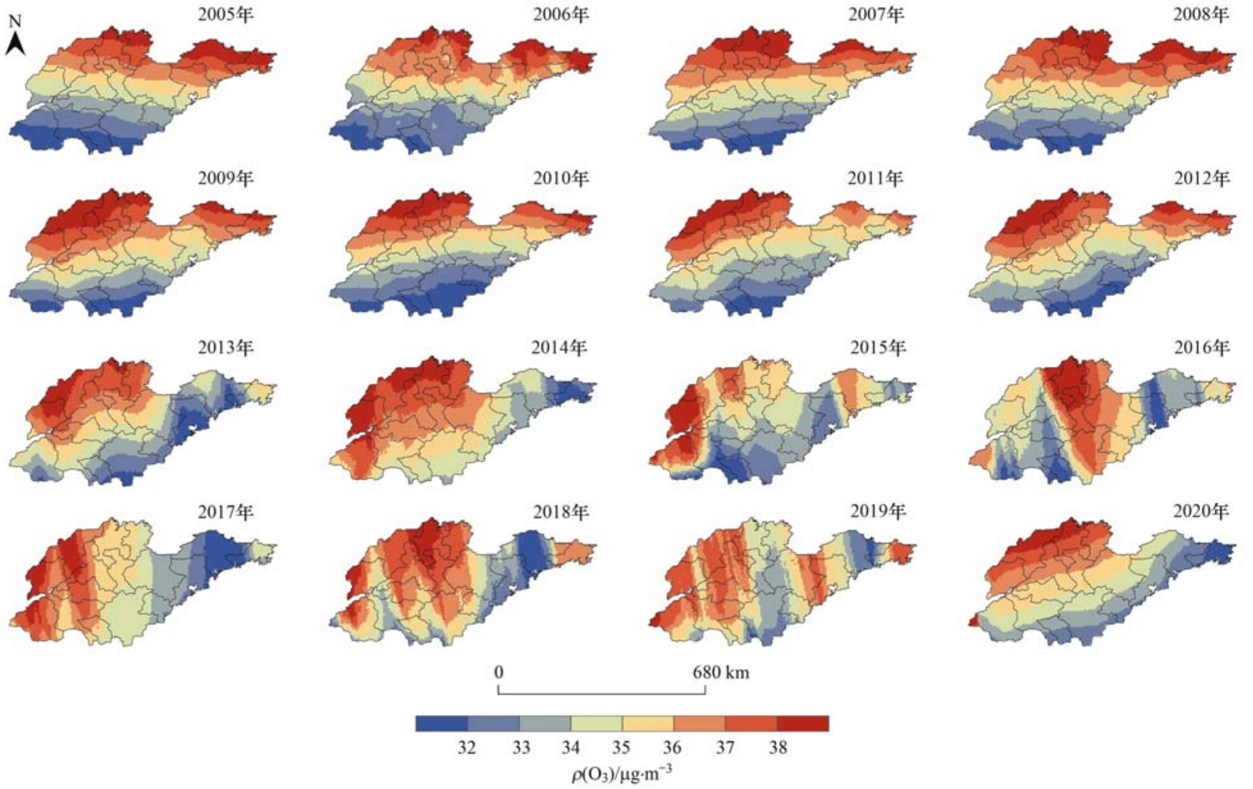
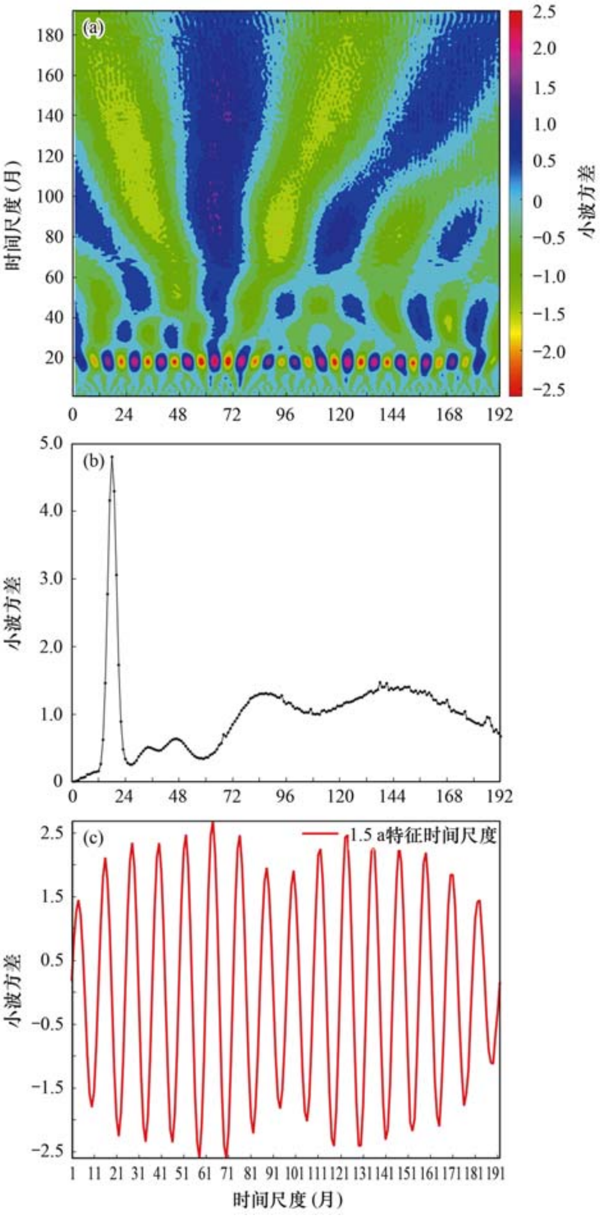


图 4 2005 ~ 2020 年山东半岛地区 O_3 浓度年均值空间格局

Fig. 4 Spatial pattern of annual mean ozone concentration in Shandong Peninsula from 2005 to 2020

