

黄巾旗,廖国莲,黄子航,等.2022年贵港市臭氧潜在源区及传输路径季节特点分析[J].气象研究与应用,2024,45(3):117-120.
HUANG Ji-qi, LIAO Guolian, HUANG Zihang, et al. Analysis of the seasonal characteristics of potential ozone source areas and transmission pathways in Guigang in 2022[J]. Journal of Meteorological Research and Application, 2024, 45(3): 117-121.

2022年贵港市臭氧潜在源区及传输路径季节特点分析

黄巾旗¹, 廖国莲^{2*}, 黄子航³, 零绍珑¹, 王盛繁¹

(1.贵港市气象局, 广西 贵港 537100; 2.广西壮族自治区气象台, 南宁 530022;
3.广西壮族自治区气象科学研究所, 南宁 530022)

摘要:为了揭示贵港市2022年臭氧(O_3)不同季节的传输规律和污染来源,利用MeteoInfo软件后向轨迹模式,结合 O_3 小时浓度数据,对2022年贵港市各季节500 m高度逐日72 h后向轨迹进行深入分析,并使用潜在源区贡献分析法(PSCF)和浓度权重轨迹分析法(CWT)对贵港市 O_3 的潜在贡献源区和贡献大小进行研究。结果表明:①贵港市各季节近地层大气污染输送以长距离输送为主,东北方向的长距离输送对 O_3 浓度影响最大。②河南、湖北、湖南及广西贵港周边地区是主要的 O_3 潜在源区,秋季的潜在源区范围最广。③贵港市 O_3 污染来源为区域传输和本地排放,区域传输以河南、湖北、江西、湖南的贡献较大,本地污染受贵港北部影响较显著。

关键词: O_3 ; 后向轨迹; 聚类分析; 潜在源贡献因子; 浓度权重轨迹

中图分类号:P49

文献标识码:A

doi: 10.19849/j.cnki.CN45-1356/P.2024.3.18

大气污染不仅受本地排放^[1-2]的影响,还与周边地区的传输密切相关^[3-4]。为了探究大气污染的区域传输和扩散规律,众多学者采用后向轨迹模式^[5-6]、潜在源贡献^[7-8](PSCF)分析和浓度权重轨迹^[9-10](CWT)分析等方法。其中,后向轨迹模式较为简单,应用较为广泛,可以用来追溯污染物的来源^[11-12]。但后向轨迹分析无法量化区域传输影响的贡献程度。为了解决这一问题,学者们引入WPSCF和WCWT分析,通过输入观测资料进行同化,初步量化区域传输的贡献。赵恒等^[13]、王茜等^[14]、王芳等^[15]通过后向轨迹方法对香港、上海、珠三角等区域颗粒物大气输送和扩散进行研究。高阳等^[16]利用后向轨迹模式(HYSPLIT-4)、潜在源贡献(PSCF)分析方法以及浓度权重轨迹(CWT)分析法对豫南地区冬季 $PM_{2.5}$ 来源和传输进行分析,研究表明豫南地区 $PM_{2.5}$ 轨迹路径主要来自西北和东北方向的长距离输送和正南方向的短距离输送,PSCF分析表明

近距离和长距离均存在大贡献源区,CWT表明豫南地区 $PM_{2.5}$ 浓度值除了本地排放外,西北和东北方向的传输也很重要;张凤等^[17]利用后向轨迹模式和潜在源贡献估算方法分析重庆市东南地区一次罕见的 $PM_{2.5}$ 污染过程来源,气流轨迹表明短轨迹和闭合环流轨迹更有利于 $PM_{2.5}$ 的累积,造成重度污染。PSCF分析表明此次 $PM_{2.5}$ 污染源贡献主要来源于重庆东北地区 and 主城区的传输,占比32.7%,其次为本地排放占比26.4%。孔珊珊等^[18]对北京市 $PM_{2.5}$ 来源分布进行分析,结果表明影响北京 $PM_{2.5}$ 的路径有6类,其中来自山东、河南交界的两类轨迹对北京 $PM_{2.5}$ 影响较大,是主要潜在源区。莫雨淳等^[19]分析广西一次重大污染过程污染物来源,发现跨区域输送是此次污染的重要原因之一。

