

# 保定—雄安新区近地面大气流动与轨迹输送特征

栗涵舫 蔡旭晖<sup>†</sup> 康凌 宋宇

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

<sup>†</sup> 通信作者, E-mail: xhcai@pku.edu.cn

**摘要** 基于 2016—2017 年 22 个地面气象站点的观测资料和 NECP-fnl 数据, 使用 CALMET 风场诊断模式, 计算保定—雄安新区两个年份的逐时风场和每日输送轨迹。根据风场与流动轨迹特性, 从大气扩散输送的角度, 将当地大气流动划分为系统大风型、局地环流型与弱系统影响型 3 类。统计分析结果表明: 大气流动 3 个类型的大致比例为 10%, 50% 和 40%; 系统大风型流动的占比较低, 且春夏季较多, 秋冬季较少; 局地环流型流动以秋冬季较多, 春夏季较少; 弱系统影响型的出现频率在全年变化不大, 但在秋冬季出现频率稍低; 大气流动受西北部山地影响, 山地—平原风可控制山前约 100 km 的范围, 覆盖保定市和雄安新区大部; 山地—平原风的转换可在山前区域形成部分时段的小风状况; 该地区大气输送的主要路径是西南—东北方向, 对应大尺度背景流动情况; 西北—东南方向的横向输送距离较短, 对应山地—平原风地形环流的影响; 在系统大风和弱系统影响下, 冬春季会出现部分直接向东南方向的输送轨迹。

**关键词** 保定—雄安新区; 大气流动; 风场; 输送轨迹

## Air Flow and Transport Patterns over Baoding-Xiong'an Area

LI Hange, CAI Xuhui<sup>†</sup>, KANG Ling, SONG Yu

State Key Lab of Pollution Control, College of Environmental Sciences, Peking University, Beijing 100871;

<sup>†</sup> Corresponding author, E-mail: xhcai@pku.edu.cn

**Abstract** Hourly wind fields were obtained in the period of 2016 to 2017, using the diagnostic model CALMET over the Baoding-Xiong'an area, Hebei province. Data from 22 meteorological observatories and the NCEP-fnl dataset were used in the procedure, and daily trajectories were derived. According to characteristics of the wind fields and trajectories, local air flows were classified into three types: systematic flow, local circulation, and weak synoptic winds. The analysis results depict that the proportion of the three type of flows are approximately 10%, 50% and 40%. The frequency of systematic flow is quite low, with a little more occurrence in spring and summer than that in autumn and winter. The local circulation appears more in autumn and winter than that in spring and summer. The frequency of weak synoptic winds changes little over the whole year, but slightly lower in autumn and winter. The air flow is characterized by the mountains in the northwest of the region, mountain and plain breeze circulations influence the range of about 100 km in front of the mountain, covering Baoding city and a major part of Xiong'an area. The transfer of mountain and plain breeze causes light winds in this area timely. The major transport pathways in this region are southwesterly and northeasterly, corresponding to large-scale background flows. Lateral transports caused by mountain and plain breeze circulations are relatively short in northwest and southeast directions. Occasionally, under conditions of systematic flow and weak synoptic winds in winter and spring, transport trajectories can also extend to southeast.

**Key words** Baoding-Xiong'an area; air flow; wind field; transport trajectory

河北省保定市位于华北平原东北部的太行山东麓,南接石家庄,北邻首都北京,是京津冀城市群的重要城市之一。2017年4月,以保定市所辖雄县、容城和安新3个县为主体,设立雄安新区。雄安新区位于京津冀地区的腹地,其生态环境条件和资源环境承载能力情况值得关注。近年来,京津冀地区多次出现大范围高浓度的大气污染事件,保定-雄安一带正是大气污染的核心区域<sup>[1]</sup>。

保定地区的主要大气污染物为PM<sub>2.5</sub>,浓度呈现秋冬高、夏季低的变化趋势,空气污染状况十分严重<sup>[2-4]</sup>。从2013年2月到2015年2月的两年中,生态环境部公布的10个空气质量最差城市榜单中就包含保定、邯郸和邢台<sup>[5]</sup>。在沿太行山的邯郸-石家庄-保定-北京一线,经常形成西南-东北走向的重污染带<sup>[6]</sup>。

保定市处于海拔约为40 m的平原地区,西北方向约50 km进入太行山山地,海拔上升到1000 m以上,山地与平原落差很大。保定地区的平均主导风向为西南偏南风,次主导风向为东北偏北风,年均风速为1.8 m/s,地面气流明显受太行山地形影响<sup>[7]</sup>。HYSPLIT后向轨迹模型分析结果表明,保定-雄安新区污染状况对风向不够敏感,几乎各个方向都有污染物的跨区域输送,其中来自西北的远距离传输和来自南方的短距离传输占比最高<sup>[3,8]</sup>,这些特征与北京地区主要受其西南方城市的输送作用及华北平原偏南气流弱辐合影响<sup>[1]</sup>的情况明显不同。另外,与保定相邻的石家庄地区,大气流动状态对地形有很强的敏感性,并影响当地的污染扩散输送特征<sup>[9]</sup>。这些情况说明,虽然都是太行山沿线的城市和地区,北京、保定和石家庄的局地大气流动特性却有很大的差别。过去对北京地区及华北平原的整体大气流动特征关注较多<sup>[10-12]</sup>,对石家庄和保定地区单独的研究相对不足。鉴于雄安新区的设立与开发,以及保定-雄安新区的大气污染现状,开展这一地区的环境气象背景研究十分必要。

