

福建省近 10 年臭氧时空变化: 基于空间信息技术的研究

施益强^{1,2,3}, 赵丁珑^{1,4}, 王翠平^{1,2,3}, 肖钟湧^{1,2,3}, 林晓凤^{1,2,3}, 刘珊红^{1,2,3}

1. 集美大学港口与海岸工程学院地理信息科学系, 厦门 361021

2. 集美大学遥感与地理信息研究中心, 厦门 361021

3. 厦门市绿色与智慧海岸工程重点实验室, 厦门 361021

4. 哈尔滨工程大学青岛创新发展基地海洋信息与系统研究所, 青岛 266404

摘要 基于 OMI 的臭氧(O_3)数据, 运用空间信息技术(GIS、RS)和皮尔森相关分析方法, 分析了福建省 2011—2020 年 O_3 时空变化特征及其与影响因素的相关性。结果表明: 在时序上, 月均值最低为 4 月份 260.10 DU, 最高为 10 月份 283.97 DU, 月际变化呈波浪形态势; 季均值高低依次为秋季、夏季、冬季和春季, 秋季明显高于其他 3 个季节; 年均值波动范围为 265.18~275.09 DU, 最低值出现在 2013 年, 最高值出现在 2014 年; 近 10 年 O_3 总均值为 270.19 DU。在空间上, 月均值在 7~12 月整体分布为相对中高值区, 1~6 月则为相对中低值区; 季均值在秋季分布为相对高值区, 秋夏季纬度变化特征比秋冬季更明显; 年均值在 2013 和 2016 年分布为相对低值区, 2011、2012、2014、2018 年为相对高值区; 近 10 年总均值分布为北部高于南部, 相对高值区主要在宁德市、南平市及福州市北部, 相对低值区主要在漳州市、厦门市及龙岩市和泉州市的南部, 呈南北走向随纬度降低而降低, 东西走向由内陆往沿海升高的总体趋势。在影响因素相关性上, 气温、降水与 O_3 均呈现正负相关性并存, 正相关性主要分布在沿海城市, 负相关性则主要分布在内陆城市, 呈沿海向内陆的较强正相关逐渐变为较强负相关的特征。对于降水与 O_3 , 全省大部分区域表现为负相关; $NDVI$ 也呈现出正负相关性并存现象, 但负相关性所占面积明显高于正相关性, 整体上呈现出较显著负相关性。

关键词 臭氧; 时空变化; 相关性; 臭氧监测仪; 空间信息技术; 福建省

收稿日期: 2022-12-11; 修回日期: 2023-01-25

基金项目: 福建省教育厅科技项目(JAT200270); 福建省自然科学基金青年基金项目(2021J05169)

作者简介: 施益强, 副教授, 研究方向为 GIS 与 RS 技术应用、大气环境遥感, 电子信箱: yqshi_2004@jmu.edu.cn

引用格式: 施益强, 赵丁珑, 王翠平, 等. 福建省近 10 年臭氧时空变化: 基于空间信息技术的研究[J]. 科技导报, 2023, 41(11): 61-69; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2023.11.006

自2013年实施《大气污染防治行动计划》和《打赢蓝天保卫战三年行动计划》以来,国内环境空气质量改善效果明显,空气中 SO_2 、 NO_2 、 PM_{10} 、 $\text{PM}_{2.5}$ 和CO浓度下降明显,尤其是 $\text{PM}_{2.5}$ 污染控制取得显著成效,但臭氧(O_3)污染却呈逐年加重趋势,其防控形势严峻。 O_3 是一种微量气体,主要存在于对流层和平流层^[1-3]。平流层 O_3 能防止高能紫外线辐射到达地面,这对人类和其他生物是有益的。但对流层中高浓度 O_3 却成为了主要大气污染物之一,它会在城市地区造成光化学烟雾,对人类呼吸系统有很强刺激性,影响肺部功能,也会造成白内障等疾病,同时对作物产量和环境产生不利影响。随着经济快速发展以及工业活动增加, O_3 污染已成为了一种普遍而又很难解决的大气污染^[4-5]。获取近地面 O_3 污染最直接和准确的方法是利用现场监测,但由于地面监测站点普遍较少和成本较高,且较难进行长时间连续的大范围监测。随着卫星遥感时空分辨率的提高,其具有经济性和公开性等优势,被越来越多应用于大气 O_3 污染监测。当前基于卫星遥感的 O_3 污染相关研究中,主要围绕于 O_3 遥感反演数据的可靠性、时空分布、污染过程、源汇以及影响机理等方面。如Sousa等^[6]分析了马来西亚婆罗洲地区 O_3 浓度变化特征,发现湿度对 O_3 浓度变化有很大影响;David等^[7]利用臭氧探测仪(OMI)数据分析了印度大陆和海洋上空 O_3 和 NO_2 的时空分布;Hong等^[8]利用OMI估算了东亚大城市总 O_3 浓度,结合地面监测数据得出大城市较低 O_3 浓度通常出现在夏季;Ul-Haq等^[9]通过对 O_3 影响因子进行关联性对比,发现 O_3 前体物种氮氧化物和挥发性有机物对大气 O_3 影响显著。Jin等^[10]和Chang等^[11]探究了北美和中国地区氮氧化物和挥发性有机物对大气中 O_3 浓度的影响,并分析得出其在各自控制区的占比;陈雪萍^[1]利用2007—2017年OMI遥感数据分析了中国西部地区 O_3 整体时空分布,并利用经纬度和地形讨论了 O_3 总浓度分布原因;李菁等^[12]利用OMI和Ziemke数据集对南京市2008—2017年 O_3 时空分布特征进行了反演和统计分析;李紫薇等^[13]利用地面监测与遥感数据,用神经网络、ELM和SVM预测和估计京津唐地区近地表 O_3 浓度,并