后向轨迹模式在污染物的传输研究中应用广泛,但大部分学者主要将其用于颗粒物来源方向的研究,而对臭氧污染来源的研究相对较少。臭氧污

收稿日期:2024-01-07

基金项目:广西气象科研项目(桂气科2020Z04、桂气科2024M23)、中国气象局预报员专项项目(CMAYBY2020-097)、广西气象局创新团队项目

第一作者:黄巾旗(1985-),高级工程师,主要从事中短期天气预报工作。E-mail:cuithjq@163.com

*通讯作者:廖国莲(1982-),硕士,正高级工程师,主要从事环境气象预报及研究工作。E-mail:liuxi623@163.com

染具有局地性和区域性传输的特征^[20],不仅受本地污染源的影响,还受到外来臭氧传输和沉降以及臭氧前体物的二次生成等影响。近年来,贵港市的大气污染从颗粒物污染转为臭氧污染,因此本文旨在将后向轨迹模式引入对臭氧传输的研究中,结合臭氧小时浓度数据,揭示贵港市臭氧输送的季节轨迹聚类 and 潜在源区特征,定量确定臭氧周边传输贡献率,为制定臭氧污染防治政策提供科学支撑,也为周边城市大气污染联防联控提供重要科学依据。

1 数据与方法

1.1 数据

本文所用 O_3 质量浓度数据为贵港 3 个国控站 O_3 的逐小时浓度值(数据来源广西壮族自治区贵港市生态环境局),取其平均值代表贵港整体 O_3 浓度。后向轨迹模式使用的气象资料为美国国家环境预报中心(NCEP)全球预报系统(GFS)模型系统提供的全球资料同化系统(GDAS)数据,时间段为 2022 年 1 月 1 日—12 月 31 日,空间分辨率为 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$,时间分辨率为 6 h。

1.2 方法

本文基于 MeteoInfo 软件中 TrajStat 功能的后向轨迹模型,对贵港市 2022 年逐日 00:00—23:00 的 72 h 后向轨迹进行模拟,将贵港市($23.05^\circ N$, $109.5667^\circ E$)作为模拟受点,轨迹模拟起始高度为 500 m,因为 500 m 高度风场能较为准确地反映大气边界层内的平均气流特征^[21];使用潜在源区贡献分析法(PSCF)和浓度权重轨迹分析法(CWT),结合 O_3 小时质量浓度数据与后向轨迹,对贵港市 O_3 的潜在贡献源区和贡献大小进行分析。

研究方法^[16]包括:

(1)后向轨迹聚类分析:采用欧拉距离算法,按季节将后向轨迹聚类,识别出不同季节的气流运动类型。

(2)潜在源区贡献分析法(PSCF):通过计算每个网格内污染气流轨迹端点数与总轨迹端点数的比值(PSCF_{ij}),并引入经验权重系数 W_{ij} 来降低不确定性,得到加权后的 WPSCF_{ij} 值,以判断污染的可能源区分布。

(3)浓度权重轨迹分析法(CWT):在 PSCF 基础上,CWT 进一步考虑污染轨迹在网格内的停留时间和对应的 O_3 浓度,通过计算每个网格的权重浓度 CWT_{ij},并同样应用权重函数 W_{ij} 进行修正(WCWT_{ij}),以定量评估不同潜在污染源对目标网

格的相对污染贡献。

2 结果与分析

2.1 后向轨迹分析

为了分析区域传输对贵港市不同季节臭氧(O_3)的影响以及不同轨迹的污染特征,本研究利用 MeteoInfo 软件中的 TrajStat 后向轨迹模型,对 2022 年各个季节的轨迹进行聚类分析。本研究根据气象自然季节划分标准,春季为 3—5 月、夏季 6—8 月、秋季 9—11 月、冬季 12 月、1—2 月。通过聚类分析,各个季节的轨迹均被聚类为 4 类。

