

淮河流域重点城市大气污染源区特征的印痕分析

徐春萌 蔡旭晖[†] 宋宇

北京大学环境科学与工程学院环境科学系, 环境模拟与污染控制国家重点联合实验室, 北京 100871;

[†] 通信作者, E-mail: xhcai@pku.edu.cn

摘要 利用 NCEP-fnl 再分析气象资料和大气环境监测空气污染指数(API), 运用印痕模型, 对淮河流域重点城市(郑州、徐州和连云港)的大气污染源区进行分析, 内容包括 2010 年全年 API 指数大于 300 的重污染个例情况以及 API 大于 100 的所有污染个例的统计特征。研究结果表明: 重污染的出现往往伴随印痕空间分布形态与方向的极大改变, 污染发展加重阶段印痕影响区域长度收缩、侧向扩展, 污染最重的阶段则对应印痕影响区域和方向的急剧变化, 说明重污染过程与天气系统转换期的风速减小、风向改变有密切关系。统计表明: 郑州市的潜在污染影响源区主要分布在偏西和西北方向, 春季西北方向的影响最显著; 徐州市的潜在污染影响源区主要为西南方向, 秋季最显著; 连云港的潜在污染源区主要为西南和偏西方向, 西南方向的影响在秋季最显著。

关键词 淮河流域; 大气污染事件; 印痕模型; 影响源区; API 指数

中图分类号 X16

Footprint Analysis for the Pollutant Sources of Key Cities in the Huaihe River Basin

XU Chunmeng, CAI Xuhui[†], SONG Yu

State Joint Key Lab of Environmental Simulation and Pollution Control, College of Environmental Sciences and Engineering,
Peking University, Beijing 100871; [†] Corresponding author, E-mail: xhcai@pku.edu.cn

Abstract Based on NCEP-fnl reanalysis data and the air pollution index data of Zhengzhou, Xuzhou and Lianyungang in 2010, the footprint model is used to analyze the potential air pollutant source of those key cities in the Huaihe River Basin. Heavy air pollution episodes in which API is greater than 300 are analyzed, and episodes in which API is greater than 100 are used for statistical analysis. The results illustrate that heavy air pollution episode is often accompanied with great changes in the spatial distribution and the direction of the footprint, and the most polluted stage corresponds to dramatic changes in the affected area and direction of footprint, suggesting that heavy air pollution has close relationship with decrease of wind speed in weather system conversion period. Statistics show that the potential pollution source areas of Zhengzhou are mainly distributed in the west and northwest, and source areas in northwest have the largest effect in spring; the potential pollution source areas of Xuzhou are mainly distributed in the southwest, especially in autumn; the potential pollution source areas of Lianyungang are mainly distributed in the southwest and west, and source areas in southwest have the largest effect in autumn.

Key words Huaihe River Basin; heavy air pollution episode; footprint model; pollutant source; air pollution index

淮河流域是我国七大江河流域之一, 介于长江和黄河两流域之间, 位于中纬度副热带典型季风气候区, 地处我国东部南北气候过渡带, 跨越华北和华东地区, 包括湖北、安徽、河南、山东、江苏五省 40 个地区(市)。淮河流域总体地形平坦开阔, 区域内只有一个省会城市(郑州), 中小城市密布^[1]。天气气候学领域对于淮河流域的水汽输送研究成果较多, 对了解淮河流域的大气物质输送有一定的参考意义^[2]。但是, 天气气候学领域关注天气过程, 不能提供环境大气污染物输送的一般规律。此外, 对淮河流域大气污染情况的研究大多是对单个城市的研究^[3-8]。曹杨等^[3]、范瑜等^[4]、Du 等^[5]、朱玉周等^[6]、黄小蕾等^[7]和陈程等^[8]都曾对徐州、郑州和连云港的大气污染状况以及污染物浓度分布和变化进行分析, 其中朱玉周等^[6]、黄小蕾等^[7]和陈程等^[8]还从气象角度分析了气象要素与污染天气的关联。从对其他城市和地区大气污染问题的研究来看, 了解大气污染的区域影响和输送特征并进行污染源地分析是非常重要的。区域污染方面的研究目前主要集中在京津冀、长江三角洲和珠江三角洲等经济发达地区^[9-16]。张志刚等^[9]以及苏福庆等^[10]从气象角度分析了华北地区的污染物输送通道, 程真等^[11]、王艳等^[12]和 Shan 等^[13]利用模式模拟了长三角地区城市间的污染物影响和污染源地, 王淑兰等^[14]、何启超等^[15]和 Zhang 等^[16]模拟了珠三角地区城市间的污染物输送。在区域大气污染研究中, 扩散模型得到了广泛的运用^[12,15-18]。