系统分析了时间特征、空间分布,以及影响因素与 O_3 浓度关系;戚佩霓等^[14]根据多源遥感数据分析了中国区域 O_3 、 NO_2 和 SO_2 的时空特征;谢静晗等^[15]基于验证后的遥感数据,分析了中国1971—2020年 O_3 总量不同尺度的时空变化特征。

近年来对于福建省区域大气 O_3 污染的研究主要是基于地面监测手段,而针对大气污染遥感,特别是 O_3 遥感解析的相关研究还相对较少。如徐芯蓓等^[16]利用地面观测数据,分析2017年厦门金砖会晤期间人为减排和气象条件变化对 O_3 污染特征的影响;王宏等^[17-18]利用福建省 O_3 小时浓度观测数据,分析 O_3 时空分布规律及其超标的天气成因,利用OMI指数资料与近地面 O_3 浓度数据,研究福建省不同城市 O_3 的Z指数与海温距平指数的相关性^[19];宋佳颖等^[20]基于OMI数据,对2005—2018东南沿海5省大气 O_3 柱浓度数据进行提取分析,探讨了 O_3 时空分布格局及其影响因素;但扬彬等^[21]基于OMI数据,利用 O_3 敏感性指示剂法研究了福建省及其9地市在疫情影响下的不同时间阶段 O_3 敏感性特征及其变化规律。本研究尝试利用OMI反演的 O_3 数据(O_3 柱总量,文中简称 O_3 或 O_3 浓度),运用空间信息技术(GIS、RS)和相关性分析方法,进行福建省2011—2020近10年的 O_3 浓度时空变化特征及其与影响因素的关系研究。

1 资料与方法

1.1 研究区域概况

福建省位于中国东南沿海,与广东、江西、浙江等省相邻,东南侧隔台湾海峡与台湾省相望,陆域介于北纬 $23^{\circ}33'$ ~ $28^{\circ}20'$ 、东经 $115^{\circ}50'$ ~ $120^{\circ}40'$,陆地总面积12.4万 km^2 ,2020年末常住人口为4154万人。福建省位于北回归线附近,气候为亚热带海洋性季风气候,气候区域差异较大,受地形与季风环流的影响,闽东南沿海地区属亚热带气候,而闽东北、闽西和闽北则属中亚热带气候。日照充足,雨量充沛,年均气温 $17\sim 21^{\circ}\text{C}$,平均降雨量1400~2000 mm,是中国雨量最丰富省份之一。森林覆盖率66.8%,连续42年居全国第1。2020年全省国内

生产总值(GDP)为4.39万亿元,比上年增长3.3%。根据福建省环境状况公报(2011—2020年)的数据表明,2015和2016年全省9个设区市中仅龙岩市首要污染物为 O_3 ,2017年则除厦门市和漳州市外,其余7个市均为 O_3 ,2018—2020年连续3年全省9市的首要污染物则均为 O_3 。

1.2 数据来源与处理

O_3 数据来自美国宇航局AURA卫星OMI的Level3数据产品(下载于NASA官方网站)。OMI在太阳同轴轨道上观测,每天扫视地球一次,获取的数据格式为He5(HDF文件),利用HDFView软件进行读取、可视化和分析,获得 O_3 总量数据集。利用MATLAB软件将描绘 O_3 总量的数据提取并以TIFF格式进行存储。针对TIFF格式数据,采用ArcGIS 10.8 Desktop软件进行处理、统计与分析,并结合使用Spyder软件的Arcpy编程语言对 O_3 数据进行批处理(近10年的日数据)。由于OMI传感器自身和大气状况影响,其 O_3 数据产品出现信息丢失现象,若使用直接平均方法会导致年、季和月等的均值产生偏离。本研究采用克里金(Kriging)插值法,其利用已知点数据进行未知区域的估计,得到的估计值与实际数值的差异较小,对整个区域的多用途统计分析非常有益。为保证插值数据的准确性,通过目视判读,剔除完整度小于80%的TIFF图像,以减小对后续处理结果的影响。 O_3 数据总体处理过程为:掩膜TIFF图至研究区域大小,栅格计算器去除异常值,目视判读筛选图像,将数据统一到地理投影中,并在此基础上完成图像像元统计和格式转换等处理,最后根据福建省区划边界掩膜提取研究区全域 O_3 数据^[2, 22-25]。

