

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.202011030



广东省气溶胶时空演变及后向轨迹分析

牟维, 涂平, 梁娟珠

(福州大学数字中国研究院(福建), 福建 福州 350003)

摘要: 以广东省 2010—2019 年中分辨率成像光谱仪(MODIS)气溶胶产品为数据源,对广东省近 10 a 的气溶胶光学厚度(AOD)进行时空演变趋势探索 and 空间异质性分析. 通过历史空气质量监测数据,筛选出东莞市典型气溶胶粒子污染事件,并对其进行 3 个高度上的大气污染物 72 h 后向轨迹分析. 结果表明:在时间上,近 10 a 广东省气溶胶变化总体上呈现下降和不变的趋势;而在空间上,主要呈现“北低南高”的分布特征,自相关性显著. 后向轨迹表明,广东省所受到的大气污染源来自不同的高度层,受到台风和季风的影响,以及受到海洋和陆地气溶胶共同作用.

关键词: 大气污染; 气溶胶光学厚度; MODIS; 时空演变; 后向轨迹; 广东省

中图分类号: X 513(265); TP 79 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-5013(2021)06-0800-09

Analysis of Spatial-Temporal Evolution and Backward Trajectory of Aerosols in Guangdong Province

MU Wei, TU Ping, LIANG Juanzhu

(Academy of Digital China (Fujian), Fuzhou University, Fuzhou 350003, China)

Abstract: The 2010—2019 moderate-resolution imaging spectroradiometer (MODIS) aerosol products of Guangdong Province were used to explore the temporal and spatial evolution trend and spatial heterogeneity analysis of the aerosol optical depth (AOD) of Guangdong Province in the past 10 years. Based on historical air quality monitoring data, typical aerosol particle pollution events in Dongguan City were screened out, and the 72 hours backward trajectory analysis of atmospheric pollutants at 3 altitudes was performed. The results showed that: in the past 10 years, the aerosol changes in Guangdong Province showed a downward and unchanged trend in general. In terms of space, it mainly presented the distribution characteristics of "low north and high south", with significant autocorrelation. The backward trajectory showed that the air pollution suffered by Guangdong Province comes from different altitudes, which is affected by typhoons and monsoons, and by the combined effects of ocean and land aerosols.

Keywords: air pollution; aerosol optical depth; MODIS; temporal-spatial evolution; backward trajectory; Guangdong Province

气溶胶通常指悬浮在大气中的各种粒径为 0.01~100 μm 的固、液体颗粒共同组成的多相体系^[1]. 气溶胶对人类身体健康^[2]、地气收支平衡^[3]都有着一定的影响. 气溶胶光学厚度(aerosol optical depth, AOD)是大气气溶胶重要的光学属性,也是确定气溶胶含量和评估大气污染程度的关键参数^[4]. 探究某地区长时间序列的 AOD 时空演变有助于了解该地区大气污染状况,进而为提出合理的应对政策提供一定的科学依据.

收稿日期: 2020-11-13
通信作者: 涂平(1973-),男,副研究员,主要从事环境遥感和政务大数据应用研究. E-mail: tuping@263.net.
基金项目: 国家自然科学基金面上资助项目(41771423);福建省科技计划重点资助项目(2018Y0054)

广东省作为我国经济最繁荣、人均 GDP 名列前茅的省份之一，第二、第三产业发达，但高速发展的城市建设进程和工农业生产活动给大气中排放了不少气溶胶粒子^[5]。我国在区域 AOD 的时空演变已经有了一些研究成果^[6-8]，但关于广东省这样的沿海地区却相对较少。对广东省 AOD 的研究使用的多是分辨率较低的数据产品^[9-10]，难以精确地反映其地形地貌的复杂多样，以及城市排布紧密地区 AOD 的精细分布和连续变化。目前，常用线性（如一元线性回归^[8]和 Sen's slope^[11]等）和非线性（如广义最小二乘法（GLS）^[12]等）方法来进行气溶胶时空演变趋势分析，而对于长时序数据多采用线性方法来探究其趋势性。空间自相关法已被广泛运用于大气气溶胶的地理分布特征分析研究^[7,13]。广东省地形条件复杂，运用该方法能有效反应出广东省气溶胶分布的空间异质性。现有的利用 HYSPLIT 模型进行广东省个别气溶胶粒子污染事件污染源的分析^[14-15]，主要集中在从某一时刻到另一时刻的短期变化，缺乏动态连续演变过程的揭示，且综合、系统地进行近 10 a 广东省典型气溶胶粒子污染事件对大气污染物传输来源的研究也较少。

基于此，本文通过对分辨率成像光谱仪（moderate-resolution imaging spectroradiometer, MODIS）遥感产品进行一元线性回归趋势和空间自相关分析，确定广东省全局和局部的 2010—2019 年气溶胶的时空演变特征，并针对典型大气污染事件进行 3 个高度上的大气污染物 72 h 后向轨迹分析。

1 数据与方法

1.1 数据来源及预处理

选取 2010—2019 年广东省 AOD 产品数据（MOD04_3K）为依据，空间和时间分辨率分别为 3 km 和 1 d，获取自 NASA 官网（<https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/>）。通过 IDL+ENVI 进行波段提取、几何校正、批量镶嵌和裁剪以及提取有效值，获取到 550 nm 波段的广东省逐日气溶胶数据，并在此基础上进行后续的处理。数字高程模型（DEM）来自地理空间数据云（<http://www.gscloud.cn/>）SRTMDEM 90M 分辨率原始高程数据。因本次研究仅针对广东省，故不包含澳门、香港及附近岛屿。

