

基于后向轨迹模式下的合肥市大气污染来源研究

罗彪, 刘暄

(中国科学技术大学管理学院, 安徽合肥 230026)

摘要: 利用 HYSPLIT(hybrid single-particle Lagrangian integrated trajectory)-4 后向轨迹模式和美国国家环境预报中心(NCEP)的全球资料同化系统(GDAS)气象数据, 结合 SO_2 、 NO_2 、 PM_{10} 和 $\text{PM}_{2.5}$ 等常规大气污染物的质量浓度数据, 对安徽省合肥市 2014 年的大气污染输送过程进行了模拟, 并通过聚类分析和轨迹分型确定大气污染传输路径及影响源区. 结果表明: 合肥市的气流后向轨迹季节变化明显; 合肥市不同季节的污染物潜在源区不同. 1 月份西北方向气流占 43%, 城市间局地气流占 57%, SO_2 、 NO_2 、 PM_{10} 、 $\text{PM}_{2.5}$ 各项污染物浓度都很大; 4 月份从长三角地区来的气流占 58%, 各项污染物浓度都很低; 7 月份城市间局地气流占 48%, 长三角地区来的气流占 24%, PM_{10} 浓度较高, 其他污染物浓度较低; 10 月份城市间局地气流占 50%, 北方气流占 27%, 长三角地区来的气流占 23%, PM_{10} 浓度较高, 其他污染物浓度较低. 影响合肥市大气污染的来源主要有北方气流, 长三角地区来的气流和城市间局地气流.

关键词: 大气污染; HYSPLIT-4 模式; 后向轨迹; 聚类分析

中图分类号: P402 **文献标识码:** A doi: 10.3969/j.issn.0253-2778.2019.04.009

引用格式: 罗彪, 刘暄. 基于后向轨迹模式下的合肥市大气污染来源研究[J]. 中国科学技术大学学报, 2019, 49(4): 321-328.

LUO Biao, LIU Xuan. Investigation on the source of air pollutants in Hefei city based on backward trajectory model[J]. Journal of University of Science and Technology of China, 2019, 49(4): 321-328.

Investigation on the source of air pollutants in Hefei city based on backward trajectory model

LUO Biao, LIU Xuan

(School of Management, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

Abstract: The transport process of air pollutants in Hefei in 2014 was simulated, using the HYSPLIT (hybrid single-particle Lagrangian integrated trajectory)-4 backward trajectory model and NCEP(National Centers for Environmental Prediction) reanalysis data, and the mass concentration data of conventional atmospheric pollutants such as SO_2 , NO_2 , PM_{10} and $\text{PM}_{2.5}$ were also used. The results showed that the air trajectories in Hefei had an obvious seasonal variation, and that the potential sources of pollutants in different seasons in Hefei were different. In January, the airflow in the northwest direction accounted for 43%, and the local airflow between cities accounted for 57%. The concentrations of SO_2 , NO_2 , PM_{10} , and $\text{PM}_{2.5}$ were very large. In April, the airflow from the Yangtze River Delta region accounted for 58%.

收稿日期: 2017-12-26; **修回日期:** 2018-07-27

基金项目: 国家自然科学基金(71272064), 第五批安徽省优秀青年科技基金(1308085JGD07)资助.

作者简介: 罗彪(通讯作者), 男, 1978年生, 博士/副教授. 研究方向: 战略与创新管理、消费行为与市场营销. E-mail: luobiao@ustc.edu.cn

The concentrations of various pollutants were very low. In July, the local airflow between cities accounted for 48%, and the airflow from the Yangtze River Delta region accounted for 24%. The PM_{10} concentration was higher, and the concentrations of other pollutants were lower. In October, the local airflow between cities accounted for 50%, the northern airflow accounted for 27%, and the airflow from the Yangtze River Delta region accounted for 23%. The PM_{10} concentration was higher, and the concentrations of other pollutants were lower. The main sources of air pollution in Hefei were mainly from the northern air masses, the air masses in the Yangtze River Delta region, and the local urban air masses.

Key words: air pollution; HYSPLIT-4 model; backward trajectory; cluster analysis

0 引言

随着世界经济的发展,环境污染逐渐成为一个全球性的问题.大气污染与人们的生活密切相关,大气污染也受到越来越多的关注.一个地区的大气环境污染不仅与本地的排放有关,还与周边地区的排放有密切关系.研究某地大气污染物状况与周围地区的关系通常有两种方法:一种是欧拉方法,将周围地区污染物的排放看作是某地污染物的一种源,然后研究该排放源对某地区大气环境污染的影响;另外一种方法是拉格朗日方法,即通过研究周围地区的大气输送路径来确定某地区大气环境污染的来源.