温度和降水数据来自中国科学院资源环境科学与数据中心。该数据集基于中国各地2400多个气象站的每日观测数据,通过数据收集、数学运算和空间插值得到的,该插值为采用样条平滑函数的多变量数据分析和插值工具(澳大利亚插值程序ANUSPLIN)。在处理数据时,需要将其除以10以转换为标准摄氏度和毫米,然后对数据进行预处理,通过重新投影和掩膜,用时间序列表示平均温度和降水数据,与 O_3 浓度的空间尺度相对应^[20, 26-27];

归一化植被指数(NDVI)数据来自于NASA的MODIS13A3遥感数据,其传感器为EOS-MODIS,空间分辨率为1 km,时间分辨率为月。将所获取的NDVI数据导入MRT(MODIS Reprojection Tool)软件中利用批量处理脚本,进行数据统一投影,并在此基础上完成图像像元统计和格式转换等处理,最后根据福建省区划边界进行掩膜提取NDVI影像数据^[2, 10, 20, 26-27]。

1.3 研究方法

皮尔森(Pearson)相关分析系数是基于2组随机数据之间线性相关程度指数,其变化数值范围在 $[-1, 1]$ 之间,大于零时呈正相关性,小于零时为负相关。2列数据之间相关性趋势大小由相关系数绝对值数值来体现,绝对值越高相关性越强,线性趋势越明显,相关系数越接近0,则线性相关性越弱。通常取绝对值后,规定0~0.3为弱相关,0.3~0.5为较弱相关,0.5~0.8为较强相关,大于0.8为强相关。本文根据福建省 O_3 浓度数据,分析其与NDVI、降水和气温等因素之间的相关性,其计算公式如式(1)所示。

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

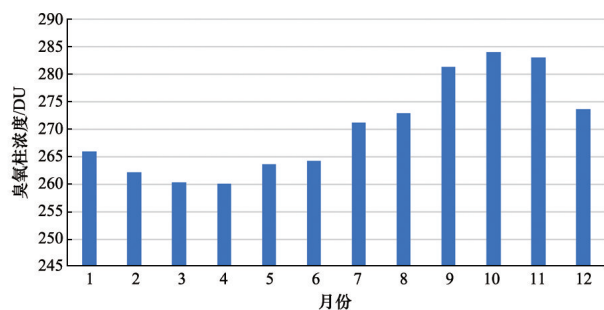
式中, r_{xy} 表示 x 与 y 之间的相关性系数,其值介于-1与1之间; x_i 表示第 i 月/年 O_3 浓度均值(DU), y_i 表示第 i 月/年的降水、气温、植被覆盖指数; $\bar{x}$ 表示 O_3 浓度的各月/年均值, $\bar{y}$ 表示降水、气温、植被覆盖指数的各月/年均值; i 为样本量,以月计算时 $i=120$,以年计算时 $i=10$ 。

2 结果与分析

2.1 O_3 浓度时空变化分析

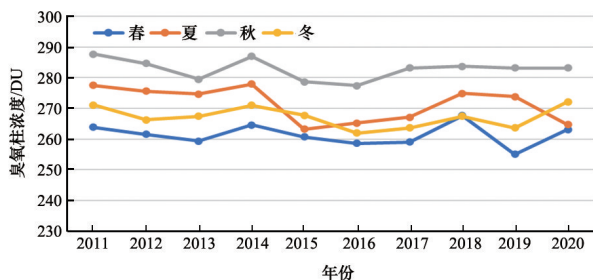
2.1.1 O_3 浓度时序变化

近10年福建省月均 O_3 浓度情况如图1。 O_3 浓度月均值呈先小幅度减小,后明显增加,在10月达到峰值后逐渐减小的态势,总体呈现出正弦曲线波浪形的趋势。4月为全年最低值260.10 DU,10月

图1 福建省2011—2020年O₃浓度月际变化

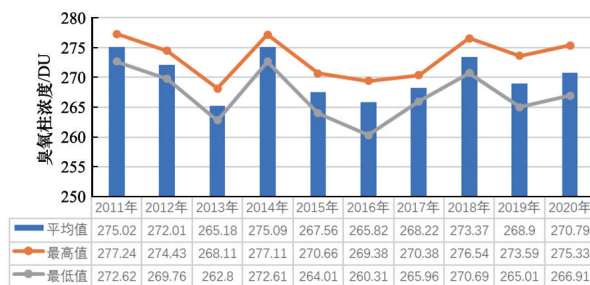
为全年最高值283.97 DU,从4月开始持续上升,直至10月达到最高,从11月开始递减,直至次年4月浓度降到最低;8月到9月出现了全年的最大增幅8.40 DU,11月到12月出现了全年最大降幅9.42 DU。根据常用季节划分,3~5月为春季,6~8月为夏季,9~11月为秋季,12月至次年2月为冬季,可知春季O₃浓度最低,秋季明显高于其他季节,冬季比夏季要略低一些。