1.2 研究方法

1.2.2 一元线性回归分析 为获取 AOD 的时间发展变化趋势，对 10 a 的年均值 AOD 数据进行一元线性回归趋势分析。通过比较 AOD 随着时间变化的回归斜率（ S ）与 0 的关系来判定其变化趋势：当 S 为正，表明此像元 AOD 呈增长趋势；当 S 为 0，表明此像元 AOD 无明显变化趋势；而当 S 为负，表明此像元 AOD 呈缩小趋势^[8]。具体计算公式如下

$$S = \left[n \times \sum_{i=1}^n ix_i - \sum_{i=1}^n i \sum_{i=1}^n x_i \right] / \left[n \times \sum_{i=1}^n i^2 - \left(\sum_{i=1}^n i \right)^2 \right]. \tag{1}$$

式(1)中： i 为 2010—2019 年的年序列号； x_i 为第 i 年的 AOD 值。

1.2.3 相关性分析 空间自相关性可分为全局空间自相关和局部空间自相关两个等级的度量指标。文中利用全局自相关方法（Moran's I ）来反应广东省气溶胶全局空间相关性。1948 年，Moran 提出全局指数^[16]，用于反映空间中邻接或邻近的区域单元属性值的相似程度，其计算公式为

$$I = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \mathbf{W}_{i,j} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x}) / \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \right] \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \mathbf{W}_{i,j}. \tag{2}$$

式(2)中： x 为单元的数量，是 AOD 栅格数据逐像元转换为矢量面要素所对应的数量； x_i, x_j 分别为单元 i, j 的年均 AOD 值； \bar{x} 为所有单元的 AOD 平均值； $\mathbf{W}_{i,j}$ 为单元 i, j 的空间权重矩阵，本次研究使用 ArcGIS 中默认的方式生成空间权重矩阵。Moran 指数的取值范围为（-1，+1），小于零的值表示负相关，等于零的值表示无相关，大于零的值表示正相关。

选用局部自相关性来反应广东省气溶胶的高值或低值的局部空间集聚性。通常分为四种类型：高高（HH）聚集，表示该区域的 AOD 值与周围的 AOD 值均相对较高；低低（LL）聚集，表示表示该区域的 AOD 值与周围的 AOD 值均相对较低；高低（HL）聚集，表示该地区 AOD 高值主要是由低值围绕；低高聚集（LH），表示该地区 AOD 低值主要是由高值围绕^[7]。其计算公式为

$$I_i = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \mathbf{W}_{i,j} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x}) / \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \right]. \tag{3}$$

式(3)中: I_i 为局部自相关指数.

1.2.4 HYSPLIT 模型 拉格朗日混合单粒子轨道模型(hybrid single particle Lagrangian integrated trajectory model, HYSPLIT)^[17],由美国海洋大气管理局(NOAA)和澳大利亚气象局(BOM)联合研发,主要用于大气污染和有害物质传输和扩散轨迹的计算与分析^[18],已有 30 多年的发展历史.常见的应用为污染物和有害物质的后向轨迹分析^[19-20]和它们传播、扩散及沉积的模拟^[21].目前,HYSPLIT 仍是大气科学界最普遍使用的大气输送和扩散模式中的一种.

为探究远距离大气污染输送对广东省大气污染物的影响,以东莞为起始点,利用美国国家环境预测中心(NCEP)全球资料同化系统(global data assimilation system, GDAS)提供的全球大气同化产品和 HYSPLIT 模型(<https://www.ready.noaa.gov/index.php>)^[22],对东莞市典型大气污染事件中大气污染物在 3 个不同高度(100,500 和 1 000 m)上进行 72 h 后向轨迹分析,以此追溯气溶胶的源头.

2 试验结果与分析

2.1 时间变化特征

为清楚地显示广东省 2010—2019 年这 10 a 间 AOD 值的总体变化趋势,选用线性回归直线对这 10 a 的 AOD 年均值进行分析,从而得到 10 a 的变化趋势图,如图 1 所示.从图 1 可知:广东省 2010—2019 年 AOD 值变化总体上呈现下降的趋势.从图 1 可知:分段来看,广东省 2010—2014 年间 AOD 值呈上升趋势,其中峰值出现在 2014 年,为 0.654 6;而 2014—2019 年则有一个明显的下降趋势,年平均谷值出现在 2018 年,为 0.370 2,其中 2015—2019 年全省 AOD 年均值一直保持在较低值波动.这一变动应该是与 2014—2017 年广东省开展大气污染防治行动,使得大气环境得到有效改善有关.

利用一元线性回归趋势分析,能具体反映广东省 2010—2019 年 AOD 值的变化情况.通过自然断点法对计算所得的趋势分析结果 S 值进行分级,分级结果如表 1 所示.表 2 中: S 为回归斜率; A 为面积; γ 为面积占比.近 10 a 广东省的 AOD 值年际变化趋势,如图 2 所示.