除利用扩散模型研究大气污染过程以外, 以反向扩散原理为基础的印痕(footprint)分析方法也是研究污染过程的有力手段^[19-21]。印痕函数 f 是将浓度观测等受体信息与造成该浓度的源区域联系起来的一个传导函数^[22]。在未知源强分布的情况下, 由印痕函数的分布可以了解观测浓度的潜在影响源区域分布, 从而判断观测结果的空间代表性^[21]。印痕分析相比于其他定性分析方法(如流场分析、拉格朗日轨迹分析以及反向轨迹分析等), 最大优势是可以获得定量估算结果, 从而在观测资料的区域代表性、敏感源分析、源反演、污染过程分析等方面得到广泛应用。有关印痕分析原理与应用的详细论述见文献^[21]。由于印痕函数将浓度观测等受体信息与造成该浓度的源区域联系起来, 因此印痕分析方法越来越多地用于分析和解释观测事实、了解观测信息与污染源的关系^[23-24]。

本研究利用 NCEP-fnl 全球再分析资料、CAL-MET 模式和本研究组自主研发的印痕模型, 模拟淮河流域重点城市(郑州、徐州和连云港) 2010年逐日平均的印痕分布。将印痕计算结果与当地大气环境监测资料(API 指数)相结合, 对污染和重污染事件进行个例分析和统计分析, 探究淮河流域重点城市的污染物影响来源和重污染过程的规律。

1 模式、资料与方法

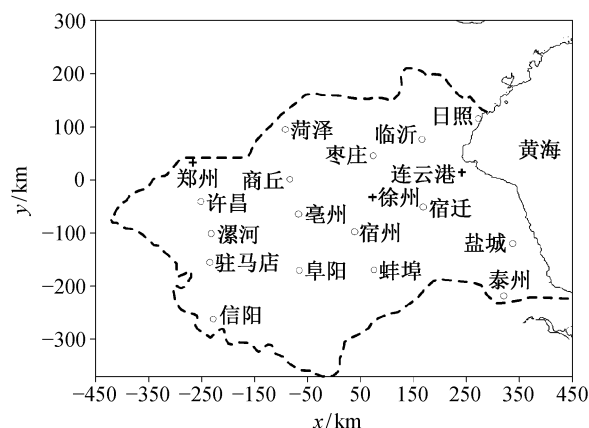
1.1 研究区域

本文研究区域为涵盖淮河流域主要城市的 900 km × 600 km 范围, 中心位置的经纬度为 34.5°N, 116.5°E。淮河流域边界及主要城市分布见图 1。区域内以平原为主, 西部为山丘区, 中部是平原, 东部毗邻黄海。区域内的郑州为省会城市, 靠近淮河流域西部的山区, 徐州位于淮河流域中部的平原地区, 连云港位于淮河流域东部, 毗邻黄海。因此, 本文选取郑州、徐州和连云港代表淮河流域的整体情况。

1.2 气象和大气环境监测数据

用于风场模拟的数据来自 NCEP-fnl 再分析资料。该资料的空间分辨率为 1°×1°, 时间分辨率为 6 小时。用于本研究计算的 NCEP-fnl 资料点共 80 个, 覆盖整个模式区域以及区域外围。提取的数据为风、温度、压力、湿度等, 垂直方向共 13 层, 各层面高度为 1000, 975, 950, 925, 900, 850, 800, 750, 700, 650, 600, 550, 500 hPa。

本文使用郑州、徐州和连云港 3 个城市的空气



+号表示本文研究的重点城市, 虚线为淮河流域的边界线

图 1 模拟区域的城市分布和流域边界
Fig. 1 Key cities in the simulated domain and boundary of the basin

污染指数(API)来反映当地的大气污染情况,采用环境保护部数据中心提供的日均 API 指数值^①。使用的大气环境监测数据包括 3 个城市 2010 年全年的逐日空气污染指数、首要污染物、空气质量级别和空气质量状况。