季均O₃浓度情况如图2。四季O₃浓度随年份总体上变化不大,整体上呈现出从大到小依次为秋季、夏季、冬季、春季,且秋季明显高于其他3个季节,这与O₃浓度月均值变化规律一致。四季O₃浓度走势较为相似,秋冬季的变化比较平稳,春夏季有明显的上下浮动,在各别年份出现了波动,如夏季在2014—2015年出现较大幅度下降,2014和2015年分别为近10年最高值和最低值;春季在2018—2019年也出现明显下降,在2018和2019年分别为近10年的最高值和最低值;秋季最高值和最低值分别出现在2011和2016年;冬季最高值和最低值出现在2020和2016年。总体上看,季均O₃浓度在2013—2014年明显增长,2014—2015年明显下降,可能与2015年为“十二五”最后1年,全国

图2 福建省2011—2020年O₃浓度季节变化

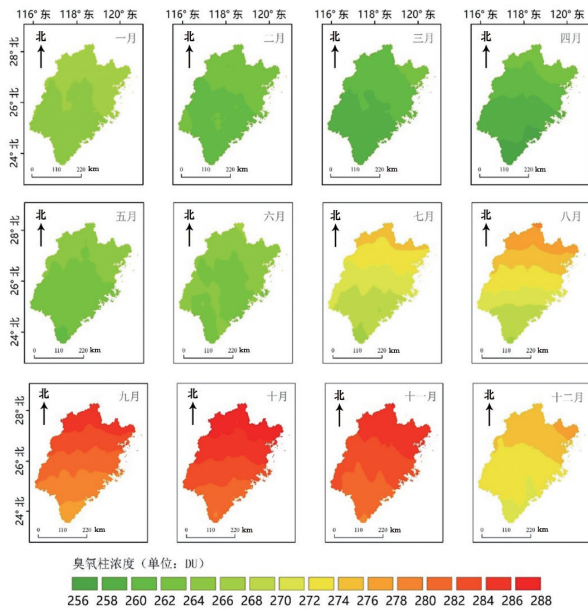
各地环保政策落实到位,O₃污染防治成效较为显著有关。

年均O₃浓度情况如图3。近10年年均值变化不大,总体保持稳定,维持在265.18~275.09 DU间小幅度波动。在2013和2016年出现低值,在2014和2018年出现高值;2011—2013年整体呈现下降趋势,2013年降到265.18 DU,为近10年内最低,2014年相比较2013年呈现陡坡式升高,均值提高约10 DU,达到275.09 DU,为近10年内最高;在2014—2016年间,均值再次下降,从2017年开始,均值再次回升,增长在2018年达到高值,在2019—2020年间则上下波动不大。近10年总均值为270.19 DU,低于该值的年份为2013、2015、2016、2017、2019年,呈现年份时序围绕总均值上下较均匀分布状态。各年份最低值的变化与平均值的变化相似,最高值的变化则相对更加平缓。根据福建省发布的空气质量状况,O₃从2015年开始,逐渐成为各市首要污染物,由于福建省对大气环境质量的重视,且对工业化和城市化出台了一系列措施,由此近10年间其O₃浓度起伏相对较小。

图3 福建省2011—2020年O₃浓度年际变化

2.1.2 O₃浓度空间变化

根据O₃的月、季、年等均值的最大值与最小值,将其浓度值分成3个区间:相对低值区(256~266 DU)、相对中值区(266~274 DU)和相对高值区(274~288 DU)。图4为福建省近10年月均O₃浓度空间分布。总体上看,7~12月的O₃浓度总体偏高,高值区范围较广,特别是9~11月基本都处于高值区。7~12月O₃浓度随纬度变化而变化的特征要比1~6月更加明显;2~4月的O₃浓度很明显为全年最低月份,基本都处于低值区;9~11月为全年浓度最

图4 福建省2011—2020年O₃浓度月际空间分布

高月份,这与前述季节时序变化基本相吻合,也进一步体现了季节性变化的规律。

图5为福建省近10年O₃浓度季均值空间分布。季均值空间分布变化有着明显特征:春季O₃浓度最低,全省O₃分布以相对低值区为主;夏季O₃主要分布为相对中值区,相对于春季,O₃浓度值有所升高;秋季O₃分布均处于相对高值区,是四季中O₃浓度值最高季节;相比秋季,冬季O₃浓度有所下降,与夏季的O₃浓度较为相似,也是主要集中在相对中值区。秋夏季的纬度变化特征比春冬季相对更加明显。