一个地区的大气 O_3 总量及其周期变化主要受输送过程和光化学过程的影响. 而 O_3 分子具有较长的生命期,因此被作为大气运动的“示踪剂”, O_3 的变化与大尺度行星波有较好的对应关系[36],因此采用小波分析对山东半岛 16 年间 O_3 浓度周期变化进行研究. 图 5(a) 发现, O_3 浓度 16 a 的演化过程中存在着 1.5 a 的主振荡周期(这一周期是多个振荡周期叠加的矢量和,随后将在小波方差图中对这一主周期进行分解,剥离出第一主周期). 图 5(b) 显示,小波方差分析中有 5 个较为明显的峰值,它们依次从大至小对应着 1.5、12、7、4 和 3 a 的时间尺度. 其中,最大峰值对应着 1.5 a 的时间尺度,说明 1.5 a 左右(时间尺度) 的周期振荡最强,为 O_3 浓度



(a) 小波实部实频,(b)小波方差,(c)小波系数

图 5　2005 ~ 2020 年山东半岛地区的 小波实部实频、方差和系数

Fig. 5　Wavelet real frequency, variance, and coefficients in Shandong Peninsula from 2005 to 2020

变化的第一主周期. 12 a 时间尺度对应着第二峰值,为第二主周期; 第三、四和五峰值分别对应着 7、4 和 3 a 的时间尺度,它们依次为 O_3 的第三、四和五主周期. 这说明上述 4 个周期的波动控制着 O_3 浓度在整个时间域内的变化特征. 图 5(c) 表明 O_3 浓度在 1.5 a 的时间尺度上有一个更为明显的周期性变化,进一步证明了在 2015 ~ 2020 年 O_3 浓度在演化过程中存在着 1.5 a 的主振荡周期.

2.4　O_3 与气象条件的相关性分析

引起 O_3 浓度起伏的原因比较复杂,但气象因子是重要的影响因素之一[37]. 根据山东半岛 2020 年气象数据,对其进行气象因素相关分析. 图 6(a) 显示,山东半岛月均温与 O_3 浓度存在着正相关关系,说明气温越高, O_3 浓度也处于较高水平,这是因为温度升高对 O_3 生成速率有显著影响[38]. 图 6(b) 显示,山东半岛月均降水与 O_3 浓度存在着正相关关系,但降水所对应的线性拟合线离散程度高. 图 6(c) 表明,相对湿度与 O_3 呈现弱正相关,水汽的消光机制会衰减紫外辐射,而紫外辐射又是光化学反应的重要条件之一[39,40],同时水汽还可以跟 O_3 发生反应. 降水、相对湿度与 O_3 相关性结果进一步证明了 O_3 浓度受多个气象因子的协同影响. 图 6(d) 和 6(e) 分析了气压和风速对于 O_3 的影响,气压和风速与 O_3 均呈负相关关系,其中气压与 O_3 之间表现出强相关关系,说明对于山东半岛来说,气压对 O_3 的影响较大,气压越高越容易产生气旋式上升气流,使大气污染物向上扩散,从而导致近地面污染物浓度降低. 平均风速与 O_3 之间的相关关系较弱,是因为高风速可以使山东半岛的 O_3 向周围扩散,实现对污染物的稀释,低风速则会使空气凝滞,引发 O_3 前体物的光化学反应[41]. 图 6(f) 表明,日照时数与 O_3 呈正相关关系,日照时数的增加会加强太阳辐射,从而引发光化学反应. 总体来看,气温和气压为影响山东半岛 O_3 的主导气象因子.

2.5　O_3 与社会因素相关分析

根据指标体系,利用熵权法对影响 O_3 浓度的社会因素进一步讨论, 由表 2 可知,对于 O_3 这种二次污染物来说,城市化与土地利用指标不如污染来源指标对 O_3 的影响强烈,同时,对于山东半岛这样一个经济实力强的地区,工业发展处于一种“重发展,轻防护”的状态. 污染来源因素(B2)所占权重为 0.76,所占比重超过 50%,说明山东半岛重工业发展对环境还是造成了严重的影响. 受污染物区域输送影响,烟粉(尘)排放量(D9)为第三指标影响最为明显的因素,所占权重就达到 0.25.