关于大气污染物的输送,国内外许多学者做过研究.程念亮等^[1]采用数值模拟与观测资料相结合的方式,对2014年10月北京市4次典型空气重污染过程的大气环境背景、气象条件和形成原因进行分析,结果表明,京津冀地区的稳定气象条件是形成北京这4次典型空气重污染过程的重要原因,表现为大气层结稳定、近地层逆温明显,风速小,湿度大.区域输送对于北京 $PM_{2.5}$ 污染起着更为重要的作用,来自南方,包括河北、河南和山西西部等地的外来污染物对北京 $PM_{2.5}$ 贡献较大,同时北京本地也存在较强的二次无机盐及有机物转化过程.朱佳雷等^[2]利用大气成分浓度数据、常规气象观测数据和天气图资料,结合HYSPLIT(hybrid single-particle Lagrangian integrated trajectory)-4后向轨迹模式,对2008年10月28~30日发生在江苏省的一次大面积重霾污染天气进行了综合分析,后向轨迹计算分析表明,造成此次重霾污染天气的气团主要来自河南中东部、苏北和安徽等重要产粮地区,长距离输送对区域霾污染产生重要影响.赵恒等^[3]利用HYSPLIT轨迹模式和NCEP(美国国家环境预报中心)再分析气象资料,计算了2001年3月

TRACE-P期间抵达香港地区的后向气流轨迹,并分析了香港地区大气输送特征.对轨迹进行聚类分析后得到到达香港的6类典型气团.抵达香港的气流轨迹结果表明来自大陆的气团占47.5%,局地输送性气团占34.6%,海洋性气团占18.7%.方利江等^[4]利用HYSPLIT-4后向轨迹模式和NCEP的2012年GDAS(全球资料同化系统)气象数据,结合 NO_2 、 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 和 SO_2 等常规大气污染物的质量浓度数据,对舟山本岛2012年4月、7月、10月和12月的大气污染输送过程进行了模拟,确定大气污染传输路径及影响源区.结果表明,舟山本岛气流后向轨迹呈明显的季节变化特征,舟山本岛 $PM_{2.5}$ 的潜在源主要为毗邻城市间局地污染,集中于浙江沿海城市及杭州湾、上海等地.王郭臣等^[5]利用HYSPLIT模型和GDAS气象数据,用聚类方法对2012年12月~2013年11月期间抵达天津的逐日72h气流后向轨迹按不同的季节进行归类.结果表明,不同方向气流轨迹对天津 PM_{10} 和 NO_2 潜在源区分布的影响存在显著差异.天津 PM_{10} 和 NO_2 日均浓度最高值对应的气流轨迹均集中在冬、春和秋季等来自内陆的西北气流;夏季影响天津的气流轨迹主要来自西北和东南方向,对天津 PM_{10} 和 NO_2 的日均浓度贡献较小.

大气污染在一定的大气环流背景影响下,可以通过中远距离输送而影响城市周边及其他相关地区,是一个区域性的环境污染问题.不同地区,在其特定的地理环境和气象条件下,大气污染的扩散形式呈现出不同特点.合肥市大气污染发生频率最高的季节是冬季,11月是大气污染出现频率最高的月份.后向轨迹分析定性地反映了外来源及本地污染源对合肥空气质量的影响,而造成本地区中度以上大气污染的气团来向以西北方向为主.本文通过

HYSPLIT-4 后向轨迹模式对合肥市大气污染进行了模拟计算,采用系统聚类方法对这些轨迹进行统计分析,研究了合肥低层大气的输送特征和合肥气流后向轨迹的季节变化规律,并结合相关大气污染物的监测数据,分析了合肥大气污染输送规律,确定主要污染贡献带,以期为区域大气污染防控和环境管理提供依据。

1 HYSPLIT 模式及研究方法介绍

HYSPLIT (hybrid single-particle Lagrangian integrated trajectory)是由美国国家海洋大气中心(NOAA)和澳大利亚气象局共同研发的一种用于计算和分析大气污染物的来源、输送、扩散轨迹的综合模式系统。该模式是欧拉-拉格朗日(Eulerian-Lagrangian)混合型的扩散模式,其平流和扩散计算采用拉格朗日法,通常用来跟踪气流所携带的粒子或气体移动方向,可以实时预报风场形势,是分析气体污染物的重要工具,已经被广泛地应用于多种污染物在各个地区的大气传输和扩散研究中,并取得了一定的研究成果。

为研究远距离污染输送对合肥市大气污染物浓度的影响,本文采用 500m 高度作为研究区的大气边界层的起始高度,通过 HYSPLIT 模型对研究区每日气团移动的 72h 后向轨迹进行模拟,以此反映研究区周围的气流运动特征。

本文选取合肥市大气污染物 NO_2 、 $\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_{10} 和 SO_2 为研究对象,各污染物质量浓度数据来自于 PM_{25} .in 官方网站^[6]。在模式中,将污染物实测的质量浓度日均值赋予 00:00、06:00、12:00 和 18:00 (UTC,世界时)4 个时次,每个时次对应 1 条轨迹。模式顶高度取 10000 m。模拟高度选取 500 m 作为起始高度。后向轨迹模式在一定程度上能表征各个污染源与受体污染路径之间的关系。延长模拟时间可充分反映污染物的远距离输送,但是时间过长会导致模拟精度的降低。综合考虑污染物的特性和研究区域的地形、气象等条件,确定后向轨迹的时间定为 72 h。

后向轨迹模式采用的气象资料为 NCEP 提供的全球资料同化系统 GDAS 数据库^[7]2014 年数据。该数据 6 h 记录一次,分别为 00:00、06:00、12:00、

18:00(UTC,世界时)。

使用该气象资料运行 HYSPLIT-4 模式,计算在 2014 年 1、4、7、10 各代表月份抵达合肥的每天 4 次的 72 h 的后向气流轨迹。轨迹起始点(经纬度为 31.52°N , 117.17°E)距地面 500 m,由该点向后推 72 h 显示大气污染的可能来源。