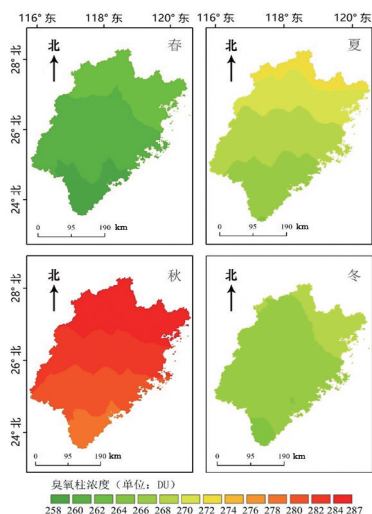
图5 福建省2011—2020年O₃浓度季节空间分布

图6为福建省2011—2020年O₃浓度年均值空间分布。由图6可知O₃浓度各年间存在一定差异,如2011、2012、2014、2018年总体浓度值偏高,主要集中在相对高值区;而2013、2016年总体浓度值偏低,主要集中在相对低值区;2015、2017、2019、2020年则较多出现相对中值区。10年间福建省O₃浓度年均值处于260~277 DU之间,在空间分布上整体相对稳定,浓度高值主要分布在宁德市和南平市的北部,浓度低值主要出现在漳州市南部,与季节性空间分布特征相似,较明显地呈现出各年份以南北走向并随纬度降低而浓度也降低态势。

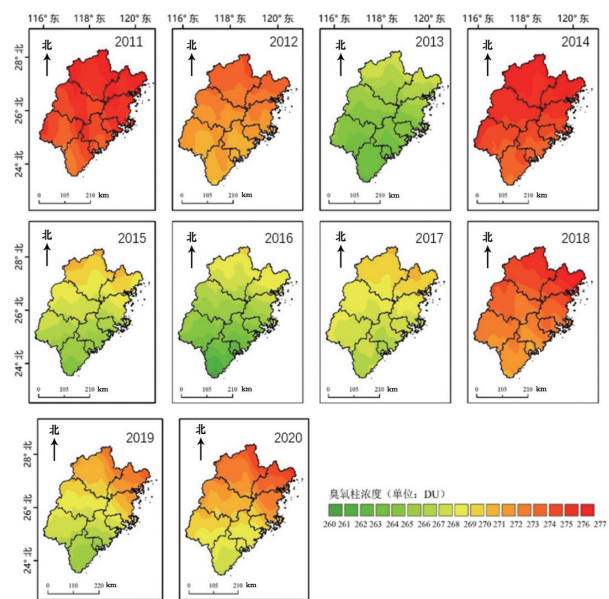
图6 福建省2011—2022年O₃浓度年际空间分布

图7为福建省2011—2020年O₃浓度总体空间分布。总体上看O₃浓度分布差异较为明显,呈现出从北向南逐渐降低的分布规律,与东南沿海O₃浓度空间变化趋势基本吻合^[20,28]。从数值上来看,O₃浓度数值差异并不大(267.12~272.99 DU),均处于相对中值区;浓度较高区域主要分布在宁德市、南平市以及福州市的北部,浓度较低区域主要分布在南部(漳州市,厦门市,以及龙岩和泉州的南部),最大值与最小值仅相差5.87 DU。在同纬度上,沿海区域O₃浓度要比内陆区域O₃浓度高些,但这种差异并不显著。

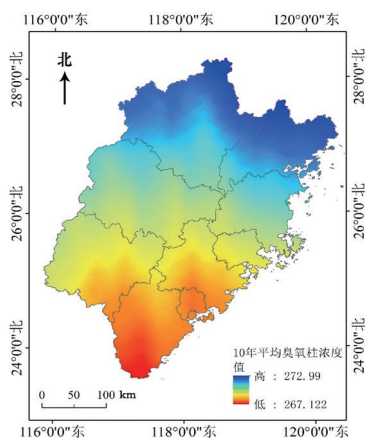


图7 福建省2011—2020年O₃浓度总体空间分布

2.2 O₃影响因子相关性分析

2.2.1 气温与降水对O₃的影响

气象要素在O₃的产生、沉降、传输和稀释中扮演着重要角色。气温升高会加速光化学反应速率,导致O₃浓度升高;在阴天降水时,由于云层厚度增加,吸收更多紫外线辐射,从而影响O₃光化学链式反应发生,进而减少O₃生成;而且水和水蒸气本身也会吸收一定O₃,降低O₃浓度。由此,本研究着重从温度和降水2方面研究其对O₃浓度的影响。

图8为近10年福建省的平均气温、降水与O₃浓度的空间相关情况。在利用皮尔森相关分析法进行O₃、气温和降水数据的相关性分析中(均通过显著性检验 $P<0.05$),为更直观表达,将其相关性划分为4类:绝对值小于0.3为弱相关、0.3~0.5为较弱相关、0.5~0.8为较强相关、大于0.8为强相关。从图9中可知降水、温度与O₃浓度的相关性均表现为正负相关性并存,分布区域相对集中的态势:1) 对