1.3 模式与方法简介

印痕模拟计算采用本研究组自主研发的印痕模式。本文采用拉格朗日随机粒子反向扩散模式计算印痕函数。对应于浓度观测点的位置、高度以及每一时次的观测时段,释放大量随机粒子并跟踪它们在过去的时次方向上的运动情况,记录每个粒子在近地面的滞留时间,从而获得印痕函数^[21,25]。

作为印痕计算的气象驱动,我们在本文中采用 CALMET 诊断模式^[26]模拟风场和边界层湍流参数。该模式可以从气象站实测风资料和 NCEP-fnl 分析资料出发,进行插值与质量守恒约束调整,获得适当分辨率的三维风场。气象场计算的模式网格距为 10 km,垂直方向自地面至 3000 m 高度不等距分为 10 层。印痕计算的水平网格与气象模拟的网格相同。

具体分析方法是,首先以 CALMET 模式诊断出模拟区域的逐时气象场,然后用印痕模式计算选定城市(郑州、徐州和连云港)对应的逐小时印痕分布,最后根据环境监测的日均时段(前一日中午 12 时至当日中午 12 时)对小时印痕进行平均,获得对应的日均印痕结果。

2 结果和分析

2.1 区域大气污染情况

首先,对 2010 年淮河流域 3 个重点城市(郑州、徐州、连云港)的 API 指数进行分析,了解该地区总体大气环境质量和污染情况。图 2 显示 3 个城市全年的 API 指数变化。可见 3 个城市的 API 主要分布在 50~100 之间,API 高于 300 的天数不多,API 高于 100 的时段主要集中在 10 月和 11 月。统计全年的 API 指数得到:郑州中度污染($200 < API \leq 250$) 1 天,重度污染($API > 300$) 1 天;徐州中度重污染($250 < API \leq 300$) 2 天,重度污染 2 天;连云港中度污染 1 天,中度重污染 1 天,重度污染 2 天。

本文主要关注 API 高于 100 和 API 高于 300 的情况。为叙述方便,本文将 API 高于 100 的情况称为污染事件,将 API 高于 300 的情况称为重污染事件。图 3 给出 3 个城市重污染事件发生前后几天的 API 变化情况,表 1 列出 3 个城市出现重污染事件的对应日期。从图 3 可以看出,3 个城市共有 5 次重污染事件发生,重污染过程中徐州与连云港出现重污染的日期和 API 指数变化趋势基本上一致。API 指数变化的具体情况见 2.2 节重污染个例分析。

API 指数高于 100 的污染事件出现的统计结果见表 2。可以看出,2010 年郑州的污染事件共有 100 天,徐州 29 天,连云港 30 天。郑州夏季出现污

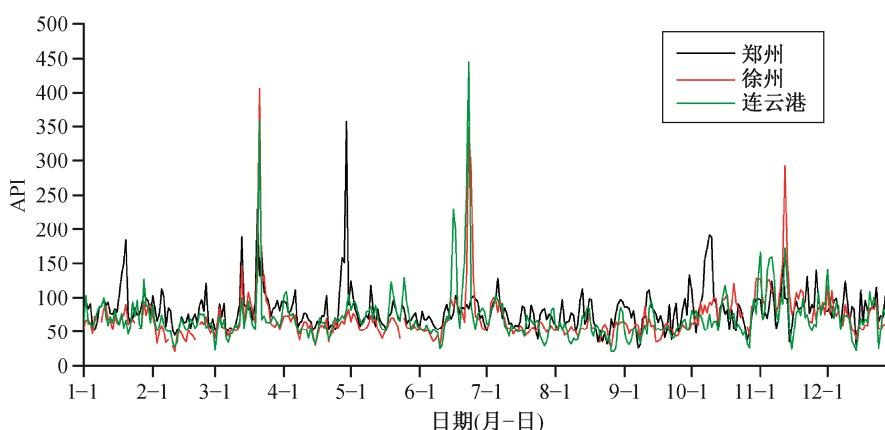


图 2 淮河流域重点城市 2010 年 API 指数
Fig. 2 API of key cities in Huaihe River Basin in 2010