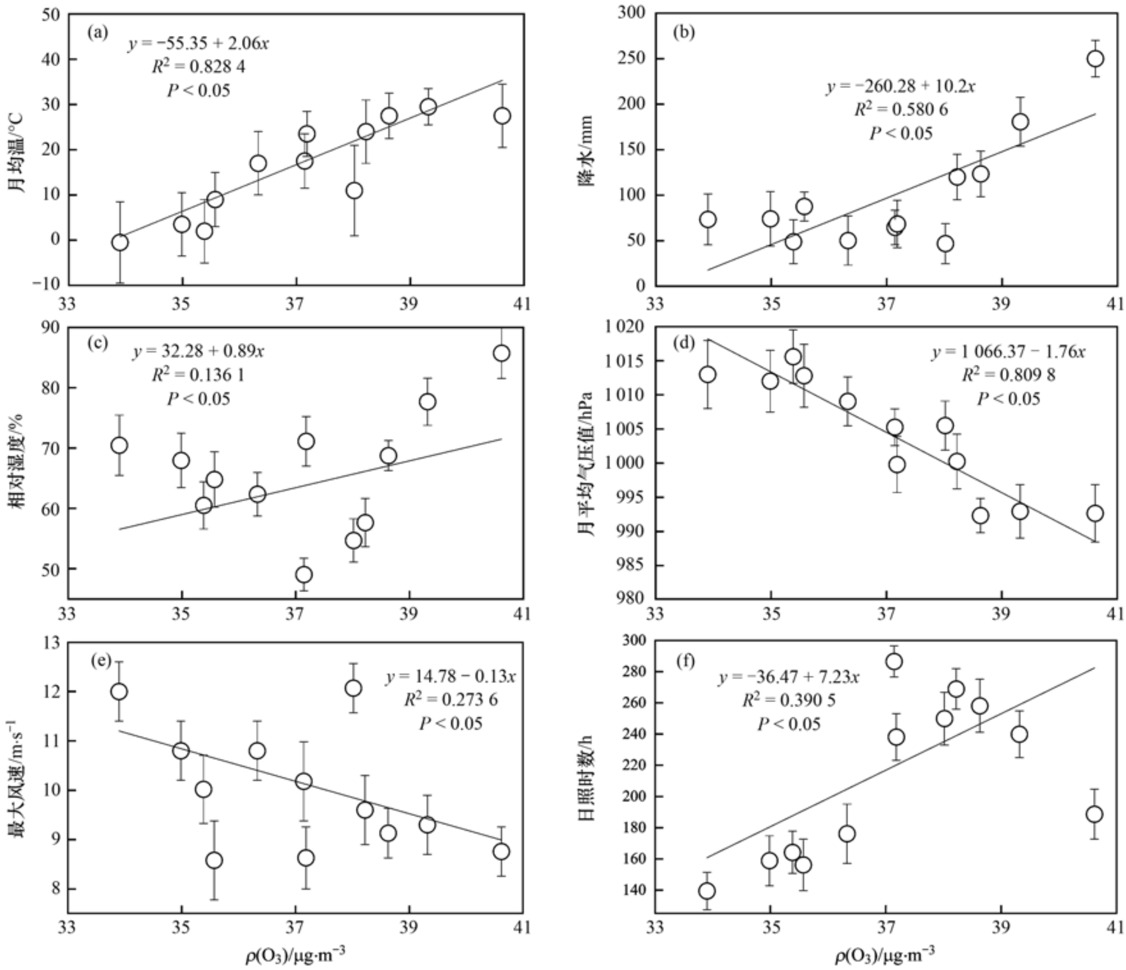


图6 臭氧与气象条件相关性分析

Fig. 6 Correlation analysis of ozone and meteorological conditions

表2 山东半岛 O_3 各影响因子权重

Table 2 Weight of O_3 impact factors in Shandong Peninsula

一级指标层		二级指标层		三级指标层	
因子	权重	因子	权重	因子	权重
B1	0.24	C1	0.11	D1	0.11
		C2	0.13	D2	0.12
				D3	0.01
		C3	0.26	D4	0.01
				D5	0.17
				D6	0.08
B2	0.76	C4	0.50	D7	0.17
				D8	0.08
				D9	0.25

2.6 后向轨迹与聚类分析

为进一步探究山东半岛 O_3 的传输路径和潜在源区,选择山东省省会济南(内陆城市)和经济最发达城市青岛(沿海城市),运用后向轨迹模型对济南和青岛两个城市进行模拟,共得到近7 000条轨迹,两个城市的季均轨迹数约为 875 条,分别对不同季节的气团轨迹进行聚类分析(图 7 和图 8). 聚类分析成 6 类主要方向对两个地区进行分析. 按占比从大到小顺序将轨迹分别命名为 1、2、3、4、5 和 6.

济南地区,春季:主要气团轨迹 1(29.14%)来自于渤海,可携带途经地(山东省潍坊市、淄博市)的污染物抵达. 夏季:气团主要来源于山东省潍坊和烟台;少部分来源于江苏省、黄海、京津冀地区. 秋季:山东本省占秋季气团来源的绝大部分. 冬季:气团轨迹 1(23.62%)来自内蒙古的浑善达克沙地,携带大量沙质源到达济南.

青岛地区,春季:气团主要来源于黄海直接到达青岛,其次来源于安徽省和江苏省交界处(长江中下游平原). 夏季:气团轨迹 1(42.92%)来源于黄海,临近江苏省盐城市和南通市地区;气团轨迹 2(16.15%)以及气团轨迹 3 和 4(12.32%)均来源于渤海. 秋季:总体来说,大部分都是来自海洋气流. 冬季:只有气团轨迹 2(22.77%)来源于黄海地区,其余气团轨迹都是来自内陆地区,虽然对应来自内陆气团充足的污染前体物及活跃的大气反应条件有利于二次颗粒物生成,但是天气过程较快,很少有极端高浓度的污染过程出现.

综上,济南和青岛气团各个季节的气团传输路径和传输来源地较为相似,其中远距离气团传

输路径大部分来自西北方向(内蒙古、山西和京津冀地区),小部分来自东南方向(江苏、安徽等地区).近距离气团传输路径主要来自山东本省地区,其次是渤海和黄海.内蒙古地区矿产储量丰厚,海拔偏高,由阿拉善沙漠携带大量沙质源流向山东半岛,京津冀地区工业发达,气流会携带大量污染物传输到山东境内.由于泰山的阻隔,导致江苏、安徽等地区的气流绕过山地流向山东西北部.因此,调整不利于生态环境良性循环的土地利用结构,合理地安排农业、林业和牧业的比重[42],实施大气污染联合防治是减缓远距离输送的有效措施.进一步利用核能和可再生能源,采用环保技术,减少山东本省污染物排放量,有助于改善山东半岛的空气质量.