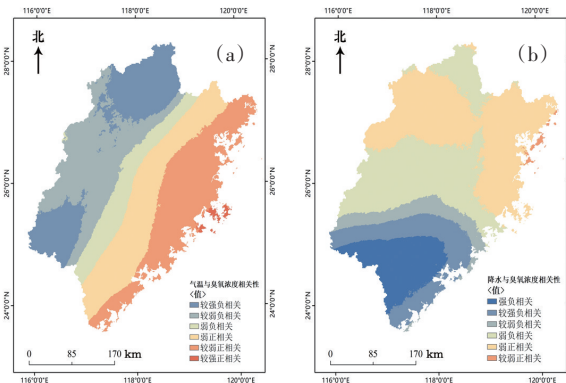


图8 福建省2011—2020年O₃与气温(a)、降水(b)的相关性

于气温,弱正相关性和弱负相关性主要集中分布在福建省中部的东北—西南条带走向的区域;较弱正相关与弱正相关相邻且走向相似,主要分布在沿海区域(该现象与厦门市地面监测O₃和温度的相关性相似^[29]);较强正相关主要分布在东部沿海的局部区域;较弱负相关集中分布在三明市、南平市西南部和龙岩市的东北部;较强负相关主要集中在南平市和龙岩市。总体上,正相关性主要分布在沿海城市,负相关性则主要分布在内陆城市,呈现出由沿海向内陆的较强正相关逐渐变为较强负相关的特征。2) 对于降水,全省大部分区域体现为负相关,弱正相关和较弱正相关主要分布在南平市、三明市、宁德市和福州市。强负相关和较强负相关主要分布在福建省西南部的龙岩市、漳州市、泉州市和厦门市等区域。

2.2.2 NDVI对O₃的影响

植被与O₃的相互作用复杂,植被通过排放挥发性有机物影响O₃生成,也可以通过叶片气孔的吸收参与O₃沉降过程。图9为福建省近10年平均NDVI及其与O₃相关性的空间分布。与气象因子相似,NDVI与O₃浓度也存在正相关性和负相关性,但相关性系数值域更广($P<0.05$,正相关最大值为0.87,负相关最大值为-0.98)。由图9可知,正相关零星分布在部分区域,正相关性区域明显小于负相关性区域,其体现了二者空间相关性总体负相关所占面积较大^[22],正相关性区域仅占总面积的10.39%,主要集中在宁德市、厦门市、福州市等区域,负相关性区域集中于漳州市、南平市、泉州市、

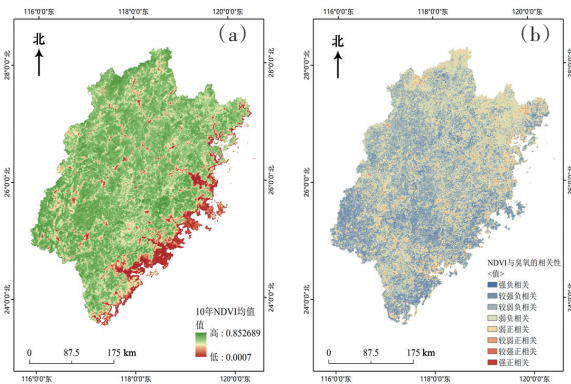


图9 福建省2011—2020年NDVI(a)及其与O₃的相关性(b)

三明市等。整体上呈现出 $NDVI$ 与 O_3 浓度值的较显著负相关性,即植被指数 $NDVI$ 越高, O_3 浓度越低。 O_3 和植被之间是相互依存、相互影响、相互作用的, O_3 挡住了太阳辐射紫外线,对植物起到了保护作用,而在对流层中, O_3 会破坏植物光合作用正常运行,植物覆盖也会对气温、降水等因素产生影响,进而影响到 O_3 浓度。在福州市、莆田市、泉州市、厦门市、漳州市等城市的沿海区域,人口较密集,城市化水平较高, $NDVI$ 相对较低,且由于人类活动、工业活动较多,相较于内陆山区以及植被覆盖较高的区域,其 O_3 浓度与植被的相关性较多表现为负相关。

3 结论

本研究基于 OMI Level3 的 O_3 数据,利用 Arc-GIS、MATLAB 和 python 等软件技术,分析福建省 2011—2020 年 O_3 浓度时空特征及其与影响因素的相关性,主要的研究结果如下。

1) 在时序变化上, O_3 月均值在 4 月份为最低值 260.10 DU, 10 月份达最高值 283.97 DU, 月际总体呈波浪形变化趋势;季均值从高到低依次为秋季、夏季、冬季和春季,秋季明显高于其他 3 个季节,秋季和冬季变化比较平稳,春季和夏季有较明显波动;年均值变化不大,总体保持稳定,波动范围为 265.18~275.09 DU,最低年均值出现在 2013 年,最高年均值出现在 2014 年;近 10 年 O_3 总均值为 270.19 DU。

2) 在空间变化上,月均值在 7~12 月基本分布于相对中高值区。1~6 月则为相对中低值区,其随纬度变化的特征相对更加明显;季均值在春季基本为相对低值区,夏冬季以相对中值区为主,而秋季则为相对高值区,秋夏季纬度变化特征比春冬季更为显著;年均值在 2013 年和 2016 年处于相对低值区,而 2011 年、2012 年、2014 年、2018 年则处于相对高值区;近 10 年总均值分布体现为北部高于南部,相对高值区主要分布在宁德市、南平市及福州市的北部,相对低值区主要在漳州市、厦门市及龙岩和泉州的南部,呈现南北走向随纬度降低而降