表 1 不同趋势值所占面积及其百分比

Tab. 1 Areas and percentages of different trend values

S	演变趋势	A/km^2	$\gamma\%$	总体趋势	总计/ $\%$
$-0.087\ 06\sim-0.029\ 44$	明显减少区	6 485.64	3.63	减少区	44.66
$-0.029\ 44\sim-0.019\ 31$	少量减少区	73 268.21	41.03		
$-0.019\ 31\sim0$	基本不变区	96 957.11	54.29	不变区	54.29
$0\sim0.010\ 45$	少量增加区	1 331.24	0.75	增加区	1.05
$0.010\ 45\sim0.074\ 40$	显著增加区	545.84	0.31		

从图 2 可知:广东省 2010—2019 年这 10 a 来绝大多数地区是呈不变的趋势,其面积占全省面积的 54.29%,主要分布在广东省东部;其次是减少区域,面积占全省面积的 44.66%,以广东省中西部地区为主,东部的河源市、梅州市也有部分减少区域;最后,呈增加趋势的 AOD 值出现在极少区域,面积仅占全省的 1.05%,主要分布在汕头市和潮州市接壤的区域、部分珠三角地区及粤西南部沿海区域.由此可见,近 10 a 广东省气溶胶变化主要呈减少和不变趋势,这种变化分布在全省大部分区域,一定程度上反映出广东省大气污染防治措施有效改善了大气环境质量.

2.2 空间分布特征

广东省的城市分布主要有粤东、粤北、粤西及珠三角.其中粤东包括汕头市、潮州市、揭阳市、汕尾市;粤西包括湛江市、茂名市、阳江市、云浮市;粤北包括韶关市、清远市、梅州市、河源市;珠三角包括广

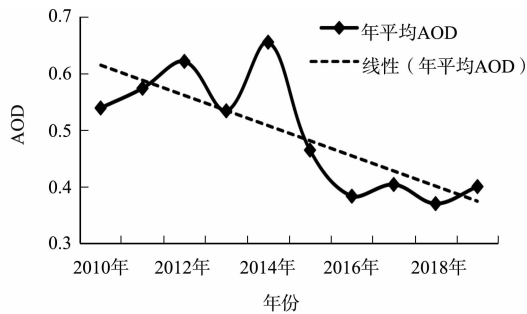


图 1 广东省 AOD 年均值波动变化及趋势
Fig. 1 Fluctuation and trend of annual average value of AOD in Guangdong Province

州市、深圳市、佛山市、东莞市、中山市、珠海市、江门市、肇庆市、惠州市. 2010—2019 年广东省 AOD 的多年平均值, 如图 3 所示.

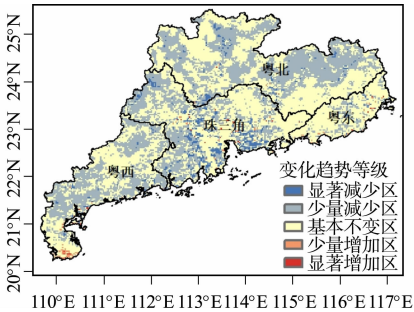


图 2 2010—2019 年广东省 AOD 值线性回归趋势
Fig. 2 Linear regression trend of AOD in Guangdong Province from 2010 to 2019

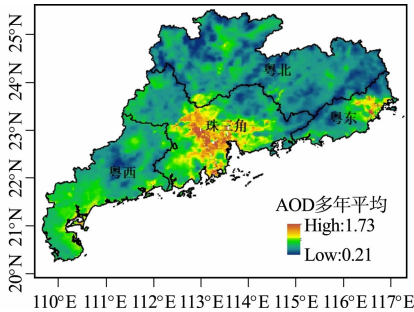


图 3 2010—2019 年广东省的 AOD 多年平均值
Fig. 3 Multi-year average of AOD in Guangdong Province from 2010 to 2019

从图 3 中可知: 广东省 AOD 值分布具有较强的空间性. 从总体分布上看, 主要呈现“北低南高”的分布特征, 广东省 AOD 值的分布特征与该地区地形起伏有着莫大的关系. 受到地形的限制, 北部和东部地区阻挡了来自太平洋的海风, 将大气污染物滞留在广东省南部和东部地势低的地区. 具体而言, AOD 高值主要集中在珠三角, 以及粤东的潮州市、汕头市和揭阳市, 这些地方同时也是广东省的经济发达区、人口集中地和城市发展区, 侧面反映人类活动与 AOD 值之间有着密不可分的联系.

对广东省 10 a 间年均 AOD 值进行全局自相关分析, 结果如表 2 所示. 表 2 中: I 为全局自相关指数; Z 为检验统计量. 从表 2 可知: 2010—2019 年间, 广东省 AOD 值的 Moran's I 均具有较高的结果, 表明这 10 a 间, 广东省全省 AOD 值空间分布呈现较显著的相关性. 从每个分区来看, 粤北的全局指数又较粤东、粤西和珠三角地区更高, 表明粤北的 AOD 值相关性更为显著; 粤东地区的 Moran's I 普遍较低, 表明粤东地区的 AOD 值相关性较其他 3 个区域而言显著性略低. 检验统计量 Z 得分均为正, 表明 AOD 集中高值和低值在广东省的空间分布在空间聚类上的程度要远高于预期.