春季:偏东气流轨迹占主导地位,占比高达 60.0%。长距离的偏东气流占 22.4%,起源于台湾海峡,轨迹较长,表明气团移动速度较快;短距离的偏东气流占 37.6%,主要起源于珠三角地区,轨迹较短,表明气团移动较慢。此外,温暖潮湿的南海偏南气流占 18.1%,而冷空气南下的偏北气流轨迹占 21.9%,轨迹较长,表明来自北方的偏北气团移动速度较快。这些轨迹特征与广西的春季气候特征相符,因为冷暖气流在春季都较为活跃。

夏季:夏季的轨迹呈现较为一致的偏南到东南气流,且主要以长距离输送为主,这也符合广西夏季盛行偏南暖湿气流的气候特征。

秋季:主要以东北气流与偏东气流轨迹为主。其中,东北气流占 40.3%,属于长距离输送,主要以台风外围东北下沉气流为主。而偏东气流的一部分来自温暖潮湿的南海和台湾海峡的长距离输送,占 24.5%,另一部分的短距离输送则主要来自广东西北部,占 35.2%。

冬季:贵港市以东北方向、偏北以及西北方向的轨迹为主,其中短距离的西北气流轨迹占比高达 65.0%。

基于每天的后向轨迹对应的 O_3 质量浓度和后向轨迹聚类分析结果,本研究计算每条轨迹对应的 O_3 平均值、 O_3 污染轨迹及其污染平均浓度,以表征各类轨迹来源对贵港市 O_3 浓度水平的影响。各类轨迹的分布特征及对应的 O_3 浓度、超标轨迹情况详见表 1。

由表 1 可知,春季出现污染的轨迹为 1、3 和 4,总占比 6.4%,平均污染浓度为 $173 \mu g \cdot m^{-3}$ 。其中轨迹 1 出现占比最大 2.9%,但污染轨迹中平均浓度最高($180 \mu g \cdot m^{-3}$)为轨迹 3。轨迹 1 和轨迹 3 均为长距离输送,而轨迹 4 较短,表明移动较慢,风速较小,气象扩散条件稳定,容易将沿途的 O_3 或 O_3 前体物输送

到贵港,并在贵港聚集;春季贵港O₃污染主要由于短距离的输送(轨迹1)或长距离的O₃输送(轨迹3、4)及前体物造成的二次反应生成的累积。

夏季仅轨迹3出现污染,占比0.6%,平均污染浓度为168 μg·m⁻³。由于轨迹3出现频率较大,在轨迹3出现污染轨迹经过的区域O₃含量较高或O₃前体物合成O₃的可能性较大。其他方向的轨迹未出现过污染情况,均为长距离输送,说明该方向的风速较大,扩散条件较好或气团比较干净。

秋季污染轨迹为1、2、3号轨迹,总占比21.2%,平均污染浓度为180 μg·m⁻³。其中,1号轨迹占比最大,为12.4%。这种状况为秋季台风外围下沉气流影响下,高温晴热干燥的天气条件利于O₃的生成和堆积。2号轨迹的污染平均浓度最高,达到189 μg·m⁻³。而2号轨迹较短,风速较小,不利于O₃的扩散和稀释,并有可能将沿途的O₃或O₃前体物输送到贵港并在贵港聚集或二次生成。3号轨迹污染概率为3.1%,平均污染浓度为176 μg·m⁻³,表明该路径对贵港O₃污染天气有一定的影响。