低,东西走向沿海比内陆升高的总体态势。

3) 在影响因素相关性上,气温、降水和 O_3 均呈现正负相关性并存,分布区域相对集中的态势,正相关性主要分布在沿海城市,负相关性则主要分布在内陆城市,呈现沿海向内陆的较强正相关逐渐变为较强负相关的特征;对于降水,全省大部分区域表现为负相关; $NDVI$ 也呈现出正负相关性并存现象,但负相关性所占面积明显高于正相关性(仅占总面积的 10.39%),整体上呈现出 $NDVI$ 与 O_3 浓度的较显著负相关性。

OMI 数据应用于大气环境污染研究,具有较好实用价值,但其存在一些数据缺失,导致数据并非十分完整,使得本研究受到一定限制,可考虑进一步利用更完善的插值方法,辅与多源遥感数据进行补充,并与地面观测数据进行校验,提高数据精度。由于长时间序列数据处理量大,如何利用效率更高且人为干预更少的批处理方法也是值得思考的。由于 O_3 影响因素众多且相互作用过程复杂,可综合更多影响因子进行更加深入的相关性数值模式研究,以探究更全面的 O_3 影响机理。

致谢: 本研究数据来自 NASA 和中国科学院资源环境科学与数据中心。

参考文献(References)

- [1] 陈雪萍. 基于卫星遥感的中国西部地区臭氧总量分布特征及其成因分析[D]. 兰州: 西北师范大学, 2019.
- [2] 马明亮. 对流层臭氧时空分析影响因素研究及近地面臭氧估算[D]. 上海: 华东师范大学, 2019.
- [3] 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.
- [4] Ainsworth E A, Carmo-silva E. Editorial overview: Harnessing genetic variation in metabolic traits to understand trait evolution and improve the sustainability of crop production[J]. Current Opinion in Plant Biology, 2019, 49: 1–3.
- [5] Nuvolone D, Petri D, Voller F. The effects of ozone on human health[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2018, 25(9): 8074–8088.
- [6] Sousa S I V, Martins F G, Pereira M C, et al. Influence of

- atmospheric ozone, PM_{10} and meteorological factors on the concentration of airborne pollen and fungal spores[J]. *Atmospheric Environment*, 2008, 42(32): 7452–7464.
- [7] David L M, Nair P R. Tropospheric column O_3 and NO_2 over the Indian region observed by ozone monitoring Instrument (OMI): Seasonal changes and long-term trends [J]. *Atmospheric Environment*, 2013, 65: 25–39.
- [8] Hong H, Lee H, Kim J, et al. First comparison of OMI-DOAS total ozone using ground-based observations at a megacity site in East Asia: Causes of discrepancy and improvement in OMI-DOAS total ozone during summer[J]. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 2014, 119(16): 10058–10067.
- [9] Ul-Haq Z, Tariq S, Rana A D, et al. Satellite remote sensing of total ozone column (TOC) over Pakistan and neighbouring regions[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2015, 36(4): 1038–1054.
- [10] Jin X M, Holloway T. Spatial and temporal variability of ozone sensitivity over China observed from the ozone monitoring instrument[J]. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 2015, 120(14): 7229–7246.
- [11] Chang C Y, Faust E, Hou X T, et al. Investigating ambient ozone formation regimes in neighboring cities of shale plays in the Northeast United States using photochemical modeling and satellite retrievals[J]. *Atmospheric Environment*, 2016, 142: 152–170.
- [12] 李菁, 戴竹君, 李正金, 等. 基于卫星观测的南京臭氧时空分布及变化特征[J]. *生态环境学报*, 2019, 28(10): 2012–2019.
- [13] 李紫微. 京津唐地区近地面臭氧反演与时空分布特征分析[D]. 西安: 西安科技大学, 2021.
- [14] 戚佩霓. 多源卫星遥感分析中国区域污染气体特征[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2021.
- [15] 谢静晗, 李飒, 肖钟湧. 50年来中国臭氧总量的时空变化特征研究[J]. *中国环境科学*, 2022, 42(7): 2977–2987.
- [16] 徐芯蓓, 刘涛涛, 徐玲玲, 等. 2017年厦门金砖会晤期间人为减排和气象条件变化对臭氧污染特征的影响[J]. *环境科学学报*, 2020, 40(12): 4380–4389.
- [17] 王宏, 陈晓秋, 余永江, 等. 福州近地层臭氧分布及其与气象要素的相关性[J]. *自然灾害学报*, 2012, 21(4): 175–181.
- [18] 王宏, 蒋东升, 谢祖欣, 等. 福建省近地层臭氧时空分布与超标天气成因[J]. *中低纬山地气象*, 2018, 42(1): 1–6.
- [19] 王宏, 郑秋萍, 温珍治, 等. ENSO循环对福建省近地层臭氧浓度变化的影响[J]. *热带气象学报*, 2021, 37(2): 145–153.
- [20] 宋佳颖, 刘旻霞, 孙瑞弟, 等. 基于OMI数据的东南沿海大气臭氧浓度时空分布特征研究[J]. *环境科学学报*, 2020, 40(2): 438–449.
- [21] 但扬彬, 于瑞莲, 卞雅慧, 等. 基于OMI数据的新冠疫情影响下福建省臭氧敏感性变化[J]. *中国环境科学*, 2021, 41(5): 2056–2063.
- [22] 李阳. 基于OMI数据的中国臭氧时空分布及影响因素分析[D]. 兰州: 西北师范大学, 2020.
- [23] 卢秀娟. 基于OMI卫星数据的甘肃省臭氧时空分布及影响因素分析[D]. 兰州: 西北师范大学, 2018.
- [24] 陈雪萍, 咸龙, 巨天珍, 等. 基于OMI的宁夏臭氧时空分布特征及影响因素研究[J]. *生态与农村环境学报*, 2019, 35(2): 167–173.
- [25] 孙雷. 华北地区近地面臭氧长期变化特征及影响因素研究[D]. 济南: 山东大学, 2019.
- [26] 杜君平, 朱玉霞, 刘锐, 等. 基于OMI数据的中国臭氧总量时空分布特征[J]. *中国环境监测*, 2014, 30(2): 191–196.
- [27] 郭云飞, 包云轩, 刘端阳. 基于卫星和地面观测的中国典型城市群对流层内臭氧时空变化特征[J]. *环境科学研究*, 2022, 35(3): 719–730.
- [28] 苏静明, 洪炎, 唐超礼, 等. 基于OMI的中国区域2005–2020年间臭氧柱总量随经纬度变化特性研究[J]. *大气与环境光学学报*, 2021, 16(6): 495–503.
- [29] 庄马展. 厦门一次典型臭氧污染过程与成因分析[J]. *环境科学与技术*, 2022, 45(9): 118–125.