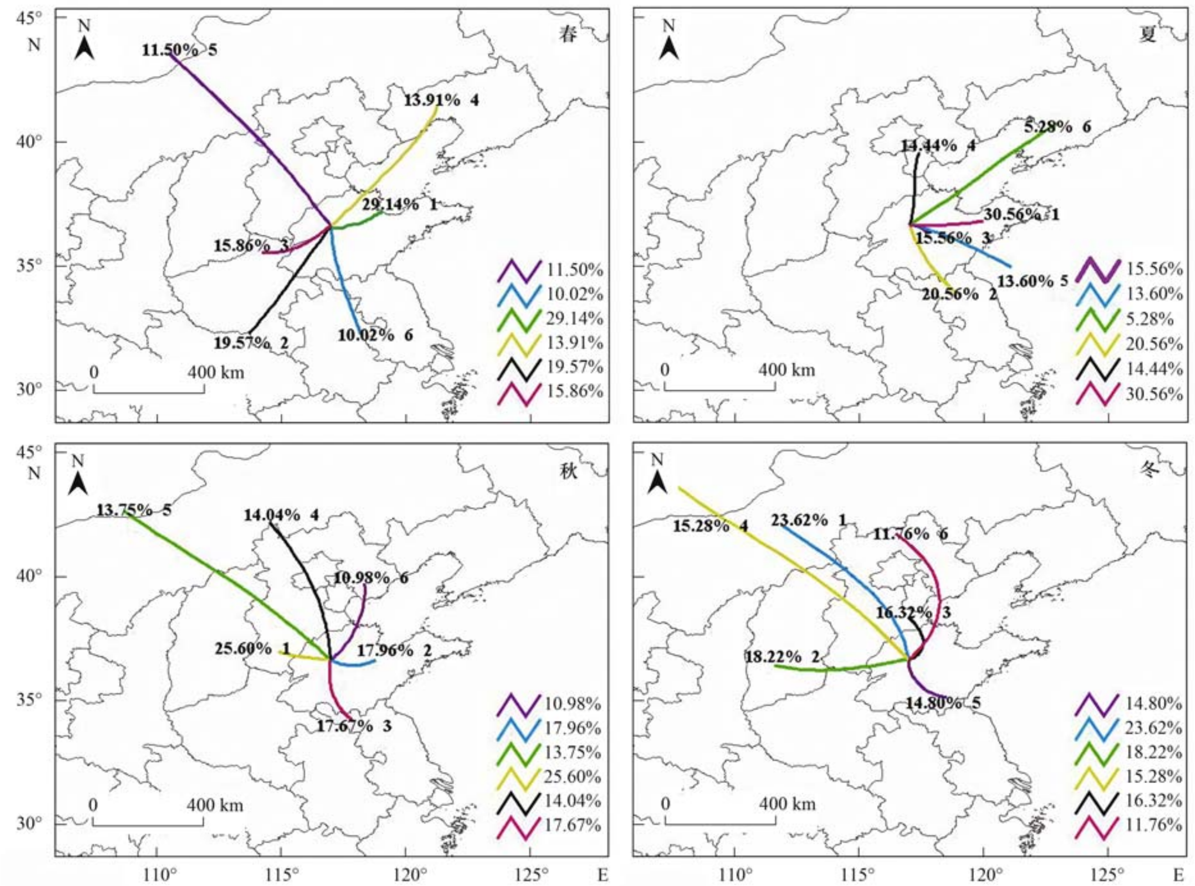


图 7　山东济南 2019 ~ 2020 年后向轨迹聚类分析

Fig. 7　Cluster analysis of backward trajectories from 2019 to 2020 in Ji'nan, Shandong

2.7　O_3 来源解析

O_3 浓度具有明显的季节性[43],山东半岛地区夏季 O_3 浓度最高.因此本研究选择夏季的潜在源地更具有代表性,对山东两个代表城市济南市和青岛市进行 O_3 潜在源分析.图 9 使用 WPSCF 对济南和青岛潜在源区进行研究,发现济南和青岛受近地源 O_3 传输更加明显,济南潜在源主要分布在辽宁省葫芦岛锦州地区、江苏省北部、湖北省和安徽省交界处,其 WPSCF 值高于 0.6,这些地区都是经济发达地区,第二产业密集,污染物排放严重,应该注意对大气污染物的排放治理.青岛 WPSCF 值大于 0.6 的区域主要来源于黄海地区.其受泰山阻隔影响,山东本省和其他省份的污染物传输无法向青岛流动.虽然渤海、黄海地区传输的海洋气团更为清洁,很有可能是临近地区(江苏浙江辽宁)通过海陆风将污染物传输到附近海域,然后气团沿黄海海湾向东北方向输送和沿渤海海湾向南部输送,在山东地区下沉[44].

根据图 10,WCWT 分析结果与 WPSCF 具有较好的一致性,济南 O_3 污染比青岛严重,济南受地形影响导致气团运动缓慢,容易受到周边的传输影响,济宁市、临沂市、徐州市、淮北市和连云港市对济南的 O_3 贡献 $>40\ \mu g \cdot m^{-3}$.青岛高值区范围缩小,$>45\ \mu g \cdot m^{-3}$的地区主要分布在黄海.对于青岛来说,海陆热力循环等自然地理条件的影响不可忽视[45].通过对山东半岛潜在源解析,要尤其重视周边地区的工业源供给和海洋大气污染提供的海洋源.