表 2 广东省 2010—2019 年 AOD 值全局自相关系数

Tab. 2 Moran's I of AOD in Guangdong Province from 2010 to 2019

年度	广东省		粤北		粤东		粤西		珠三角	
	I	Z	I	Z	I	Z	I	Z	I	Z
2010 年	0.61	813.59	0.84	107.27	0.64	65.40	0.75	96.57	0.72	190.76
2011 年	0.62	823.41	0.89	113.76	0.65	100.36	0.87	83.32	0.78	125.19
2012 年	0.58	775.23	0.88	112.35	0.76	63.55	0.77	73.55	0.74	144.30
2013 年	0.62	841.52	0.85	109.14	0.57	87.53	0.71	68.24	0.76	147.21
2014 年	0.64	858.23	0.89	115.67	0.70	57.93	0.78	75.48	0.75	183.71
2015 年	0.62	838.39	0.87	111.33	0.77	63.90	0.81	77.80	0.75	144.67
2016 年	0.58	771.84	0.86	112.10	0.65	66.23	0.78	75.07	0.69	197.55
2017 年	0.52	684.62	0.86	109.48	0.60	50.10	0.80	77.39	0.71	110.00
2018 年	0.64	850.81	0.91	114.29	0.68	55.63	0.77	73.40	0.79	124.55
2019 年	0.51	674.13	0.80	100.94	0.66	66.24	0.73	69.94	0.63	117.45

局部相关性分析能更具体地了解该地区局部聚集与发散的情况, 更详细地描述其空间分布状况. 对广东省 2010—2019 年 AOD 值做局部相关性分析, 结果如图 4 所示. 从图 4 可知: 广东省 2010—2019 年这 10 a 间的 AOD 值显著局部自相关的分布区域主要为三种类型: 高高聚集、低低聚集和不显著区域, 并具有明显的空间异质性. 其中, 年平均面积占比最大的为不显著区域(NS), 达到了 39.80%; 其次, 近 10 a 内 AOD 值的局部集聚类型面积占比较高的是高高聚集和低低聚集, 平均面积占比分别达到了 36.45% 和 21.67%. 高高聚集主要连续且成片地分布在珠三角地势较低的平原, 而低低聚集主要成片分布在粤北, 零星的分布在粤西和粤东, 均为地势较高的山区. 低矮地势大气污染物不易扩散, 造成积累, 而高山地势相较平原和盆地不易大气污染物滞留. 因此, 广东省 AOD 高高聚集和低低聚集的分布与地势起伏有着较为明显的负相关性.