① http://datacenter.mep.gov.cn/report/air_daily/air_dairy_aqi.jsp

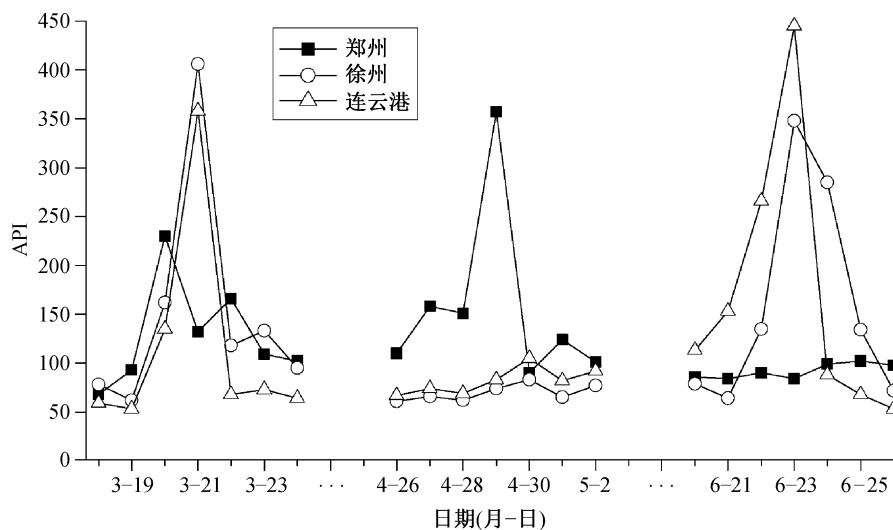


图3 淮河流域重点城市2010年重污染时段前后的API指数
Fig.3 API before and after heavy air pollution episode in 2010

表1 2010年重污染日期及API值
Table 1 Date of heavy air pollution episode

城市	日期(月-日)	API
郑州	04-29	357
徐州	03-21	406
	06-23	348
连云港	03-21	358
	06-23	445

表2 各季节污染事件(API>100)的天数
Table 2 Episodic days with API>100 in four seasons

城市	冬季	春季	夏季	秋季
郑州	15	15	5	13
徐州	2	6	4	17
连云港	4	8	8	10

染事件的天数较少,其他季节出现污染事件的天数较多;徐州秋季的污染较为严重,2010年一半以上的污染事件发生在秋季;连云港冬季污染较轻,其他季节污染略重。

2.2 重污染情况的个例分析

对区域内3个城市出现的5次重污染个例,逐一分析其前后多日的印痕变化,以了解重污染发生、发展的源区情况。由于所研究的城市处于模拟区域的偏北部,因此在绘制印痕图时,选取淮河流域偏北部的部分区域。

2.2.1 郑州重污染个例

从图3看出,郑州4月29日的API指数出现峰值,是这次过程中污染最重的一天。图4显示这次重污染过程前后的印痕分布,可以看出,在重污染事件发生的当日和发生前,郑州的印痕主要分布在西北方向,说明29日的重污染与西北方向的污染源有关。4月30日的印痕既有偏西方向也有偏东方向,反映该日的风向具有从偏西变化为偏东的过程。5月1日的印痕则恢复到主要分布在郑州西边。5月2日和3日的印痕稳定在郑州的西南方向。以29日为界,郑州的印痕形态和主导方向都经历了明显的变化,反映天气系统变化导致的风场和湍流扩散条件的转换。这一转换过程中风速骤然变小,风向变化大,有利于郑州市自身以及周边地区排放的污染物在当地积累,从而形成29日的重污染。

2.2.2 徐州重污染个例

徐州API指数高于300的有两天,分别为3月21日和6月23日(图3)。图5显示徐州3月21日重污染前后的日平均印痕,可见在这次重污染过程中,印痕分布的方向和形态每日都不同,19日的印痕主导方向偏南,20日印痕主导方向偏西北,21日印痕收缩在徐州市区周边,22日的印痕主要分布在东南方向,23日转为东北方向。可以看出,在这次气象条件多变的过程中,当印痕收缩在徐州市区周边偏东南的较小区域时(21日),发生了重度污染。