聚类分析是一种多元统计分析方法,它是按照一批样本的亲疏程度进行分类分析。实际处理过程是先寻找一种能客观反映样本之间远近关系的统计量,然后根据这种统计量把样本分为若干类。常用的聚类分析方法主要有两种:①系统聚类方法(hierarchical clustering),也被称为谱系聚类方法;②非系统聚类方法(non-hierarchical clustering),也被称为分离聚类方法(disjoint clustering)。其中,系统聚类方法是按照样本之间的距离来定义聚类之间的距离,首先将所有 n 个变量个案看成不同的 n 类,先将性质最近的(距离最近的)两类合并为一类,然后从分出的 $n-1$ 类中再找最近的两类加以合并,以此类推直到把所有变量合为一类^[8]。

本文采用沃德层次聚类法^[9]对各代表月的气流轨迹进行聚类分析。气流轨迹之间的距离测度利用欧氏距离计算,以经度和纬度作为变量确定两条轨迹之间的距离。因为本文仅关注到达研究站点空气团的水平来向输送,同时为了避免欧式距离在计算过程中将两条速度不同、路径相同的后向轨迹划分为不同的两类,因此引入了 angle distance 算法,采用 angle distance 算法对到达合肥的气流轨迹分类,得到不同的输送气流类型,在此基础上对不同季节的气流所对应的污染物浓度特征进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 合肥 2014 年各代表月后向轨迹分布模拟结果

模拟时段选择 2014 年 1 月、4 月、7 月、10 月共 4 个月作为代表月份,分布代表冬、春、夏、秋四季。以合肥 (31.52°N , 117.17°E) 作为研究区,采用 HYSPLIT-4 后向轨迹模式,计算每天 00:00、06:00、12:00 和 18:00(UTC,世界时)4 个时次的后向轨迹,1 月、4 月、7 月、10 月分别为 124 条、120 条、124 条和 124 条,共计 492 条,结果如图 1 所示。

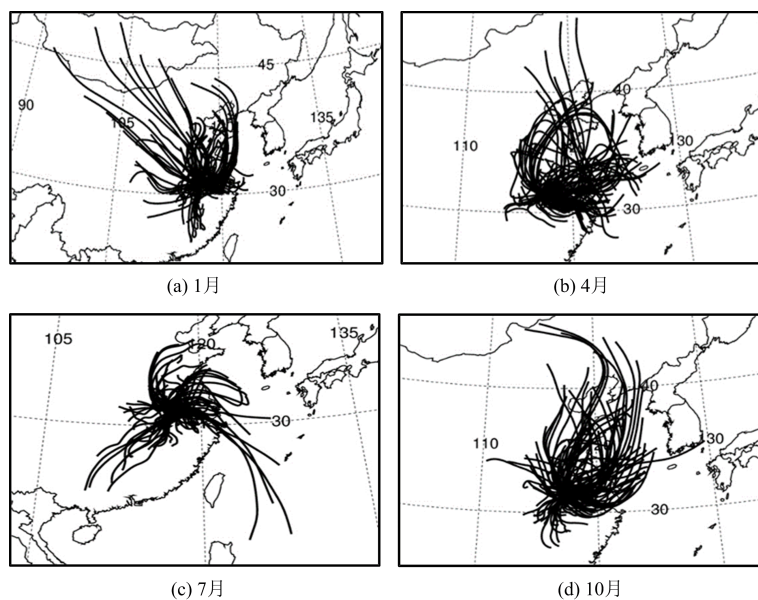


图 1 2014 年合肥各代表月份 500 m、72 h 后向轨迹分布

Fig. 1 Trajectory distribution map of Hefei after 72 h from 500 m above the ground in each representatives month of 2014

从图 1 可以看出,合肥地区气流后向轨迹季节变化特征比较明显.从图 2 可以看出,1 月份受到冷高压的影响,以西北向输入为主,而且轨迹线较长,移动速度较快.气流轨迹主要从西伯利亚方向到蒙古,从西北方向到达合肥,还有一部分从北边经过北京、山东等地区进入合肥,总的来说,气流轨迹以北边为主.

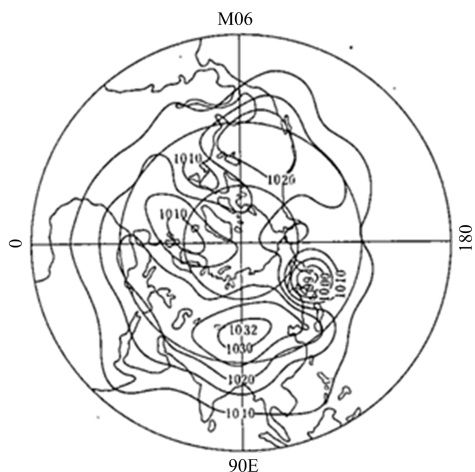


图 2 冬季亚洲高压天气图^[19]

Fig. 2 Winter Asian high weather map^[19]

4 月份西北方向的轨迹线少了很多,较长的轨迹线从北边过来,从内蒙古经过华北京津冀地区、渤海、山东地区到达合肥,还有一部分气流从东海、黄海海面输入.南向的气流轨迹线较短,移动速度较慢,主要表现为城市间局地输送,很可能是人为污染贡献.