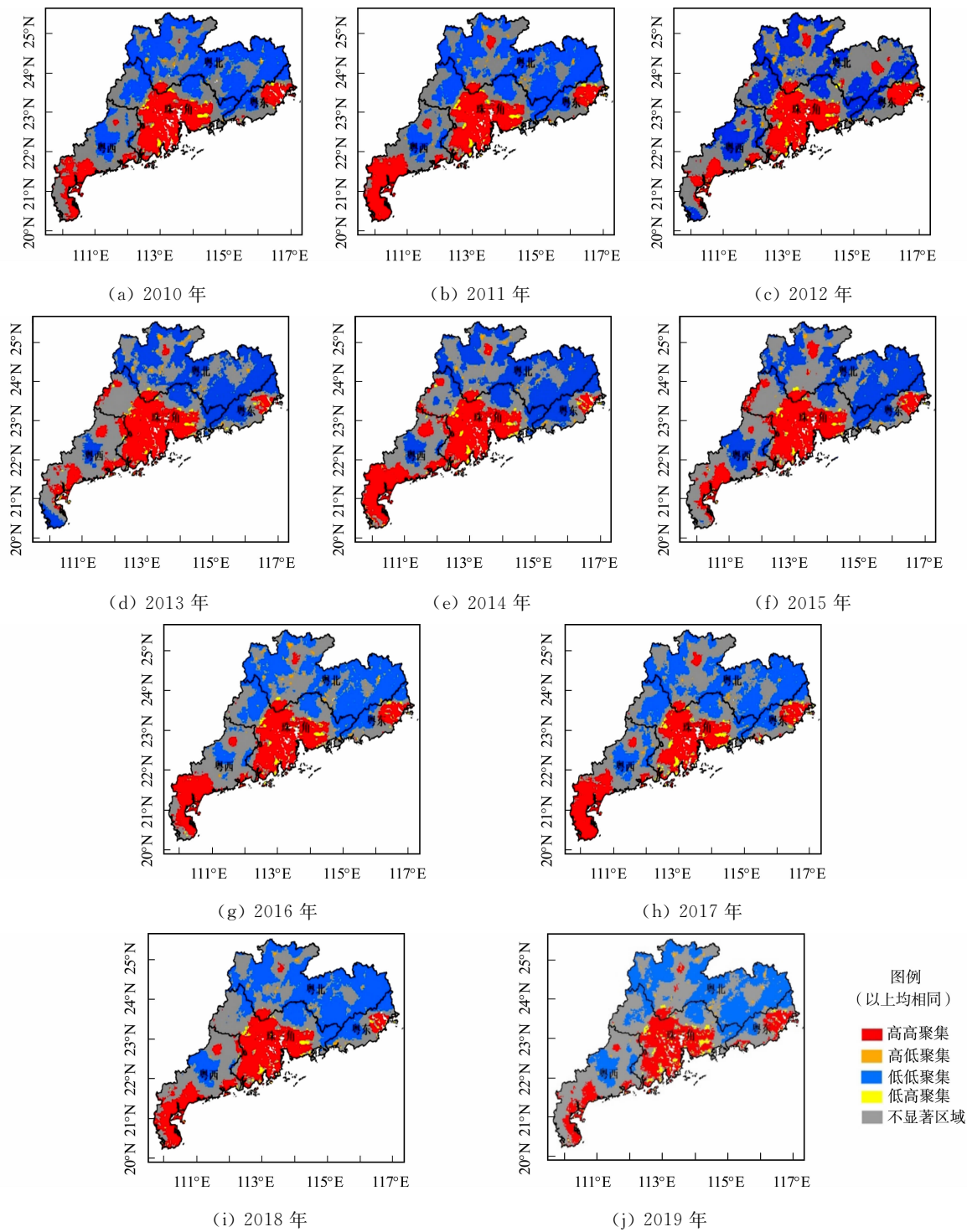


图 4 广东省 2010—2019 年 AOD 值局部相关性聚集类型

Fig. 4 Types of local Moran's I of AOD in Guangdong Province from 2010 to 2019

广东省各个区域的集聚特征和变化程度也大不相同. 对广东省各个区域的局部自相关类型进行面积统计,结果如图 5 所示. 图 5 中: γ 为面积占比. 从图 5 可知:粤北地区主要以低低聚集为主要局部聚集类型,平均占粤北地区面积的 59.37%,较为均衡地分布在粤北地区,以先减小后增大的趋势变化着. 粤东地区主要以不显著区域为主,其次是低低聚集,年平均面积占比分别为 41.10%和 36.32%,占据了该地区的大部分面积,不显著区域变化均衡,低低聚集总体则以先增大后减小的趋势变化. 粤西地区的 AOD 值局部聚集类型中不显著区域占比较高,除此以外的局部聚集类型占比均较低,其中高高聚集和 低低聚集年平均占比分别达到粤西地区面积的 27.44%和 17.07%. 珠三角地区则以高高聚集为主,年平均面积占比达到 45.08%,主要分布在珠江三角洲平原,总体变化趋势为先增大后减小;该地区不显

著区域年平均面积占比达到了 32.54%,与年平均面积占比 18.87%的低低聚集共同分布在珠三角地区的北部和西北部地区. 推测受到粤北地区低低聚集的影响,珠三角地区的低低聚集以先减少后增大的趋势变化着,并有进一步减小的态势.

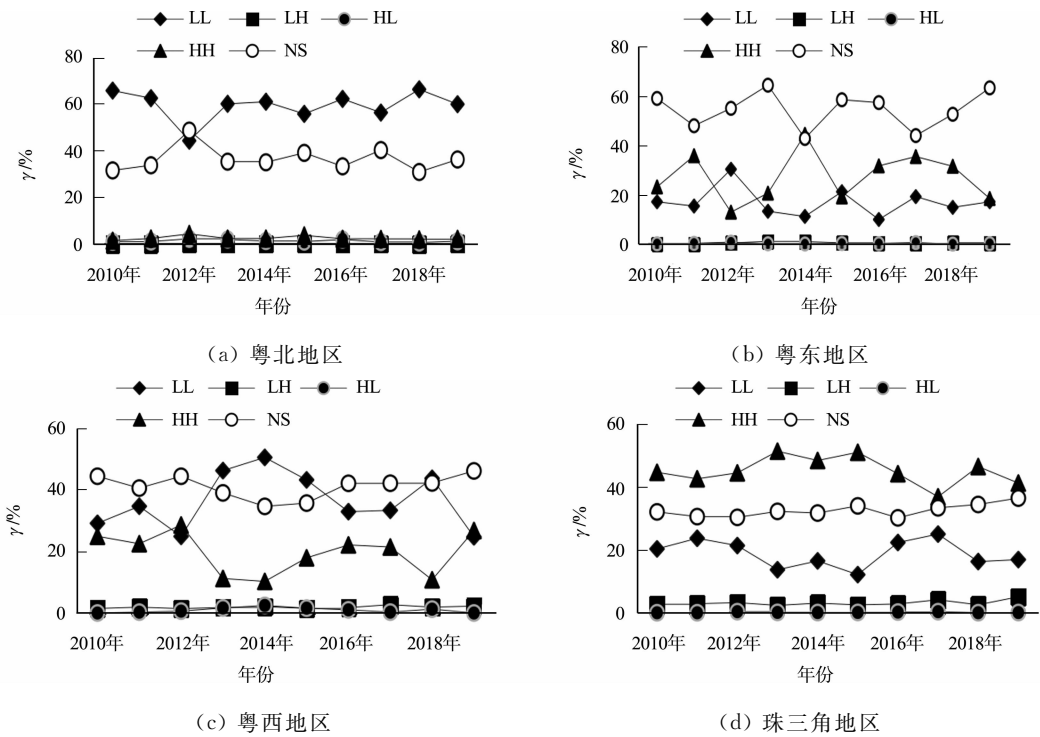


图 5 各区域局部聚集类型占该地区面积比

Fig. 5 Percentage of area occupied by local Moran's *I* types in various regions

总体而言,广东省的不显著区域和低低聚集各占据近 1/3 的面积,高高聚集加上低高聚集和高低聚集则占据剩下的 1/3 面积. 珠江三角洲平原和东西部沿海一直是高高聚集区,而北部的低低聚集区正以逐渐缩小的趋势发展着.

2.3 大气污染物轨迹分析

通过广东空气质量监测数据,统计 2013 年 12 月—2019 年 12 月广东省 21 座城市出现过的大气污染事件. 根据天数排序,东莞市在这期间共出现 14 次严重污染事件,属于广东省有空气质量历史数据以来严重污染天数最多的城市,因此选取该城市作为后向轨迹分析的典型城市. 将每次重度污染前后出现的中重度污染视为被该次大气污染所影响,则这几次大气污染事件对应的影响天数和空气质量,如表 3 所示. 表 3 中: I_{AQ} 为空气质量指数(air quality index); $O_3_{-8\text{ h}}$ 为臭氧最大 8 h 平均值.