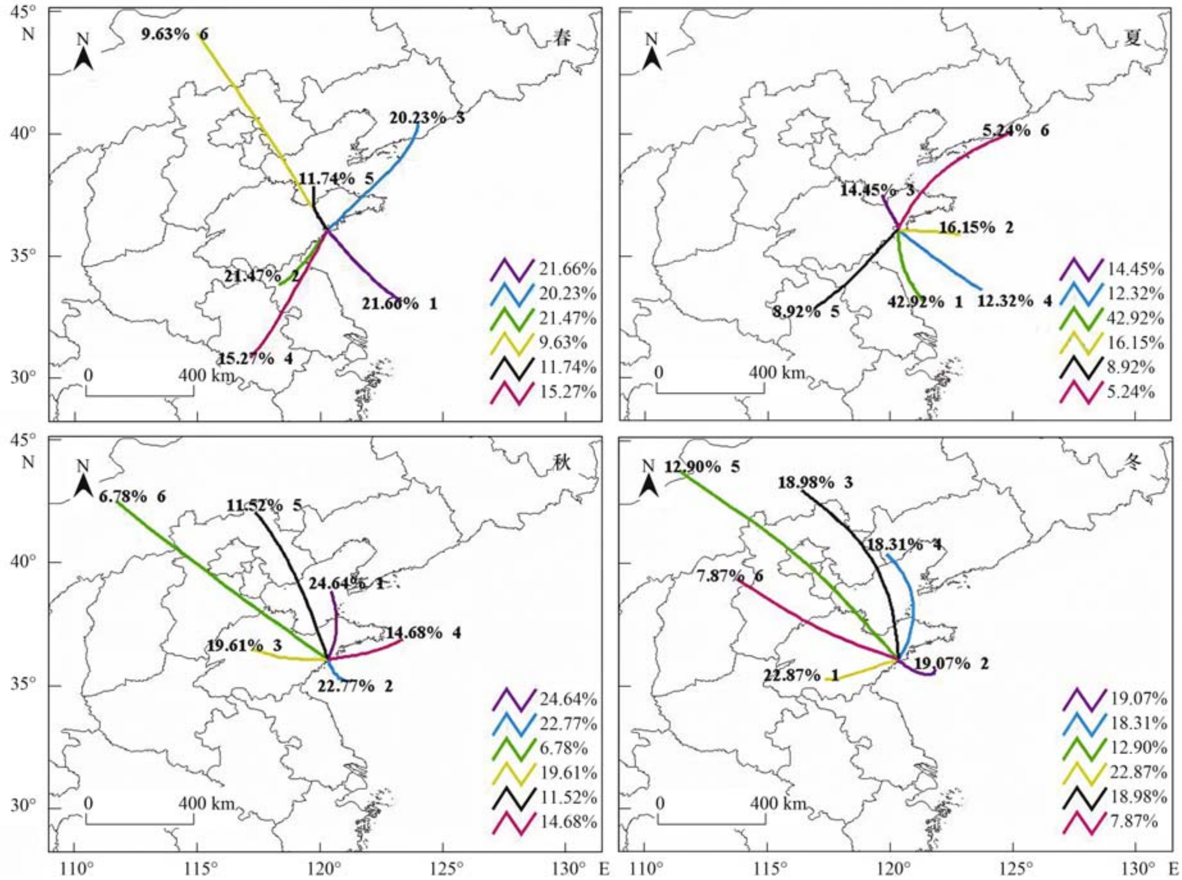


图8 山东青岛 2019 ~ 2020 年后向轨迹聚类分析

Fig. 8 Cluster analysis of backward trajectories from 2019 to 2020 in Qingdao, Shandong

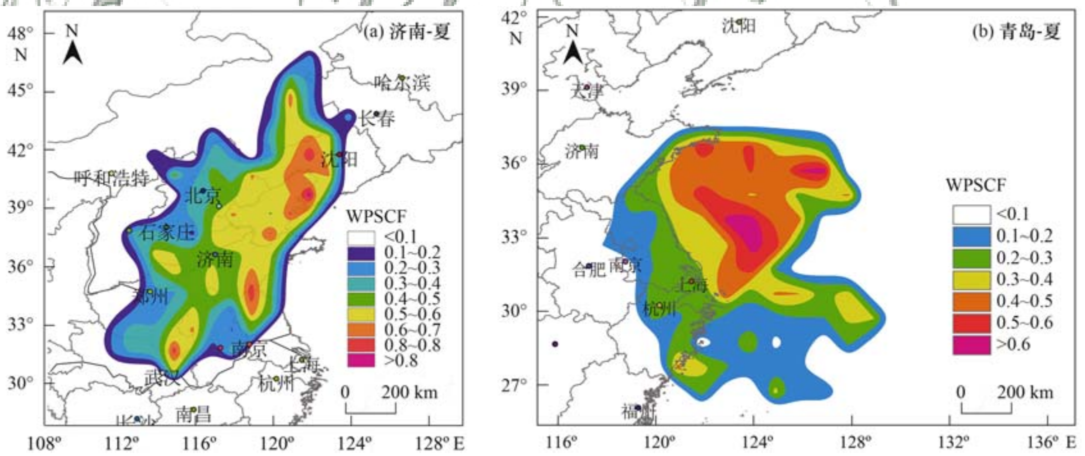


图9 山东半岛 O_3 潜在源 WPSCF 值

Fig. 9 WPSCF value of potential sources of O_3 in Shandong Peninsula

3 结论

(1) 时间格局上，山东地区近地面 O_3 浓度 16 年间年际变化呈现三峰型趋势，于 2010 年出现最大值，为[(40.48 ± 7.64) μg·m^{-3}]，并且 2010 年浓度 O_3 浓度极不稳定. 4 个季节中，$\rho(O_3)$浓度：夏季 > 春季 > 秋季 > 冬季. 夏季 $\rho(O_3)$浓度高，可以达到[(42.49 ± 1.7) μg·m^{-3}].

(2) 空间格局上，2005 ~ 2020 年山东半岛 O_3 浓度随着纬度的升高而逐渐升高，呈现出东西部高，中部低的特征. 2005 ~ 2014 年呈现出济南市、德州市和滨州市等地区浓度较高和菏泽市和济宁市等地区浓度较低的现象，2015 年之后 O_3 浓度高值区向南偏移. 覆盖范围上，济南附近高值区相比于往年有一定程度的扩大，青岛附近的城市群高值范围减少. O_3 浓度 16 a 的演化过程中存在着 1.5 a 的主振荡周期.

(3) O_3 与气象条件分析表明：温度、降水、相

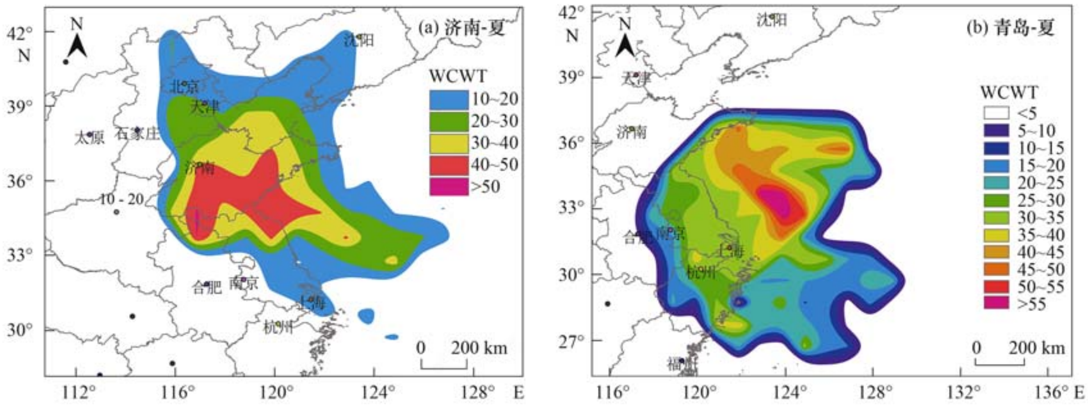


图 10　山东半岛 O_3 潜在源 WCWT 值

Fig. 10　WCWT value of potential sources of O_3 in Shandong Peninsula

对湿度和日照时数与 O_3 呈现正相关,气压和风速与 O_3 呈现负相关,主导气象因子是气温和气压. 除气象要素外,污染来源因素(B2)所占权重为 0.76. 受污染物区域输送影响,烟粉(尘)排放量(D9)为第三指标影响最为明显的因素,所占权重为 0.25.