从图 3 可以看出,7 月份受副热带高压的影响,轨迹线中较长的是东南方向和西南方向.东南方向的气流轨迹线长,移动速度快,东海海面来的气流较

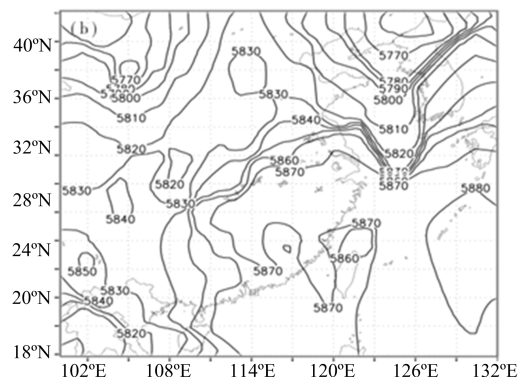


图 3 夏季副热带高压天气图^[20]

Fig. 3 Summer synoptic map of subtropical high^[20]

为清洁;而西南方向的气流也较多,轨迹线较长,可能是东南亚方面吹过来的气流.来自北边的气流较少,西北方向基本没有,有一些山东、河南方向来的气流和黄海海面吹来的气流,轨迹线都较短,移动速度较慢.

10 月份伴随着西北冷空气逐渐南下,气流主要以北输入为主,偏北内蒙古方向轨迹线多且较长,还有一些气流从东海海面吹过来,偏南的气流极少,西南方向有一些气流,轨迹线较短,考虑为城市间局地输入.这 4 个代表月份的模拟结果和其他城市的相关研究^[10-18]相接近,符合地域性特征.

2.2 后向轨迹聚类分析

对 2014 年 1 月、4 月、7 月、10 月的气流轨迹进行聚类分析,并结合大气污染物的实测数据,将各代表月份的气流轨迹分别分为 2、3、5、3 类.各季节轨迹分类见图 4.

表 1 各代表月份后向轨迹气团的污染物特征

Tab. 1 Pollutant characteristics of backward trajectory air masses in each representative month

月份	轨迹 编号	所占 比例/%	$\rho_{\text{SO}_2}/(\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3})$		$\rho_{\text{NO}_2}/(\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3})$		$\rho_{\text{PM}_{10}}/(\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3})$		$\rho_{\text{PM}_{2.5}}/(\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3})$	
			质量浓度	标准差	质量浓度	标准差	质量浓度	标准差	质量浓度	标准差
1 月	1	43	65.29	30.17	46.24	31.42	143.18	85.05	172.33	115.57
	2	57	65.73	33.23	46.30	30.36	136.17	85.89	154.06	66.51
4 月	1	58	16.41	11.15	18.11	11.05	58.48	44.26	79.95	34.18
	2	14	16.94	8.35	17.50	16.02	64.17	40.49	59.12	23.73
	3	28	21.35	13.39	20.29	12.13	91.38	64.58	83.94	26.6
7 月	1	48	4.55	2.77	11.96	14.00	104.58	67.32	71.75	34.51
	2	24	4.29	3.04	11.54	11.95	121.33	79.15	79.85	41.21
	3	19	7.09	6.95	16.78	15.51	119.91	71.57	89.32	50.84
	4	6	4.43	1.27	14.14	18.53	39.14	24.03	28.43	7.91
	5	3	3.50	0.58	5.50	3.11	108.75	64.08	65.50	32.21
10 月	1	27	4.58	6.12	10.42	6.92	150.67	79.43	65.91	43.64
	2	23	3.04	1.06	12.48	8.89	136.64	63.60	58.50	25.69
	3	50	4.82	7.27	12.76	8.24	199.43	117.10	91.62	57.29