冬季所有轨迹均未出现过污染。这是由于冬

季气温较低,不利于O₃的生成,且冷空气能加快O₃污染物的扩散。

2.2 潜在源区及其贡献

2.2.1 潜在源区

在贵港市臭氧污染的研究中,我们运用潜在源区贡献分析法(PSCF)对贵港O₃的潜在贡献源区进行深入分析。对2022年所有的后向轨迹对应的网格内计算WPSCF值。这些值表示贵港市臭氧浓度超标时,来自这些地区的可能性。颜色越深,表示WPSCF值越大,意味着这些地区的气团对贵港O₃浓度影响的可能性更大。

从500 m高度72 h后向轨迹聚类分布可以看出几个明显的特点:①春季:潜在源区主要集中在湖北、湖南、台湾海峡沿岸,以及贵港市北侧的区域。这可能是因为这些地区的气候条件有利于臭氧的产生和传输,同时,结合春季聚类轨迹的特点,上述源区与3号、4号、1号轨迹重合,增加臭氧传输至贵港市的概率。②夏季:潜在源区转到越南南部、南海、海南岛一带,以及贵港市东北侧的区域。这可能是由于夏季高温、日照强烈的气候条件促进该区

表1 不同季节各类轨迹的区域特征

季节	类型	途径区域	出现频率 /%	ρ(O ₃) /μg·m ⁻³	污染轨迹 /条	污染ρ(O ₃) /μg·m ⁻³	污染轨迹 占比/%
春季	1	台湾海峡、广东沿海及西部、广西东南部	22.4	54	14	173	2.9
	2	南海、海南、广东湛江、广西东南部	18.1	34	/	/	/
	3	河南、湖北、湖南、广西北部 and 东部	21.9	73	8	180	1.7
	4	广东(珠三角、肇庆)、广西(玉林)	37.6	54	14	165	1.7
	总			54	36	173	6.4
夏季	1	越南东部、海南、广西东南部	41.5	46	/	/	/
	2	越南东部、海南、广东西部广西东南部	2.9	40	/	/	/
	3	南海、海南、广东西部、广西东南部	53.9	55	4	168	0.6
	4	越南东部、南海、广东西部、广西东南部	1.7	68			
	总			51	4	168	0.6
秋季	1	河南、湖北、江西、湖南、广西北部 and 东部	40.3	101	101	175	12.4
	2	广东西部、广西东部	35.2	67	43	189	5.7
	3	台湾海峡、广东(东部沿海、珠三角、西部)、广西东部	23.6	64	14	176	3.1
	4	南海、广东西部、广西东南部	0.9	37	/	/	/
	总			67	158	180	21.2
冬季	1	广西北部	65.0	51			
	2	云南、广西西北部 and 东部	7.0	55			
	3	江西、广东、广西东部	24.4	58	/	/	/
	4	内蒙、宁夏、陕西、湖北、湖南、广西东部	3.6	65			
	总			57			

域的臭氧生成和传输。③秋季:潜在源区有所变化,主要集中在河南、江西以及湖南中部等地。这个结果可能反映秋季复杂的气候条件,如副高北抬控制下的高温晴热、秋季台风外围下沉气流影响等,这些都可能影响到臭氧的生成和传输。大值区范围较大,表明这些地区对贵港市臭氧浓度的影响可能性较大。④冬季:冬季潜在源区与春季基本一致,这可能反映季节性气候条件的一致性。然而,冬季的WPSCF值较春季小,且大值范围也较春季小,这可能与冬季气温低、日照时间短等气象条件不利于臭氧生成有关。

2.2.2 潜在源区贡献

利用WCWT方法对贵港 O_3 潜在污染源的相对污染贡献进行分析,发现以下特点:

①春季:WCWT高值区主要集中在湖北、湖南及来宾等地。这表明这些区域最有可能是贵港市 O_3 的贡献区。这与春季轨迹聚类分析的结果相一致,特别是路径3所表征的东北方向的 O_3 或 O_3 前体物向贵港方向扩散、沉降的结论。此外,在广东沿海也存在一定的WCWT大值,这与春季轨迹聚类分析中路径1和4对贵港市 O_3 污染有一定的贡献的分析结果相一致。