表 3 2013—2019 年间东莞市几次重大大气污染空气质量监测数据

Tab. 3 Air quality monitoring data of several major air pollution in Dongguan City from 2013 to 2019									
日期	I_{AQ}	污染程度	影响天数	$PM_{2.5}$	PM_{10}	SO_2	CO	NO_2	$O_3_{-8\text{ h}}$
2014-01-31	201	重度污染	1	151	168	31	1.2	40	137
2014-07-09	202	重度污染	1	48	69	30	0.9	51	276
2014-07-31	205	重度污染	8	44	67	25	0.8	41	292
2014-09-26	203	重度污染	1	51	64	20	0.9	42	280
2015-08-05	201	重度污染	3	33	48	16	0.6	31	268
2016-09-26	201	重度污染	1	87	125	26	1.0	50	267
2017-09-27	204	重度污染	2	47	64	14	1.0	42	287
2019-08-07	202	重度污染	1	33	59	7	0.7	38	274
2019-08-22	204	重度污染	1	42	62	8	0.8	42	285

从表 3 可知:东莞市重大大气污染事件中,出现在冬季的事件有 1 次,出现在夏季的有 5 次,出现在秋季的有 3 次,夏秋季污染持续时间较长;2014 年 7 月 31 日大气污染事件是东莞市大气污染影响天数最广的一次. 东莞市作为典型的珠三角城市,其大气污染来源在一定程度上也能解释珠三角地区大气

污染的形成缘由,进而为研究广东省大气污染源头奠定基础.

基于 HYSPLIT 模型的东莞市 72 h 后向轨迹分析,结果如图 6 所示. 从图 6(a)可知:当日 00:00 的后向轨迹图显示,东莞市 100,500 和 1 000 m 处高空的气团源头均不同程度、不同方向地来自于太平洋,经过香港后汇入珠江三角洲平原;48 h 轨迹图显示 1 000 m 处气团下降至 500 m 以下,100 m 气团也有明显的下沉,这段时期珠三角地区近地面 $PM_{2.5}$, PM_{10} 和 O_3 _8 h 的升高或许正与之相关. 从图 6 (b)~(i)可知:8 次大气污染事件的大气污染 72 h 后向轨迹均不同程度、不同方向地受到来自太平洋气流的影响. 近地面(100,500 m)污染气流主要受到季风对流的驱使^[22],沿我国陆地边缘线抵达珠三角附近. 此外,由于七、八、九月多为台风高发月,受热带低气压下沉气流影响,污染物在近地层快速累积容易形成较严重的污染过程^[23]. 与低空气团不同,除图 6(e)和图 6(g)是受到台风直接影响外,高空污染轨迹(1 000 m)均不同程度地起源于珠三角北部方向的陆地内部.