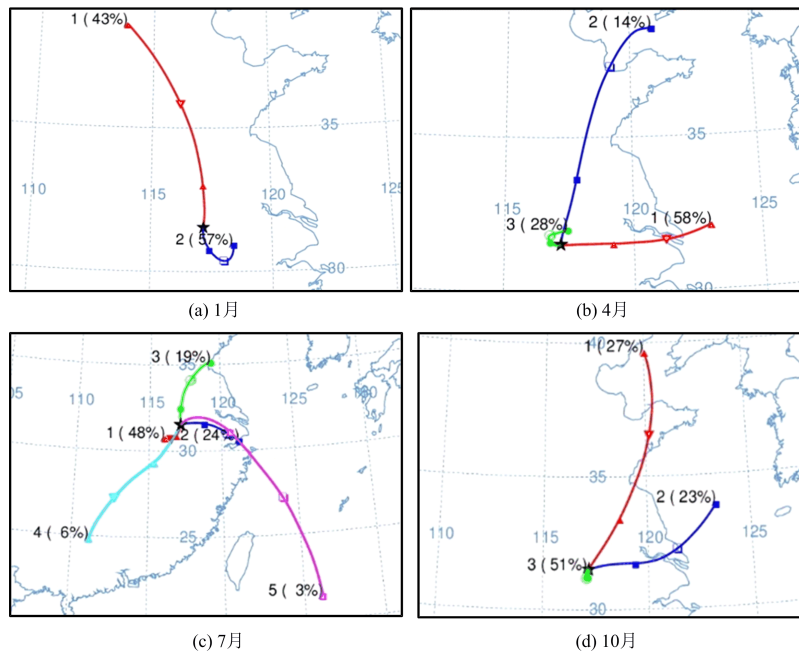


图 4 各代表月份合肥轨迹聚类

Fig. 4 Clustering of Hefei trajectories in representational months

1 月份,从西北方向过来的第 1 类气流轨迹占总轨迹数的 43%,对应的 $\rho_{\text{PM}_{10}}$ 平均值特别高,为 $(143.18 \pm 85.05) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, $\rho_{\text{PM}_{2.5}}$ 平均值也特别高,为 $(172.33 \pm 115.57) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,这两个指标均比第 2 类气流的要高,而第 1 类气流对应的 ρ_{SO_2} 平均值为 $(65.29 \pm 30.17) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, ρ_{NO_2} 平均值为 $(46.24 \pm 31.42) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,这些和第 2 类气流数据大小差不多.第 1 类气流污染比较严重,携带污染物比较多,移动速度快,轨迹线长.究其原因,是冬季受到强劲的西北气流或者偏西气流的影响,同时,冬季我

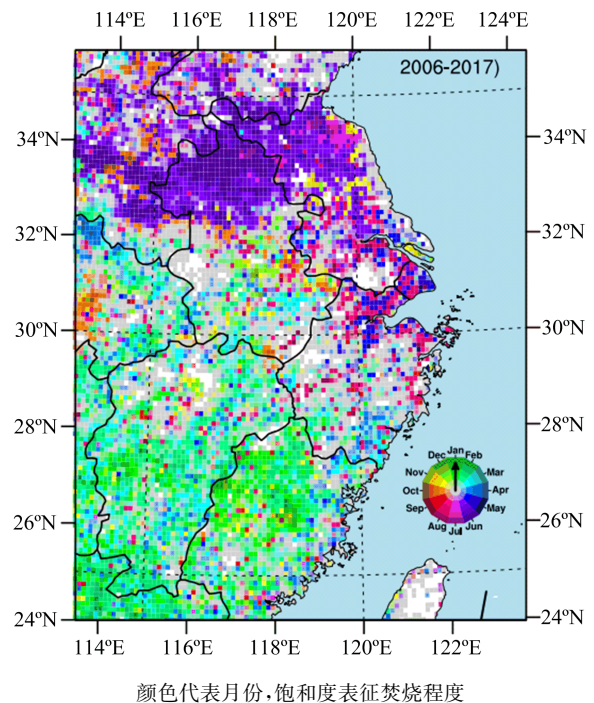
国北方进入燃煤采暖期,烧煤导致污染物排放较多.在西北风作用下,污染物向合肥方向迁移.而第 2 类气流占总轨迹数的 57%,轨迹线较短,轨迹线呈环形,移动速度慢,考虑为局地气流.该气流对应的各类污染物质量浓度较高,对应的 ρ_{SO_2} 平均值为 $(65.73 \pm 33.23) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, ρ_{NO_2} 平均值为 $(46.30 \pm 30.36) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, $\rho_{\text{PM}_{10}}$ 平均值为 $(136.17 \pm 85.89) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, $\rho_{\text{PM}_{2.5}}$ 平均值为 $(154.06 \pm 66.51) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$.这类气流对研究区域表现为城市间近距离影响,为城市间局地污染,原因是进入冬季燃煤采暖期,污染物排放较多.总

地来说,1月份对应的冬季,远比其他月份的污染物浓度大,表现为合肥冬季是污染最为严重的时期,原因是进入燃煤采暖期,北方的污染物被西北方向吹来的气流带到合肥,合肥周边的城市污染物也吹到了合肥,导致合肥冬季污染较为严重,主要是人工污染。

4月份,气流分为3个气团.总的来说,4月份各类污染物浓度都较低,尤其是 $\rho_{PM_{10}}$,3类气团的浓度都比其他月份的数据低.4月份的大气比较清洁,污染程度较低.其中第1类气流轨迹数占58%,从黄海方向途经长三角地区吹到合肥,为主要影响气流,对应的 ρ_{SO_2} 平均值为 $(16.41 \pm 11.15)\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, ρ_{NO_2} 平均值为 $(18.11 \pm 11.05)\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, $\rho_{PM_{10}}$ 平均值为 $(58.48 \pm 44.26)\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, $\rho_{PM_{2.5}}$ 平均值为 $(79.95 \pm 34.18)\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$. $\rho_{PM_{10}}$ 和 $\rho_{PM_{2.5}}$ 比较低,而 ρ_{SO_2} 和 ρ_{NO_2} 相对来说较高,可能是由于第1类气流从黄海过来,途经长三角等地区,存在污染较严重的工业区等人为活动源,且气流移动速度快,将污染物带到合肥.第2类气流轨迹占14%,从北边吹过来,从渤海途经山东、河南等地区,进入合肥.轨迹线较长,移动速度较快,对应的 ρ_{SO_2} 平均值为 $(16.94 \pm 8.35)\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, ρ_{NO_2} 平均值为 $(17.50 \pm 16.02)\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, $\rho_{PM_{10}}$ 平均值为 $(64.17 \pm 40.49)\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, $\rho_{PM_{2.5}}$ 平均值为 $(59.12 \pm 23.73)\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$.各类污染物浓度较低,从海洋上吹来的清洁性气流途经内陆工业区,带来一些污染物.第3类气流轨迹数占到28%,轨迹线很短,考虑为城市间局地气流.该气流对应的 ρ_{SO_2} 平均值为 $(21.35 \pm 13.39)\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, ρ_{NO_2} 平均值为 $(20.29 \pm 12.13)\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, $\rho_{PM_{10}}$ 平均值为 $(91.38 \pm 64.58)\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, $\rho_{PM_{2.5}}$ 平均值为 $(83.94 \pm 26.6)\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$,各类污染物浓度都比前两类气流的浓度稍高,说明合肥周边的城市工业污染等人为污染源排放可能性较大。