(4)通过对不同地区（济南和青岛）模拟受点气流输送轨迹发现,不同地区不同季节的气流轨迹与输送路径相差不大,均能反映 O_3 的来源与扩散方向. 中远距离气团传输路径大部分来自西北方向(内蒙古、山西和京津冀地区),小部分来自东南方向(江苏和安徽等地区). 近距离气团传输路径主要来自山东本省地区,其次是渤海和黄海地区. 对夏季济南和青岛的污染源探究,济南潜在源主要分布在辽宁省锦州地区、江苏省北部、湖北省和安徽省交界处. 青岛 O_3 潜在源主要分布在黄海地区.

参考文献：

[1]　Mousavinezhad S, Choi Y, Pouyaei A, *et al*. A comprehensive investigation of surface ozone pollution in China, 2015-2019: separating the contributions from meteorology and precursor emissions[J]. Atmospheric Research, 2021, **257**, doi: 10.1016/j.atmosres.2021.105599.

[2]　韩丽, 陈军辉, 姜涛, 等. 成都市春季 O_3 污染特征及关键前体物识别[J]. 环境科学, 2021, **42**(10): 4611-4620.
Han L, Chen J H, Jiang T, *et al*. Pollution characteristics of O_3 and the key precursors in Chengdu during spring [J]. Environmental Science, 2021, **42**(10): 4611-4620.

[3]　符传博, 徐文帅, 丹利, 等. 2015—2018 年海南省城市臭氧时空分布特征[J]. 环境化学, 2020, **39**(10): 2823-2832.
Fu C B, Xu W S, Dan L, *et al*. Spatiotemporal distribution of ozone in cities of Hainan from 2015 to 2018[J]. Environmental Chemistry, 2020, **39**(10): 2823-2832.

[4]　崔梦瑞, 白林燕, 冯建中, 等. 京津唐地区臭氧时空分布特征与气象因子的关联性研究[J]. 环境科学学报, 2021, **41**(2): 373-385.
Cui M R, Bai L Y, Feng J Z, *et al*. Analysis of temporal and spatial variations of ozone coupling with dynamics of meteorological factors in the Beijing-Tianjin-Tangshan region[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2021, **41**(2): 373-385.

[5]　赵伟, 高博, 卢清, 等. 2006～2019 年珠三角地区臭氧污染趋势[J]. 环境科学, 2021, **42**(1): 97-105.
Zhao W, Gao B, Lu Q, *et al*. Ozone pollution trend in the Pearl River Delta region during 2006-2019 [J]. Environmental Science, 2021, **42**(1): 97-105.

[6]　Fang Z X, Xiao Y H, Sun H X, *et al*. Characteristics of ground-level ozone from 2015 to 2018 in BTH area, China[J]. Atmosphere, 2020, **11**, doi: 10.3390/atmos11020130.

[7]　Zhang A, Lin J H, Chen W H, *et al*. Spatial-Temporal distribution variation of ground-level ozone in China's pearl river delta metropolitan region [J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2021, **18**, doi: 10.3390/ijerph18030872.

[8]　Noreen A, Khokhar M F, Zeb N, *et al*. Spatio-temporal assessment and seasonal variation of tropospheric ozone in Pakistan during the last decade[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2018, **25**(9): 8441-8454.

[9]　曹晓云, 祁栋林, 肖建设, 等. 基于卫星观测的青海高原对流层臭氧时空分布特征研究[J]. 环境科学学报, 2021, **41**(5): 1640-1648.
Cao X Y, Qi D L, Xiao J S, *et al*. Temporal and spatial distribution characteristics of tropospheric ozone in Qinghai plateau based on satellite observations [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2021, **41**(5): 1640-1648.

[10]　付洁, 韦江慧, 何东明, 等. 2015-2019 年广西近地面大气臭氧污染特征分析[J]. 广西科学, 2021, **28**(1): 92-101.

[11]　Zhao Z Z, Zhou Z M, Russo A, *et al*. Impact of meteorological conditions at multiple scales on ozone concentration in the Yangtze River Delta[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2021, **28**(44): 62991-63007.

[12]　Chen X, Zhong B Q, Huang F X, *et al*. The role of natural factors in constraining long-term tropospheric ozone trends over Southern China[J]. Atmospheric Environment, 2020, **220**, doi: 10.1016/j.atmosenv.2019.117060.

[13]　刘楚薇, 连鑫博, 黄建平. 我国臭氧污染时空分布及其成因研究进展[J]. 干旱气象, 2020, **38**(3): 355-361.
Liu C W, Lian X B, Huang J P. Research review on the Spatio-temporal distribution of ozone pollution and its causes in China [J]. Journal of Arid Meteorology, 2020, **38**(3): 355-361.

[14]　乔泽浩, 栾志理, 金光益, 等. 山东半岛城市群区域一体化过程与影响因素研究[J]. 鲁东大学学报(自然科学版), 2021, **37**(1): 89-96.
Qiao Z H, Luan Z L, Jin G Y, *et al*. Regional Integration process and influencing factors of Shandong peninsula urban agglomeration[J]. Journal of Ludong University (Natural Science

Edition), 2021, **37**(1): 89-96.