Investigating spatial-temporal variabilities of ozone over Fujian province in recent decade using spatial information technology

SHI Yiqiang^{1,2,3}, ZHAO Dinglong^{1,4}, WANG Cuiping^{1,2,3}, XIAO Zhongyong^{1,2,3}, LIN Xiaofeng^{1,2,3}, LIU Shanhong^{1,2,3}

1. Department of Geographic Sciences of College of Harbour and Coastal Engineering, Jimei University, Xiamen 361021, China

2. Research Center of Remote Sensing and Geo-Information, Jimei University, Xiamen 361021, China

3. Xiamen Key Laboratory of Green and Smart Coastal Engineering, Xiamen 361021, China

4. Institute of Marine Information and Systems, Qingdao Innovation Development Base, Harbin Engineering University, Qingdao 266404, China

Abstract Based on OMI data product, the spatio-temporal variabilities characteristics of ozone column concentration and its correlation with influential factors in Fujian province are analysed using spatial information technology and Pearson correlational analysis method for the period of 2011 to 2020. The results show that the lowest monthly average value was 260.10 DU in April and the highest 283.97 DU in October. The monthly change was wavy, the order of seasonal mean values was autumn, summer, winter and spring, with autumn being obviously higher than the other three.. The variation range of annual average values was 265.18–275.09 DU, the lowest in 2013 and the highest in 2014, and the total mean value of ozone in recent 10 years was 270.19 DU. In terms of spatial distribution, monthly averages were generally distributed as a relatively high value area from July to December and as a relatively low value area from January to June. The spatial distribution of the mean values in autumn was in a relatively high area, and latitude changes in autumn and summer were more obvious than those in spring and winter. The spatial distributions of average annual values in 2013 and 2016 were in the relatively low value areas, while 2011, 2012, 2014 and 2018 in relatively high value areas. In the recent ten years, the distribution of the total mean values in the north was higher than that in the south, and the relatively high value areas were mainly in Ningde City, Nanping City and the north of Fuzhou City, while the relatively low value areas were mainly in Zhangzhou City, Xiamen City, and the south of Longyan City and Quanzhou City. The overall trend of distribution of ozone was that the ozone values decreased with the decrease of latitude in the north-south orientation, and it rose from inland areas to coastal areas in the east-west orientation. In terms of correlation of ozone with the influencing factors, temperature and precipitation presented both positive correlation and negative correlation, with positive correlation mainly distributed in coastal cities while negative correlation mainly in inland cities, presenting the characteristics of strong positive correlation gradually changed into strong negative correlation from coastal to inland. For precipitation and ozone, most regions showed negative correlation. The NDVI also showed the coexistence of positive and negative correlations but the area of negative correlation was significantly larger than that of positive correlation, showing a significant negative correlation on the whole.

Keywords O₃; spatio-temporal change; correlation; OMI; spatial information technology; Fujian province ●



(责任编辑 祝叶华)