7月份,进入夏季,5类轨迹的 ρ_{SO_2} 和 ρ_{NO_2} 都很小,说明合肥夏季的污染情况不是很严重,大气较为清洁.但是第1、2、3、5类气流的 $\rho_{PM_{10}}$ 和 $\rho_{PM_{2.5}}$ 均比较大, $\rho_{PM_{10}}$ 都达到 $100\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 以上, $\rho_{PM_{2.5}}$ 都达到 $65\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 以上.而从西南方向来的第4类气流这两个数据比较小,说明西南方向来的气流较为清洁,污染很小,不过第4类气流占6%,对合肥污染情况影响较小,不是主要气流来源.第1类气流轨迹占48%,轨迹线短,考虑为城市间局地污染,与1月份和4月份的局地污染气流所对应的污染物浓度相比,7月份所对应的 ρ_{SO_2} 平均值为 $(4.55 \pm 2.77)\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, ρ_{NO_2} 平均值为 $(11.96 \pm 14.00)\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, $\rho_{PM_{10}}$ 平均值为 $(104.58 \pm 67.32)\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$,

$\rho_{PM_{2.5}}$ 平均值为 $(71.75 \pm 34.51)\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$,前两个数据都特别小, $\rho_{PM_{10}}$ 和 $\rho_{PM_{2.5}}$ 较小,说明夏季合肥周边的城市污染排放较小, $\rho_{PM_{10}}$ 和 $\rho_{PM_{2.5}}$ 可能是由于合肥周边地区焚烧秸秆造成的.第2类气流轨迹占到24%,从长三角方向过来,所对应的各类污染物浓度和第1类情况差不多.这两类气流占到70%以上,是夏季影响合肥的主要气流.第3类占19%,从黄海方向途经山东、河南地区过来,所对应的 ρ_{SO_2} 平均值为 $(7.09 \pm 6.95)\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, ρ_{NO_2} 平均值为 $(16.78 \pm 15.51)\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, $\rho_{PM_{10}}$ 平均值为 $(119.91 \pm 71.57)\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, $\rho_{PM_{2.5}}$ 平均值为 $(89.32 \pm 50.84)\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$.前两种污染物浓度特别小,而后两种污染物浓度较大.从海洋上吹来的清洁气流经过合肥东北部地区,携带了当地人工污染源的污染物,到达合肥.西南方向的第4类气流各类污染物浓度都特别低,为清洁气流,途经的地区污染情况较少.而东南方向从海洋上吹来的第5类气流占3%,各类污染物浓度也较低,轨迹数太少,对合肥污染情况影响很小。



颜色代表月份,饱和度表征焚烧程度
图5 长三角地区火点峰值月份及焚烧程度分布图
Fig. 5 Distribution map of fire point peak month and incineration degree in Yangtze River Delta Area

我们基于2006年至2017年每日MODIS (moderate-resolution imaging spectroradiometer)火点遥测信息统计得到长三角地区火点峰值月份及焚烧程度分布图,不同颜色代表月份,颜色饱和度表征焚烧程度,按火点数25%、50%、75%和95%分布

值划分,火点信息由 $4\mu\text{m}$ 和 $11\mu\text{m}$ 通道亮温信息确定^[21]. 夏季(特别是6月份)安徽、江苏北部和河南等地秸秆焚烧频繁,对周边城市空气质量造成了重要影响^[22].

10月份,3类气流分别占27%、23%、50%. 第1类气流从渤海方向经过山东地区过来,是北方气流,符合合肥秋季偏北风的地域特点. 所对应的 ρ_{SO_2} 平均值为 $(4.58 \pm 6.12)\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, ρ_{NO_2} 平均值为 $(10.42 \pm 6.92)\mu\text{g} / \text{m}^3$, $\rho_{\text{PM}_{10}}$ 平均值为 $(150.67 \pm 79.43)\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, $\rho_{\text{PM}_{2.5}}$ 平均值为 $(65.91 \pm 43.64)\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$. ρ_{SO_2} 和 ρ_{NO_2} 都特别小,污染情况较低. 第2类气流从黄海经过江苏地区吹到合肥,污染物浓度和第1类气流相似,污染情况较低. 第3类气流占50%左右,轨迹线很短,为局地城市气流, ρ_{SO_2} 和 ρ_{NO_2} 都特别小, $\rho_{\text{PM}_{10}}$ 和 $\rho_{\text{PM}_{2.5}}$ 较大,可能是合肥及周边城市人工污染造成,比如扬尘、汽车尾气、烧煤等原因.