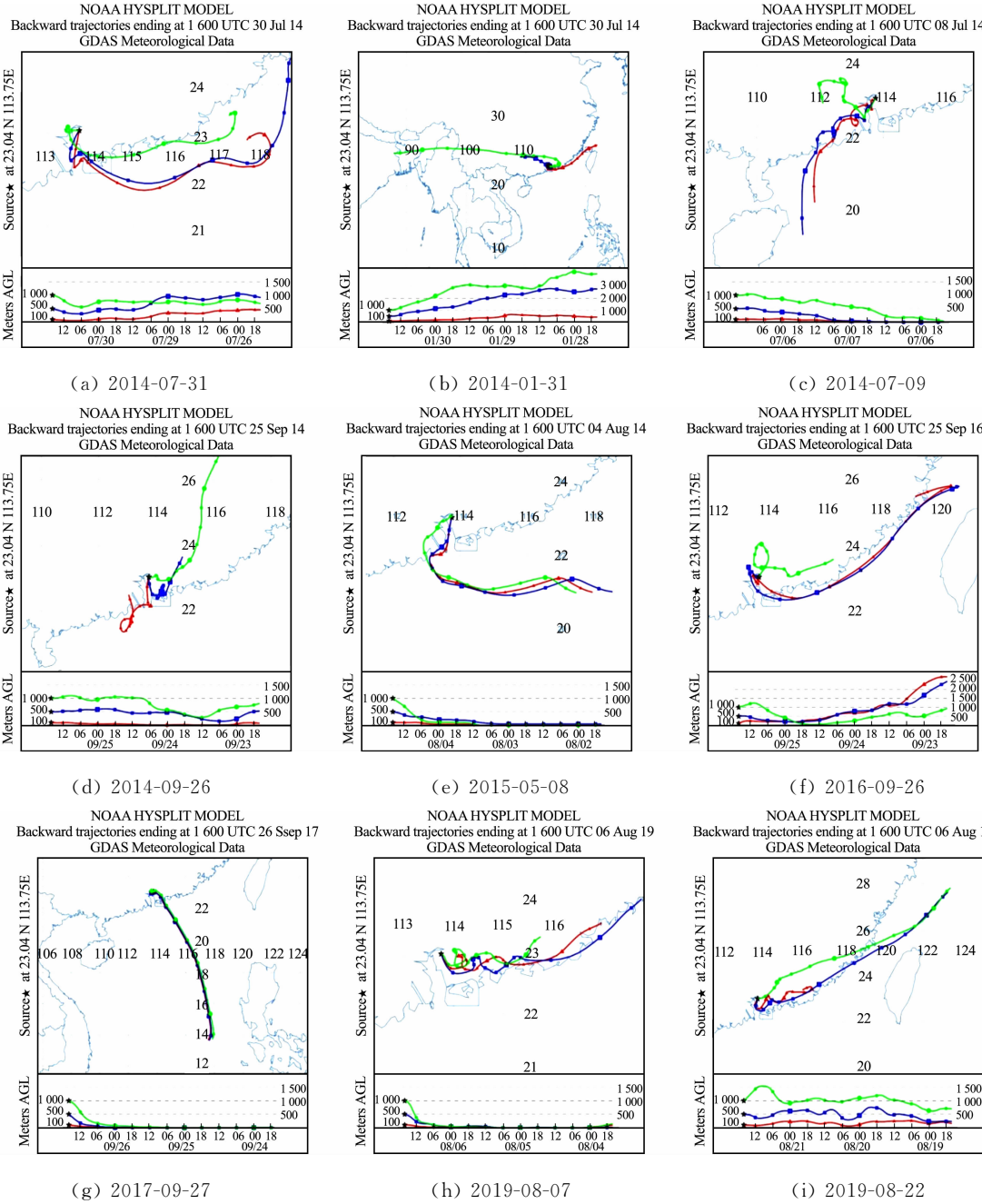


图 6 基于 HYSPLIT 模型的东莞市 72 h 后向轨迹分析

Fig. 6 72 h backward trajectory analysis based on the HYSPLIT model of Dongguan City
夏秋季节广东省盛行东南风,气团在升降起伏过程中会携带沿途的气溶胶,最终抵达珠三角高空,

高空与低空污染叠加,造成珠三角地区高空大气环境质量下降.珠三角地区虽地势平坦开阔,但快速发展的城市化和工业化进程,使得大气光化学烟雾污染^[24]和颗粒物污染^[25]严重.外来输送滞留和内部排放不散,大气污染物堆积,也使得珠三角地区空气质量下降,故该地区成为 AOD 高值聚集区.根据高旺旺等^[26]的研究推断,干季珠三角上风向区往西南部的输送,也将影响广东省西南方地区大气环境质量,这一结论与前文基本吻合.

总的来说,不同高度的大气所受到的大气污染源来自不同高度层和不同地区,除城市自身发展的原因外,珠江三角洲平原所受到的大气污染受季风和台风影响颇为深刻.另外,大陆内部的陆地气溶胶和太平洋输送的海洋气溶胶,两股气团叠加,或许是造成广东省大气污染的重要原因之一.

3 结论

广东省特有的地理特征和发达的经济发展,使得其 AOD 值的时空差异性十分明显.通过研究得出如下 3 点主要结论.

1) 在时间上,广东省 2010—2019 年 AOD 值的变化总体上呈现下降的趋势,峰值出现在 2014 年,为 0.654 6.在一元线性回归趋势分析下,近 10 a 间广东省的大部分区域呈现不变趋势,占全省总面积的 54.29%,主要分布在广东省东部;减少区域占全省面积的 44.66%,以广东省中西部地区为主;增加趋势的 AOD 值出现在极少区域,面积仅占全省的 1.05%.

2) 在空间上,主要呈现出“北低南高”的分布特征.2010—2019 年间,广东省 AOD 值的全局指数均具有较高的结果,其中粤北地区的全局指数又较粤东、粤西和珠三角地区更高,表明粤北地区的 AOD 值相关性更为显著.广东省的不显著区域和低低聚集各占据近 1/3 的面积,高高聚集与低高聚集、高低聚集则占据剩下的 1/3 面积.珠江三角洲平原和东西部沿海一直是高高聚集区,而北部的低低聚集区正以逐渐缩小的趋势发展着.

3) 2010—2019 年东莞典型的大气污染事件,主要集中在夏秋季节,个别污染持续时间较长.对持续时间最长的大气污染事件做后向轨迹分析,发现 3 个不同高度(100,500 和 1000 m)的大气所受到的大气污染源来自不同高度层.除城市自身发展的原因外,珠江三角洲平原所受到的大气污染受季风和台风影响颇为深刻.大陆内部的陆地气溶胶和太平洋输送的海洋气溶胶叠加,或许是造成广东省大气污染的重要原因之一.

参考文献:

- [1] 付海明,徐芳,晋瑞芳.褶型气溶胶过滤器过滤阻力与结构参数关系[J].华侨大学学报(自然科学版),2010,31(3):307-312. DOI:10.11830/issn.1000-5013.2010.03.0307.
- [2] SHIRAIWA M,UEDA K,POZZERA,*et al.* Aerosol health effects from molecular to global scales[J]. Environmental Science and Technology,2017,51(23):13545-13567. DOI:10.1021/acs.est.7b04417
- [3] STOCKER T F,QIN D,PLATTNER G K,*et al.* IPCC (2013) climate change 2013: The physical science basis: Contribution of working group I to the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [R]. Cambridge: Cambridge University Press,2014. DOI:10.1017/CBO9781107415324.
- [4] WANG Di,ZHANG Fei,YANGShengtian,*et al.* Exploring the spatial-temporal characteristics of the aerosol optical depth (AOD) in Central Asia based on the moderate resolution imaging spectroradiometer (MODIS)[J]. Environ Monit Assess,2020,192:383. DOI:10.1007/s10661-020-08299-x.
- [5] 陈多宏,李梅,黄渤,等.区域大气细粒子污染特征及快速来源解析[J].中国环境科学,2016,36(3):651-659. DOI:10.3969/j.issn.1000-6923.2016.03.003.
- [6] CHENG Liang,LI Long,CHENGLongqian,*et al.* Spatiotemporal variability and influencing factors of aerosol optical depth over the Pan Yangtze River Delta during the 2014—2017 period[J]. Int J Environ Res Public Health,2019,16(19):3522. DOI:10.3390/ijerph16193522.
- [7] 景悦,孙艳玲,高爽,等.京津冀地区 AOD 时空变化及影响因子的地理探测[J].干旱区地理,2020,43(1):87-98. DOI:10.12118/j.issn.1000-6060.2020.01.11.
- [8] 张静怡,卢晓宁,洪佳,等.2000—2014 年四川省气溶胶时空格局及其驱动因子定量研究[J].自然资源学报,2016,