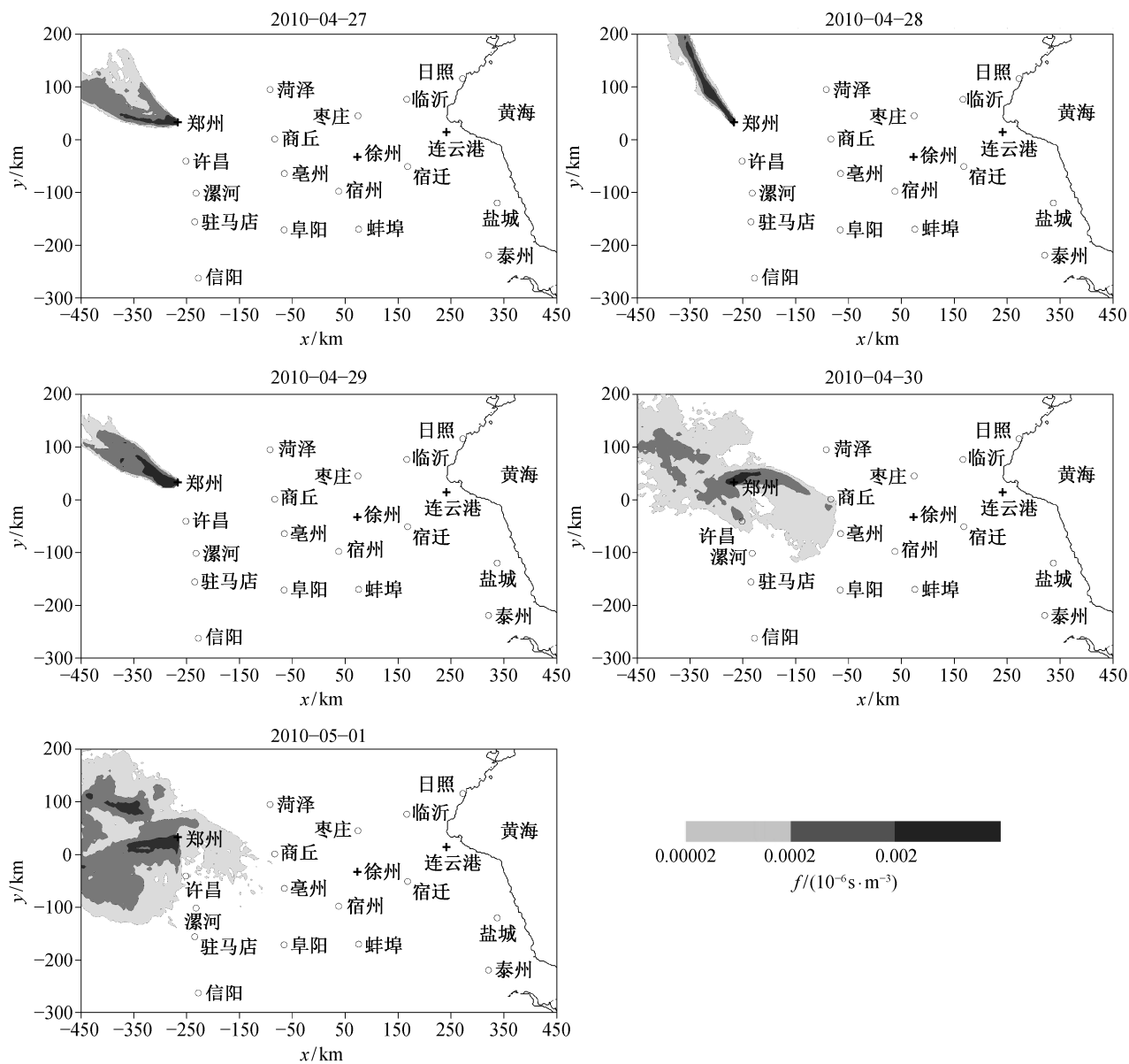


图 4 郑州 4 月 29 日重污染前后的印痕
Fig. 4 Footprint before and after the April 29th heavy pollution in Zhengzhou

表明当天的小风累积以及市区偏东南的局地污染源对这次污染的形成有极大的影响。

徐州 6 月 23 日重污染个例的印痕变化情况(图略)与 3 月 21 日个例相似。从图 3 可见, 6 月 21 日之前徐州的空气污染程度较轻, 21 日 API 指数开始上升, 23 日达到峰值, 24 日的 API 指数依旧较高, 直到 26 日空气质量才回到良好。对应的逐日印痕结果显示, 重污染前两天的印痕主导方向变化大, 21 日的印痕主要分布在徐州偏东和东北方向, 22 日的印痕转为偏南方向, 印痕影响区域窄而长。23