2.3 个例分析(2014年11月22日重污染日期)

在2014年11月22日前后几日,合肥市的各项污染物监测指标都特别高,显示合肥市遭受了严重的空气污染. 我们选取2014年11月22日合肥市重污染天气过程,通过卫星 OMI(Ozone Monitoring Instrument)监测资料、HYSPLIT-4 后向轨迹发现,造成此次过程的主要污染源来自河北南部与山东西北部交界处以及长江三角洲地区.

图6为 OMI 监测2014年11月20日到11月24日的氮氧化物 NO_2 平均分布情况. 从图中可知,污染严重的地区有两个:河北南部和山东西北部交界处、长江三角洲地区.

为了研究此次严重空气污染的来源地及污染原因,利用 HYSPLIT 做出2014年11月22日合肥市向后7d的后向轨迹. 图7为 HYSPLIT 模拟22日过去7d空气来源路线,发现轨迹经过了上面 OMI 监测的两个重度污染区(黑色圆框). 利用 HYSPLIT 作出合肥市11月22日向后7天的后向轨迹模拟,通过 HYSPLIT4 来追踪确定高贡献的排放源. 如图7所示,由气压和高度的对应关系,950 hPa 平均海拔高度约为700 m,850 hPa 平均海拔高度约为1500 m,在对流层,氮氧化物的生命史约7 d. 可以认为,合肥的重污染与这两个污染严重的地区有关系. 造成此次过程的主要污染源来自河北南部与山东西北部交界处以及长江三角洲地区.

3 结论

利用 HYSPLIT-4 后向轨迹模式和 NCEP 的

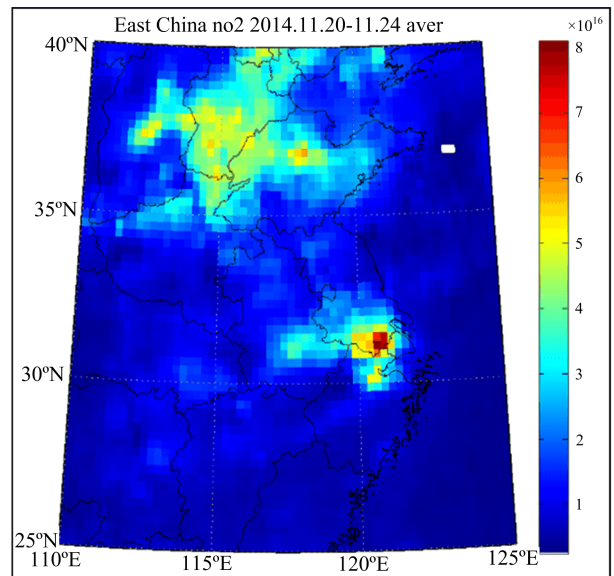


图6 2014年11月22日前后 NO_2 平均分布情况

Fig. 6 Average distribution of NO_2 around 22 November 2014

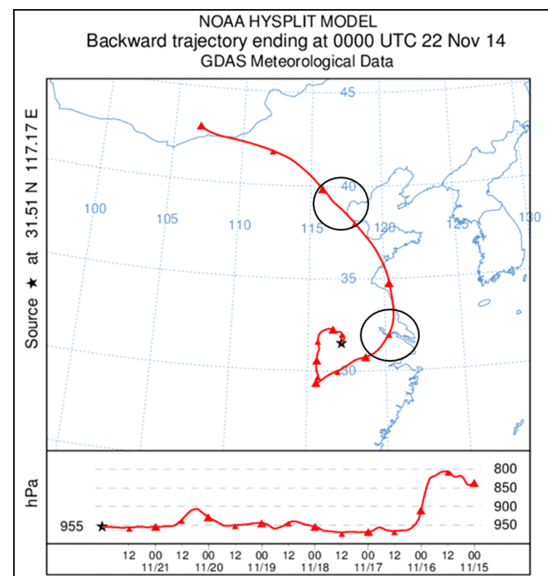


图7 2014年11月22日后向轨迹

Fig. 7 Backward trajectory around 22 November 2014

2014年 GDAS 气象数据,结合 SO_2 、 NO_2 、 PM_{10} 和 $\text{PM}_{2.5}$ 等常规大气污染物的质量浓度数据,对安徽省合肥市2014年1月、4月、7月和10月的大气污染输送过程进行了模拟,高度为500 m高空,后向轨迹模拟时间为72 h,并通过聚类分析和轨迹分型,确定大气污染传输路径及影响源区. 本次研究的结论如下:

(I) 合肥市的气流后向轨迹季节变化明显. 1月份受到冷高压的影响,以西北向输入为主,气流轨迹源自北亚大陆中心. 4月份较长的轨迹线从北边过来,更多的气流从东海、黄海海面输入. 7月份的气流主要来自东南方向和西南方向,并且较为清洁. 10月份,气流主要以北输入为主,偏北内蒙古方向轨迹线

多,且较长,还有一些气流从东海海面吹过来。

(II)结合合肥市 SO_2 、 NO_2 、 PM_{10} 和 $\text{PM}_{2.5}$ 等常规大气污染物的质量浓度数据,合肥市 1 月大气污染情况较为严重,7 月的大气较为清洁。