[15] 张淼, 丁椿, 李彦, 等. 山东省 O_3 时空分布及影响因素分析[J]. 环境科学, 2021, **42**(12): 5723-5735.
Zhang M, Ding C, Li Y, *et al*. Spatial and temporal distribution of ozone and influencing factors in Shandong province [J]. Environmental Science, 2021, **42**(12): 5723-5735.

[16] 刘春秀, 迟雨蕾. 基于 OMI 卫星数据的对流层 O_3 柱总量时空分布特征分析[J]. 北京测绘, 2019, **33**(9): 1006-1010.
Liu C X, Chi Y L. Analysis of temporal and spatial distribution of tropospheric O_3 column amount based on OMI satellite data [J]. Beijing Surveying and Mapping, 2019, **33**(9): 1006-1010.

[17] Hu Y M, Yan H H, Zhang X Y, *et al*. Study on calculation and validation of tropospheric ozone by ozone monitoring instrument-microwave limb sounder over China[J]. International Journal of Remote Sensing, 2020, **41**(23): 9101-9120.

[18] 严加琪, 洪炎, 张磊, 等. 2018 ~ 2019 年全国臭氧时空变化趋势分析[J]. 绿色科技, 2020, (18): 84-85.
Yan J Q, Hong Y, Zhang L, *et al*. Spatial and temporal trend analysis of ozone in China from 2018 to 2020[J]. Journal of Green Science and Technology, 2020, (18): 84-85.

[19] 李菁, 戴竹君, 张鹭. 基于 OMI 数据的南京臭氧总量时空分布特征研究[A]. 见: 第二十四届大气污染防治技术研讨会论文集[C]. 广州: 中国环境科学学会, 2020.

[20] 于瑞新, 刘旻霞, 李亮, 等. 长三角地区近 15 年大气臭氧柱浓度时空变化及影响因素[J]. 环境科学学报, 2021, **41**(3): 770-784.
Yu R X, Liu M X, Li L, *et al*. Spatial and temporal variation of atmospheric ozone column concentration and influencing factors in the Yangtze River Delta region in recent 15 years[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2021, **41**(3): 770-784.

[21] 刘小正, 楼晟荣, 陈勇航, 等. 基于 OMI 数据的中国中东部城市近地面臭氧时空分布特征研究[J]. 环境科学学报, 2016, **36**(8): 2811-2818.
Liu X Z, Lou S R, Chen Y H, *et al*. Spatiotemporal distribution of ground-level ozone in mid-east China based on OMI observations[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2016, **36**(8): 2811-2818.

[22] 郑霞, 胡东滨, 李权. 基于小波分解和 SVM 的大气污染物浓度预测模型研究[J]. 环境科学学报, 2020, **40**(8): 2962-2969.
Zheng X, Hu D B, Li Q. Study on prediction model of atmospheric pollutant concentration based on wavelet decomposition and SVM[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2020, **40**(8): 2962-2969.

[23] 许艺馨, 赵炎, 莫申萍, 等. 基于小波分析大气污染物浓度序列特征研究[J]. 环境科学与管理, 2020, **45**(7): 77-82.
Xu Y X, Zhao Y, Mo S P, *et al*. Analysis of sequence characteristics of atmospheric pollutant concentration based on wavelet[J]. Environmental Science and Management, 2020, **45**(7): 77-82.

[24] 陈志青, 邵天杰, 赵景波, 等. 内蒙古地区近地面臭氧浓度时空分异及主导气象因子探讨[J]. 干旱区研究, 2020, **37**(6): 1504-1512.
Chen Z Q, Shao T J, Zhao J B, *et al*. Spatial-temporal differentiation of near-surface ozone concentration and dominant meteorological factors in inner Mongolia [J]. Arid Zone Research, 2020, **37**(6): 1504-1512.

[25] 张亚青, 王相, 孟凡荣, 等. 基于熵权法和层次分析法的 VOCs 处理技术模糊综合评价——以青岛市为例[J/OL]. 中国环境科学: 1-10. https://doi.org/10.19674/j.cnki.issn1000-6923.20210222.006, 2021-05-14.
Zhang Y Q, Wang X, Meng F R, *et al*. Fuzzy comprehensive evaluation of VOCs processing technology based on entropy weight method and analytic hierarchy process with Qingdao as an example[J/OL]. China Environmental Science: 1-10. https://doi.org/10.19674/j.cnki.issn1000-6923.20210222.006, 2021-05-14.

[26] 刘子龙, 代斌, 崔卓彦, 等. 大气污染物浓度变化特征及潜在源分析——以乌鲁木齐为例[J]. 干旱区研究, 2021, **38**(2): 562-569.
Liu Z L, Dai B, Cui Z Y, *et al*. Concentration characteristics and potential source of atmospheric pollutants: a case study in Urumqi[J]. Arid Zone Research, 2021, **38**(2): 562-569.

[27] 雷雨, 张小玲, 康平, 等. 川南自贡市大气颗粒物污染特征及传输路径与潜在源分析[J]. 环境科学, 2020, **41**(7): 3021-3030.
Lei Y, Zhang X L, Kang P, *et al*. Analysis of transport pathways and potential sources of atmospheric particulate matter in Zigong, in south of Sichuan province[J]. Environmental Science, 2020, **41**(7): 3021-3030.

[28] Ham J, Lee H J, Cha J W, *et al*. Potential source of PM_{10}, $PM_{2.5}$, and OC and EC in Seoul during spring 2016[J]. Atmosphere, 2017, **27**(1): 41-54.

[29] Liu C, Hua C, Zhang H D, *et al*. A severe fog-haze episode in Beijing-Tianjin-Hebei region: characteristics, sources and impacts of boundary layer structure[J]. Atmospheric Pollution Research, 2019, **10**(4). 1190-1202.

[30] 翁佳烽, 梁晓媛, 邓开强, 等. 不同季节肇庆市 $PM_{2.5}$ 和 O_3 污染特征及潜在源区分析[J]. 环境科学研究, 2021, **34**(6): 1306-1317.
Weng J F, Liang X Y, Deng K Q, *et al*. Characteristics and potential sources of $PM_{2.5}$ and O_3 in different seasons in Zhaoqing city[J]. Research of Environmental Sciences, 2021, **34**(6): 1306-1317.