日, 印痕在徐州近处增宽, 其主体突然大幅收缩到徐州附近偏东南的较小范围, 对应重污染的出现。较不同的是, 之后的 24 日和 25 日印痕方向稳定, 主要为偏东分布。天气系统转换过程中风速变小、风向转换的过程以及徐州偏东南的污染源可能对这次重污染的出现有重要影响。

2.2.3 连云港重污染个例

连云港市 3 月 21 日和 6 月 23 日分别出现重污染天气(图 3)。3 月 21 日的重污染与同期徐州的情况相似, 印痕变化(图略)也有相似的特征。21 日前

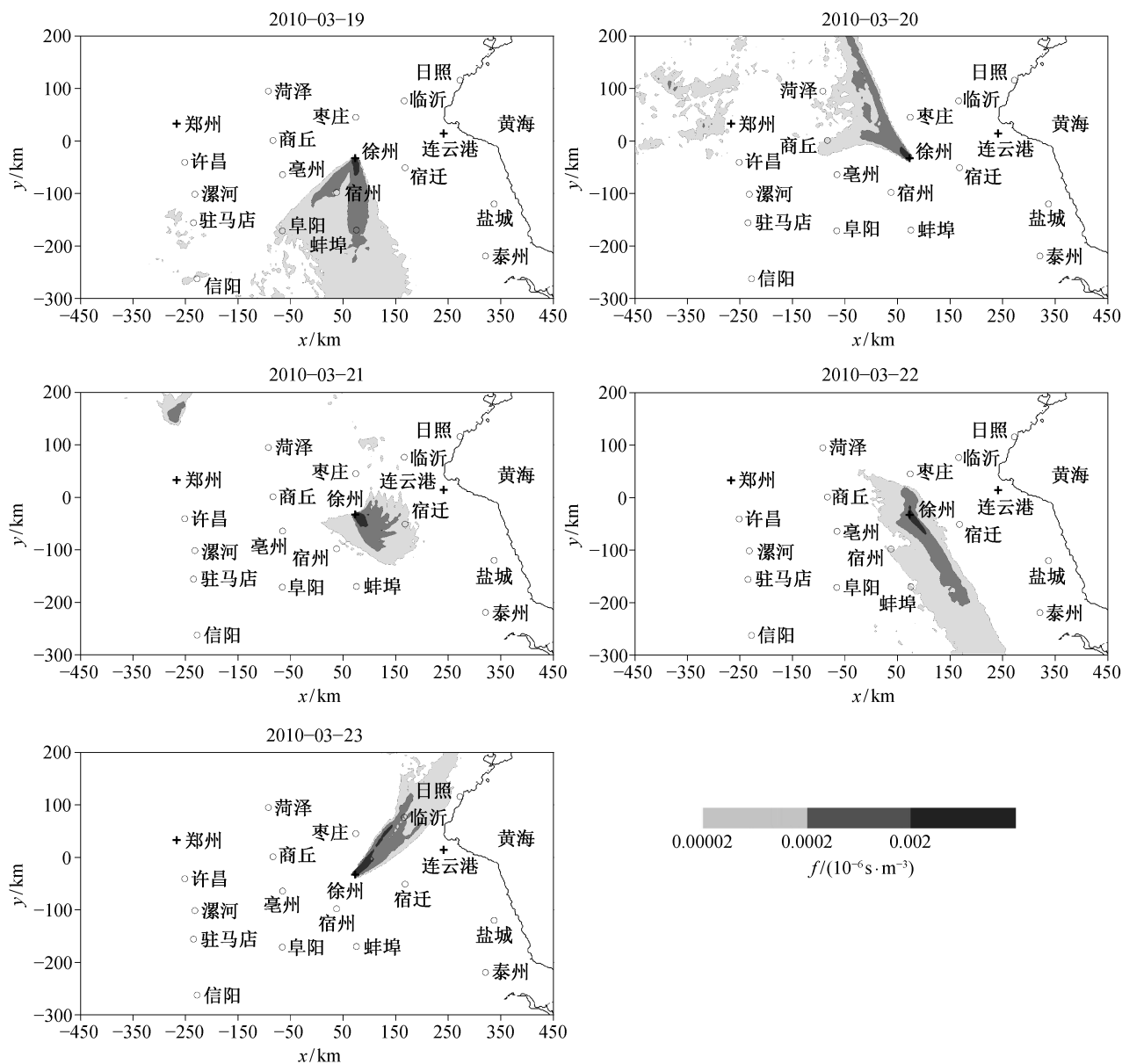


图5 徐州3月21日重度污染前后的印痕

Fig. 5 Footprint before and after the March 21st heavy pollution in Xuzhou

的2天内,印痕区域由偏南方向大幅度地变为偏西和西北方向。21日,印痕在连云港周围增宽,北部影响范围收缩,随之出现重污染。22日,印痕区域很快由偏北转换为偏南。可见这次重污染正好出现在这样一个风速减小、风向反转的过程中。

连云港6月23日的重污染事件对应的印痕变化见图6,可见21日就已出现印痕在远处增宽、长度范围收缩的现象,22日印痕大幅度由东北转向偏南,并遗留大面积印痕区域在连云港以东的海面上。这一过程对应着21日和22日API指数的攀升

(图3)。23日,印痕区域再次经历往偏东方向调整、宽度大幅增加、长度收缩的过程,对应重污染的出现。之后的24日和25日,印痕窄而长,并且大部分伸向海面,对应API指数的骤降。

比较连云港与徐州同一时间的重污染个案发现,两地印痕变化的情况相似,表明影响这次重污染过程的气象条件(天气系统)是区域性的。

2.3 API 高于 100 的污染事件的印痕特征统计

前面对3个城市的5个重污染个案的印痕分布

表 3 不同印痕类型的污染事件天数及出现几率
Table 3 Number of air pollution episode in different direction of footprint