(III)1 月份,从西北方向过来的第 1 类气流轨迹占总轨迹数的 43%,污染比较严重,携带污染物比较多,移动速度快,轨迹线长。而第 2 类气流占总轨迹数的 57%,为城市间局地气流。这两类气流,即西北方向的气流和城市间局地气流是合肥市主要输送通道,且携带的污染物浓度特别大,原因是进入冬季燃煤采暖期,污染物排放较多,为人工污染。4 月份的大气比较清洁,污染程度较低,主要影响气流为长三角地区来的气流和城市间局地气流。7 月份合肥的污染情况不是很严重,大气较为清洁。主要气团来源为东南方向和城市间局地气流。10 月份,3 类气流分别占 27%、23%、50%。第 1 类气流从渤海方向经过山东地区过来,是北方气流;第 2 类气流从黄海经过江苏地区吹到合肥;第 3 类气流占 50%左右,轨迹线很短,为局地城市气流。

(IV)合肥市不同季节的污染物潜在源区不同。1 月主要为西北气流和城市间局地污染;4 月主要为从黄海方向途经长三角地区吹到合肥的气流;7 月为城市间局地污染和长三角地区吹来的气流;10 月为北方来的气流、长三角地区来的气流和城市间局地污染。影响合肥市大气污染的来源主要有北方气流、长三角地区来的气流和城市间局地气流。

本文主要研究了合肥市不同季节的污染物来源,今后的进一步研究可以与周边其他城市不同季节污染物的来源特点做对比分析。

参考文献(References)

- [1] 程念亮,李云婷,张大伟,等. 2014 年 10 月北京市 4 次典型空气重污染过程成因分析[J]. 环境科学研究, 2015, 28(2): 163-170.
- [2] 朱佳雷,王体健,邢莉,等. 江苏省一次重霾污染天气的特征和机理分析[J]. 中国环境科学, 2011, 31(12): 1943-1950.
- [3] 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.
- [4] 方利江,傅贤康,谢立峰,等. 舟山本岛大气污染输送过程的数值模拟分析[J]. 环境科学研究, 2014, 27(10):1087-1094.
- [5] 王郭臣,王珏,信玉洁,等. 天津 PM_{10} 和 NO_2 输送路径及潜在源区研究[J]. 中国环境科学, 2014, 34(12): 3009-3016.
- [6] BestApp 工作室. PM_{25} . in [DB/OL]. [2017-11-20]. <http://www.pm25.in/>.
- [7] NCEP. Global Data Assimilation System[DB/OL]. [2017-11-20]. <ftp://arlftp.arlhq.noaa.gov/pub/archives/gdas1>.
- [8] SIROIS A, BOTTENHEIM J W. Use of backward trajectories to interpret the 5-year record of PAN and O_3 ambient air concentrations at Kejimikujik National Park, Nova Scotia [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 1995, 100(D2): 2867-2881.
- [9] WARD JR J H. Hierarchical grouping to optimize an objective function [J]. Journal of the American Statistical Association, 1963, 58(301): 236-244.
- [10] 王艳,柴发合,刘厚凤,等. 长江三角洲地区大气污染物水平输送场特征分析[J]. 环境科学研究, 2008, 21(1):22-29.
- [11] 马锋敏. 北京及周边地区典型大气污染过程的数值模拟研究[D]. 南京:南京信息工程大学, 2007.
- [12] 张文杰,徐义生,徐峻,等. 日本核泄漏对我国北方典型区域的影响[J]. 环境科学研究, 2013, 26(3): 274-280.
- [13] 高晋徽,朱彬,王东东,等. 南京北郊 O_3 、 NO_2 和 SO_2 浓度变化及长/近距离输送的影响[C]// 江苏省气象学会第七届学术交流会议论文集. 苏州:江苏省气象学会, 2011.
- [14] SHAN W, YIN Y, LU H, et al. A meteorological analysis of ozone episodes using HYSPLIT model and surface data [J]. Atmospheric Research, 2009, 93(4):767-776.
- [15] WANG F, CHEN D S, CHENG S Y, et al. Identification of regional atmospheric PM transport pathways using HYSPLIT, MM5-CMAQ and synoptic pressure pattern analysis[J]. Environmental Modelling & Software, 2010, 25(8):927-934.
- [16] STRONG J, WHYATT J D, HEWITT C N, et al. Development and application of a Lagrangian model to determine the origins of ozone episodes in the UK[J]. Atmospheric Environment, 2010, 44(5): 631-641.
- [17] KARACA F, ANIL I, ALAGHA O. Long-range potential source contributions of episodic aerosol events to PM_{10} profile of a megacity [J]. Atmospheric Environment, 2009, 43(36): 5713-5722.
- [18] MCGOWAN H, CLARK A. Identification of dust transport pathways from Lake Eyre, Australia using Hysplit [J]. Atmospheric Environment, 2008, 42(29): 6915-6925.
- [19] 夏友龙,朱抱真. 冬季亚洲大陆冷高压形成和发展的物理机制研究[J]. 应用气象学报, 1992, 3(2):206-211.
- [20] 王颖,石汉青. 用静止气象卫星云图对西太平洋副热带高压进退的个例研究[J]. 气象科学, 2006, 26(3): 294-300.
- [21] GIGLIO L. MODIS collection 5 active fire product user's guide version 2. 4[R]. Lanham, MD: Science Systems and Applications, Inc., 2010.
- [22] 钟方潜,苏琪骅,周任君,等. 秸秆焚烧对区域城市空气质量影响的模拟分析[J]. 气候与环境研究, 2017, 22(2): 149-161.