②夏季:WCWT的主要贡献区域位于贵港北部、南海一带,其中贵港北部贡献最大。这与贵港市夏季盛行东南到偏南气流的气象条件有关,有利于 O_3 的输送和二次生成。

③秋季:河南、湖北、湖南、江西等地对贵港市 O_3 浓度的贡献度最大,WCWT强度呈现出四季中的最强,覆盖范围也最大。秋季WCWT大值区与WPSCF大值区基本重合,说明上述地区是贵港 O_3 污染的潜在源区。秋季副高控制、秋季台风外围下沉气流等大范围稳定性天气形势控制着河南、湖北、湖南、江西等地,有利于上述地区 O_3 的生成与堆积。结合聚类轨迹,WCWT大值区与秋季01号路径对应较好,当气团沿着这些轨迹经过上述潜在源区时,容易携带高浓度污染物导致污染发展^[22]。

④冬季:WCWT数值总体下降,仅在湖南北部、河南南部以及江西西部局部出现贡献高值。这可能与这些区域的局地 O_3 浓度大值区远程传输有关。冬季气温较低、冷空气频繁的气象条件不利于 O_3 的生成和传输,因此整体WCWT值较低。

3 结论

(1)贵港的后向轨迹聚类分析表明,每个季节

都得到4类不同的轨迹,除了春季、秋季和冬季各有1条短距离输送的轨迹外,其余均为长距离输送。秋季来自东北方向的长距离输送轨迹出现的污染次数最多。而污染浓度最大的轨迹为秋季东北方向的短距离输送轨迹,这表明该方向的污染源对贵港的臭氧浓度影响最大。

(2)利用PSCF方法对贵港的臭氧(O_3)浓度进行分析,发现秋季的潜在源区范围最为广泛,且WPSCF值较大。而冬季的WPSCF值和范围均为四季中最小。其中,河南、湖北、湖南以及贵港周边地区是主要的潜在源区,这些地区的气团对贵港臭氧浓度的影响可能性更大。

(3)利用CWT方法对贵港市臭氧浓度进行分析,贵港的潜在源贡献被分为两类。第一类是来自河南、湖北、江西、湖南等地区的长距离输送,第二类是贵港北部地区的近距离输送。应当注意防范这两类路径给贵港带来的臭氧输送以及沉降影响。

参考文献:

- [1] 黄诗洪,和凌红,潘润西,等.广西2020年2月一次大气污染过程分析[J].气象研究与应用,2021,42(2):95-99.
- [2] 郑凤琴,高晋徽,罗晓莉,等.北部湾经济区工业排放对广西二氧化硫浓度分布影响的数值模拟[J].气象研究与应用,2017,38(1):82-86,173-174.
- [3] 张志刚,高庆先,韩雪琴,等.中国华北区域城市间污染物输送研究[J].环境科学研究,2004(1):14-20.
- [4] 张成昊.我国重点城市群之间大气污染传输影响关系研究[D].北京:中国石油大学,2021.
- [5] 唐毅,陈治翰,罗治华,等.后向轨迹模式在攀枝花市PM_{2.5}来源分析研究中的应用[J].四川环境,2016,35(04):83-89.
- [6] 龚玺,裴韬,孙嘉,等.时空轨迹聚类方法研究进展[J].地理科学进展,2011,30(5):522-534.
- [7] 秦阳,胡建林,孔海江.不同天气形势对南京地区双高污染的输送及潜在源区分析[J/OL].环境科学:1-13[2023-09-26].
- [8] 张子祎,刘保双,孟赫,等.青岛市港口区域PM_{2.5}污染特征及来源解析研究[J].环境科学学报,2022,42(11):293-307.
- [9] 代武俊,周颖,王晓琦,等.典型输送通道城市冬季PM_{2.5}污染与传输变化特征[J].环境科学,2024,45(1):23-35.
- [10] 王治非,王在峰,吕晨,等.济南市冬季大气污染时空分布特征及潜在污染源区分析[J].山东科学,2023,36(4):114-121.
- [11] 李煜姗,阙志萍,曹瑜,等.2015~2019年江西省大气污