31(9):1514-1525. DOI:10.11849/zrzyxb.20151088.

[9] KUANG Q,WANG Y P. Spatial-temporal characteristics of the aerosol optical depth (aod) derived from longterm (1980—2018) MERRA-2 over Guangdong[J]. Int Arch Photogramm Remote Sens Spatial Inf Sci,2019,XLII-3/W9:103-108. DOI:10.5194/isprs-archives-XLII-3-W9-103-2019.

[10] 林楚勇,邓玉娇,徐剑波,等. 基于 MODIS 的广东省气溶胶光学厚度时空分布特征分析[J]. 热带气象学报,2015,31(6):821-826. DOI:10.16032/j.issn.1004-4965.2015.06.010.

[11] 刘莹,林爱文,覃文敏,等. 1990—2017 年中国地区气溶胶光学厚度的时空分布及其主要影响类型[J]. 环境科学,2019,40(6):2572-2581. DOI:10.13227/j.hjkk.201809220.

[12] BHARDWAJ P,KI S J,KIM Y H,*et al.* Recent changes of trans-boundary air pollution over the Yellow Sea: Implications for future air quality in South Korea[J]. Environmental Pollution,2019,247:401-409. DOI:10.1016/j.envpol.2019.01.048.

[13] YANG Jing,HU Maogui. Filling the missing data gaps of daily MODIS AOD using spatiotemporal interpolation [J]. Sci Total Environ,2018,633:677-683. DOI:10.1016/j.scitotenv.2018.03.202.

[14] 李庆旭,朱娟,吴锋,等. 珠三角地区典型城市重污染天气案例分析[J]. 环境与可持续发展,2016,41(6):174-181. DOI:10.3969/j.issn.1673-288X.2016.06.056.

[15] 黄健,颜鹏,ROLAND R D. 利用 HYSPLIT_4 模式分析珠海地面 SO₂ 浓度的变化规律[J]. 热带气象学报,2002,18(4):407-414. DOI:10.3969/j.issn.1004-4965.2002.04.015.

[16] 张松林,张昆. 全局空间自相关 Moran 指数和 G 系数对比研究[J]. 中山大学学报(自然科学版),2007,46(4):93-97. DOI:10.3321/j.issn:0529-6579.2007.04.021.

[17] STEIN A F,DRAXLER RR,ROLPH G D,*et al.* NOAA's HYSPLIT atmospheric transport and dispersion modeling system[J]. Bulletin of the American Meteorological Society,2015,96(12):2059-2077. DOI:10.1175/BAMS-D-14-00110.1

[18] ROLPH G,STEIN A,STUNDERB. Real-time environmental applications and display system;READY[J]. Environmental Modelling and Software,2017,95:210-228. DOI:10.1016/j.envsoft.2017.06.025

[19] GAO Jiajia,TIAN Hezhong,CHENG Ke,*et al.* The variation of chemical characteristics of PM_{2.5} and PM₁₀ and formation causes during two haze pollution events in urban Beijing, China[J]. Atmospheric Environment,2015,107:1-8. DOI:10.1016/j.atmosenv.2015.02.022

[20] OTMANI A,BENCHRIF A,TAHRIM,*et al.* Impact of COVID-19 lockdown on PM₁₀,SO₂ and NO₂ concentrations in Salé City (Morocco)[J]. Science of The Total Environment,2020,735:139541. DOI:10.1016/j.scitotenv.2020.139541

[21] 王珊,廖婷婷,王莉莉,等. 西安一次霾重污染过程大气环境特征及气象条件影响分析[J]. 环境科学学报,2015,35(11):3452-3462. DOI:10.13671/j.hjkxxb.2015.0100.

[22] BAI Lanqiang,CHEN Guixing,HUANG Ling. Convection Initiation in Monsoon Coastal Areas (South China)[J]. Geophysical Research Letters,2020,47(11). DOI:10.1029/2020GL087035

[23] 刘建,吴兑,范绍佳,等. 台风对沿海城市细粒子中海盐气溶胶的影响[J]. 环境科学学报,2017,37(9):3255-3261. DOI:10.13671/j.hjkxxb.2017.0074.

[24] 邓涛,吴兑,邓雪娇,等. 珠江三角洲一次典型复合型污染过程的模拟研究[J]. 中国环境科学,2012,32(2):193-199. DOI:10.3969/j.issn.1000-6923.2012.02.001.

[25] 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. DOI:10.13227/j.hjkk.202005249.

[26] 高旺旺,冯建中,白林燕,等. 海南岛气溶胶时空变化及来源追溯[J]. 地球信息科学学报,2020,22(7):1532-1543. DOI:10.12082/dqxxkx.2020.190360

(责任编辑:黄仲一 英文审校:刘源岗)