城市	天数(出现机率/%)									总天数
	北	东北	东	东南	南	西南	西	西北	城市周围	
郑州	1(2)	5(11)	2(4)	2(4)	5(11)	7(15)	7(15)	8(17)	10(21)	47
徐州	0(0)	3(10)	2(7)	1(3)	3(10)	6(21)	3(10)	3(10)	8(28)	29
连云港	2(7)	1(3)	0(0)	0(0)	3(10)	6(20)	5(17)	4(13)	9(30)	30

21%，均出现在秋季。其他方向，除了北和东南出现较少以外，印痕出现的几率较为均匀。即，周边不同方向的污染源均可能影响徐州的污染事件。连云港的污染事件中印痕分布在西南和偏西方向性最强，二者可占 37%，其中西南方向的印痕大多出现在秋季。由于连云港以东为海面，污染源较少，因此污染事件中几乎不出现偏东方向的印痕。印痕偏西和西南的方向性强也说明此处的污染事件中，污染物总是来自内陆一侧。

3 总结与结论

本文利用 NECP-fnl 再分析气象资料，通过风场诊断模式和印痕模型，分析淮河流域重点城市(郑州、徐州、连云港)重污染事件(API>300)发生过程的印痕分布与变化，统计分析了所有污染事件(API>100)的潜在污染源地，得到以下主要结论。

1) 重污染事件发生过程中，伴随着印痕分布区域、方向和形态的极大改变。当印痕在近处增宽、长度收缩时，往往对应最严重的污染时段。这表明重污染的出现主要与气象条件的转换过程相关，特别是与风向的转换和小风停滞条件有关。

2) 在所有 API 指数高于 100 的污染事件中，围绕城市周围的印痕类型出现的比例最高，可分别达到污染事件总数的 20%~30%。这表明印痕在近处增宽、方向多变、长度收缩的情况的确有利于污染事件的出现。各城市污染事件出现的影响源区也具有一定的方向性。郑州市的潜在污染源区以西北、西南和偏西方向为主。徐州的潜在污染源区主要分布在西南方向，其中秋季此特征最明显。连云港的潜在污染源区主要为来自内陆的西南和偏西方向，偏东方向的海面对连云港市的污染事件几乎没有影响。