- 染物时空分异特征及潜在来源分析[J]. 四川环境, 2022, 41(6):67-75.
- [12] 刘慧, 夏敦胜, 陈红, 等. 2017年兰州市大气污染物输送来源及传输特征模拟分析[J]. 环境科学研究, 2019, 32(6):993-1000.
- [13] 赵恒, 王体健, 江飞, 等. 利用后向轨迹模式研究 TRACE-P 期间香港大气污染物的来源[J]. 热带气象学报, 2009, 25(2):181-186.
- [14] 王茜. 利用轨迹模式研究上海大气污染的输送来源[J]. 环境科学研究, 2013, 26(4):357-363.
- [15] 王芳, 陈东升, 程水源, 等. 基于气流轨迹聚类的大气污染输送影响[J]. 环境科学研究, 2009, 22(6):637-642.
- [16] 高阳, 韩永贵, 黄晓宇, 等. 基于后向轨迹模式的豫南地区冬季 PM_{2.5} 来源分布及传输分析[J]. 环境科学研究, 2021, 34(3):538-548.
- [17] 张凤, 李振亮. 渝东南典型城区冬季一次罕见的 PM_{2.5} 污染过程及溯源分析[J]. 中国环境监测, 2023, 39(5):95-104.
- [18] 孔珊珊, 刘厚凤, 陈义珍. 基于后向轨迹模式的北京市 PM_{2.5} 来源分布及传输特征探讨[J]. 中国环境管理, 2017, 9(1):86-90.
- [19] 莫雨淳, 廖国莲, 潘润西. 广西一次大气重污染过程的气象条件分析[J]. 气象研究与应用, 2017, 38(2):14-17.
- [20] 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.
- [21] 龙启超, 陈军辉, 廖婷婷, 等. 乐山市 2016 年冬季颗粒物重污染过程与输送路径及潜在源区[J]. 环境科学研究, 2019, 32(2):263-272.
- [22] 武威, 单铁良. 基于后向轨迹的秋冬季漯河重污染输送及典型个例分析[J]. 气象与环境学报, 2022, 38(3):65-74.

Analysis of the seasonal characteristics of potential ozone source areas and transmission pathways in Guigang in 2022

HUANG Jiqi¹, LIAO Guolian^{2*}, HUANG Zihang³, LING Shaolong¹, WANG Shengfan¹

(1. Guigang Meteorological Bureau, Guangxi Guigang 537100, China; 2. Guangxi Meteorological Observatory, Nanning 530022, China; 3. Guangxi Institute of meteorological Sciences, Nanning 530022, China)

Abstract: To reveal the transmission patterns and pollution sources of Ozone (O₃) in Guigang City in different seasons of 2022, this study uses the MeteoInfo backward trajectory mode, combined with the hourly concentration data of O₃, to conduct an in-depth analysis of the daily 72-hour backward trajectories at a height of 500 m for each season in Guigang City in 2022. The Potential Source Contribution Function (PSCF) analysis method and Concentration Weighted Trajectory (CWT) analysis method are used to identify the potential contribution source area and contribution size of O₃. The results show that: (1) the near-surface atmospheric pollution transport in Guigang in different seasons is dominated by long-distance transport, and the long-distance transport in the north-east direction has the greatest impact on O₃ pollution concentration. (2) Henan, Hubei, Hunan, and Guangxi Guigang and its surrounding areas are the main potential source areas of O₃, with the widest range of potential source area in autumn. (3) The sources of O₃ pollution in Guigang City are regional transport and local emissions, with regional transport contributing more from Henan, Hubei, Jiangxi and Hunan, and local pollution being more significantly affected by northern Guigang.

Key words: ozone; backward trajectory mode; cluster analysis; Potential Source Contribution Function; Concentration Weighted Trajectory