[31] 熊思章, 陈权亮. 青藏高原上空臭氧的时空演变特征[J]. 成都信息工程大学学报, 2020, **35**(6): 671-677.
Xiong S Z, Chen Q L. Temporal and spatial evolution of ozone over the Tibetan plateau[J]. Journal of Chengdu University of Information Technology, 2020, **35**(6): 671-677.

[32] 严茹莎, 王红丽, 黄成, 等. 上海市夏季臭氧污染特征及削峰方案[J]. 环境科学, 2021, **42**(8): 3577-3584.
Yan R S, Wang H L, Huang C, *et al*. Characteristics and control strategies on summertime peak ozone concentration in Shanghai[J]. Environmental Science, 2021, **42**(8): 3577-3584.

[33] 符传博, 周航. 中国城市臭氧的形成机理及污染影响因素研究进展[J]. 中国环境监测, 2021, **37**(2): 33-43.
Fu C B, Zhou H. Research progress on the formation mechanism and impact factors of urban ozone pollution in China[J]. Environmental Monitoring in China, 2021, **37**(2): 33-43.

[34] 欧盛菊, 魏巍, 王晓琦, 等. 华北地区典型重工业城市夏季近地面 O_3 污染特征及敏感性[J]. 环境科学, 2020, **41**(7): 3085-3094.
Ou S J, Wei W, Wang X Q, *et al*. Pollution characteristics and sensitivity of surface ozone in a typical Heavy-Industry city of the north China plain in summer[J]. Environmental Science, 2020, **41**(7): 3085-3094.

[35] 刘旻霞, 孙瑞弟, 宋佳颖, 等. 基于 OMI 数据的新疆地区臭氧柱浓度研究[J]. 中国环境科学, 2021, **41**(4): 1498-1510.
Liu M X, Sun R D, Song J Y, *et al*. Research on ozone column

concentration in Xinjiang based on OMI data [J]. China Environmental Science, 2021, **41**(4): 1498-1510.

[36] 王帅, 崔建升, 冯亚平, 等. 石家庄市挥发性有机物和臭氧的污染特征及源解析[J]. 环境科学, 2020, **41**(12): 5325-5335.
Wang S, Cui J S, Feng Y P, *et al*. Characteristics and source apportionment of VOCs and O_3 in Shijiazhuang [J]. Environmental Science, 2020, **41**(12): 5325-5335.

[37] 钱悦, 许彬, 夏玲君, 等. 2016～2019 年江西省臭氧污染特征与气象因子影响分析[J]. 环境科学, 2021, **42**(5): 2190-2201.
Qian Y, Xu B, Xia L J, *et al*. Characteristics of ozone pollution and relationships with meteorological factors in Jiangxi province [J]. Environmental Science, 2021, **42**(5): 2190-2201.

[38] 汪水兵, 张红, 易明建, 等. 典型城市臭氧污染分布与气象要素间相关性研究[J]. 低碳世界, 2020, **10**(12): 1-3.

[39] 罗瑞雪, 刘保双, 梁丹妮, 等. 天津市郊夏季的臭氧变化特征及其前体物 VOCs 的来源解析[J]. 环境科学, 2021, **42**(1): 75-87.
Luo R X, Liu B S, Liang D N, *et al*. Characteristics of ozone and source apportionment of the precursor VOCs in Tianjin suburbs in summer[J]. Environmental Science, 2021, **42**(1): 75-87.

[40] 杨婧, 朱海斌, 刘建军, 等. 气象条件对银川市区近地面臭氧质量浓度的影响[J]. 干旱气象, 2021, **39**(2): 302-308, 325.
Yang J, Zhu H B, Liu J J, *et al*. Study on the effects of meteorological conditions on ozone mass concentration near surface in Yinchuan[J]. Journal of Arid Meteorology, 2021, **39**(2): 302-308, 325.

[41] 栗泽苑, 杨雷峰, 华道柱, 等. 2013-2018 年中国近地面臭氧浓度空间分布特征及其与气象因子关系的研究[J]. 环境科学研究, 2021, **34**(9): 2094-2104.
Li Z Y, Yang L F, Hua D Z, *et al*. Spatial pattern of surface ozone and its relation with meteorological variables in China during 2013-2018 [J]. Research of Environmental Sciences, 2021, **34**(9): 2094-2104.

[42] 折远洋, 李忠勤, 王芳龙, 等. 秦巴山地西部地区 2015-2018 年大气污染物变化特征及潜在来源分析[J]. 环境科学学报, 2020, **40**(6): 1987-1997.
She Y Y, Li Z Q, Wang F L, *et al*. Variation characteristics and potential source analysis of atmospheric pollutants in west of the Qinling-Daba mountains from 2015 to 2018[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2020, **40**(6): 1987-1997.

[43] 李琴, 刁春燕, 楚碧武, 等. 南方某海滨城市臭氧污染原因解析及控制建议[J]. 环境科学与技术, 2020, **43**(4): 71-78.

[44] 郑冬, 阎守政. 东北沿海城市与其他地区臭氧污染异同分析[J]. 绿色科技, 2021, **23**(10): 150-153.
Zheng D, Yan S Z. A brief analysis of the similarities and differences of ozone pollution in northeast coastal cities and other areas[J]. Journal of Green Science and Technology, 2021, **23**(10): 150-153.

[45] 马伟, 王章玮, 郭佳, 等. 一个沿海城市大气臭氧的本地生成过程及其对前体物的敏感性[J]. 环境科学学报, 2019, **39**(11): 3593-3599.
Ma W, Wang Z W, Guo J, *et al*. Sensitivity of ambient atmospheric ozone to precursor species and local formation process in a coastal city[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2019, **39**(11): 3593-3599.

HUANJING KEXUE

Environmental Science (monthly)

Vol. 43 No. 3

Mar. 15, 2022

CONTENTS