致谢 感谢北京大学环境科学与工程学院李沁怡同学在本文印痕计算前期工作中的帮助。

参考文献

- [1] 水利部淮河水利委员会. 淮河志(第二卷): 淮河综述志. 北京: 科学出版社, 2010: 1-28
- [2] 江志红, 梁卓然, 刘征宇, 等. 2007 年淮河流域强降水过程的水汽输送特征分析. 大气科学, 2011, 35(2): 361-372
- [3] 曹杨, 朱守超. 徐州市环境空气质量现状及污染防治. 环境科技, 2010, 23(2): 86-88
- [4] 范瑜, 邹塞. 徐州市春季 PM10 及 PM2.5 污染来源分析. 环境科技, 2014, 27(2): 49-52
- [5] Du Xile, Lu Changhe, Wang Hairong, et al, Trends of urban air pollution in Zhengzhou City in 1996-2008. Chinese Geographical Science, 2012, 22(4): 402-413
- [6] 朱玉周, 刘和平, 郭学峰, 等. 郑州市空气质量状况及冬季持续污染过程的气象机理分析. 气象与环境科学, 2009, 32(3): 47-50
- [7] 黄小蕾, 曹广林. 连云港市空气污染特征影响因素研究. 连云港职业技术学院学报, 2002, 15(2): 21-24
- [8] 陈程, 杨伟波. 连云港市 PM2.5 污染特征及影响因素分析研究. 环境科学与管理, 2014, 39(2): 120-122
- [9] 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. 环境科学研究, 2004, 17(1): 14-20
- [10] 苏福庆, 杨明珍, 钟继红, 等. 华北地区天气型对区域大气污染的影响. 环境科学研究, 2004, 17(3): 16-19
- [11] 程真, 陈长虹, 黄成, 等. 长三角区域城市间一次污染跨界影响. 环境科学学报, 2011, 31(4): 686-694
- [12] 王艳, 柴发合, 王永红, 等. 长江三角洲地区大气污染物输送规律研究. 环境科学, 2008, 29(5):

- 1430-1435
- [13] Shan Wenpo, Yin Yongquan, Lu Haixia, et al. A meteorological analysis of ozone episodes using HYSPLIT model and surface data. *Atmospheric Research*, 2009, 93: 766-776
- [14] 王淑兰, 张远航, 钟流举, 等. 珠江三角洲城市间空气污染的互相影响. *中国环境科学*, 2005, 25(2): 133-137
- [15] 何启超, 蔡旭晖, 宋宇, 等. 珠江三角洲区域大气扩散和输送特征诊断分析. *北京大学学报: 自然科学版*, 2013, 49(6): 945-954
- [16] Zhang Y H, Hu M, Zhong L J, et al. Regional integrated experiments on air quality over Pearl River Delta 2004 (PRIDE-PRD2004): overview. *Atmospheric Environment*, 2008, 42: 6157-6173
- [17] Huo Qing, Cai Xuhui. Lagrangian stochastic simulation of atmospheric dispersion from sources near the ground. *Terrestrial Atmospheric and Oceanic Science*, 2014, 25(1): 77-90
- [18] 霍庆, 蔡旭晖, 宋宇, 等. 全国大气扩散输送模式与区划研究. *环境科学学报*, 2012, 32(2): 360-366
- [19] Schmid H P. Source areas for scalars and scalar fluxes. *Boundary-Layer Meteorol*, 1994, 67: 293-318
- [20] Flesch T K. The footprint for flux measurements, from backward Lagrangian stochastic models. *Boundary-Layer Meteorol*, 1996, 78: 399-404
- [21] 蔡旭晖. 湍流微气象观测的印痕分析方法及其应用拓展. *大气科学*, 2008, 32(1): 123-132
- [22] Pasquill F, Smith F B. *Atmospheric diffusion*. West Sussex: West Sussex Press, 1983
- [23] 蔡旭晖, 丑景垚, 宋宇, 等. 北京市大气静稳型重污染的印痕分析. *北京大学学报: 自然科学版*, 2008, 44(1): 135-141
- [24] Cai Xuhui, Song Yu, Zhu Tong, et al. Glacier winds in the Rongbuk Valley, north of Mount Everest: 2. Their role in vertical exchange processes. *J Geophys Res*, 2007, 112: D11102
- [25] Cai Xuhui, Leclerc M Y. Forward-in-time and backward-in-time dispersion in the convective boundary layer: concentration footprint. *Boundary-Layer Meteorol*, 2007, 123: 201-218
- [26] Scire J S, Strimaitis D G, Yamartino R J, et al. *A user's guide for the CALPUFF dispersion model. Version 5*. Concord, MA: Earth Tech Inc, 2000: 1-15