单个时次的风场是静态(或瞬态)的,只能反映大气流动场的空间特征。轨迹分析可以直观地表现大气输送的方向、路径和影响范围,反映风场时空变化造成的大气输送效果,但难以把握整个区域流场的水平变化。基于观测资料和客观分析模式的风场诊断方法可以获得接近真实情况的大气流动场,避免预报模式可能引入的模拟误差。因此,结合风场与轨迹的特性进行分析,可以更好地理解当地的

大气流动状态。

HYSPLIT轨迹模式主要应用于大-中尺度的大气过程,但在中、小尺度气象过程的研究中,输送轨迹分析的应用历史十分久远<sup>[13]</sup>。本文通过风场诊断和轨迹分析,研究保定-雄安地区的大气流动和输送规律。通过对2016—2017年气象资料的模拟分析,研究保定-雄安地区风场和输送扩散的时空分布与季节变化特征。由于风场模式整合了区域内所有气象站点的观测信息,大气输送轨迹则贯穿不同时刻风场的连续演变,因此本研究可克服前人在中-小尺度气象过程研究中只对少数站点气象资料进行分析的局限性,给出整个区域近地面大气流动与输送的总体特征。

## 1 模式与资料

本研究采用CALMET模式进行风场诊断,并用北京大学开发的轨迹计算模式进行分析。CALMET是由美国加州空气资源委员会(California Air Resources Board)开发的系列模式之一,以California和Meteorology字头组合,代表气象模式。该模式作为美国环境保护局推荐的大气扩散模拟系统的一部分,也可以独立使用。模式的计算流程分为两步,第一步,给出风场的第一猜值,由其他模型所得出的三维风场提供,或者取区域内平均风场;第二步,引入观测数据,使用距离反平法,在模拟区域格点上进行插值,然后进行风场的平滑处理、垂直速度计算以及质量守恒的调整,并获得三维风场<sup>[14]</sup>。

本研究使用的数据包括美国国家环境预报中心提供的全球分析资料(NCEP-fnl,每日4次)和研究区域内22个地面气象站的资料(每日逐时),数据时间为2016和2017年全年。研究区域的地形和地面测站分布见图1,其中容城、雄县和安新三地的连线大致代表雄安新区范围。部分测站分布于模式区域之外,图1中未显示。图1所示模式的水平范围为260 km×200 km,模式中心的经纬度为38.87°N, 115.76°E,大致落在保定东部至雄县一带的雄安新区境内。模式的水平网格距为4 km,自地面至3300 m高度,垂直方向不等距地分为6层。

首先通过CALMET模式得到逐时的风场系列,然后使用轨迹模式进行计算和图形显示处理。将轨迹计算的出发点设为模式中心,代表保定-雄安一带的虚拟污染排放情况。使用10 m风场代表近地面大气环境,计算该模式层面的输送轨迹。每条轨

迹的计算时间为2天(48小时),计算的时步为10 min。通过最邻近时刻的两个风场和最近距离的4个水平网格点线性内插值,得到轨迹模式运行对应时间和空间点的风向和风速。该轨迹模式为本研究组自主开发,已成功应用于珠江三角洲<sup>[15]</sup>和海南岛<sup>[16]</sup>等地区的污染气象过程模拟分析。

## 2 模拟结果与分析

### 2.1 方法概述

风场诊断结果可以绘制成矢量场图,进行人工判读和分析。对两年的逐时风场进行分析,工作量很大。我们参考Pack<sup>[13]</sup>的方法,将一天中每小时正点出发的轨迹(共24条)画在一张图上,代表该日的轨迹输送特征。对每条轨迹,按其从原点(用“@”标记)出发的时刻进行标记,同时在轨迹上每间隔3小时做一个节点标记。这样,不仅可以通过所有轨迹的形态了解整天的大气输送状况,而且可以跟踪单条轨迹的时空变化,了解风速和大气流动场的总体演变特征。将轨迹特征与当天的风场日变化相结合,可以判断该日的大气流动和输送类型。

本文主要从大气扩散能力方面考虑当地大气流动与输送特征的分类。由于风速是决定扩散能力的重要因素,风速的大小和持续性又明显地反映在轨迹的形态上,因此按照轨迹形态并参照风场来划分当地的流动形态。与天气分型主要关心气压场的形态和空间分布相比,本文关心的是中尺度的边界层流动,其主要影响因素包括地面热力-动力作用、区域地表特征(土地类型和植被情况等)和地形以及背景天气系统等。上述分类方法力求与这些已知的影响因素相关联,从而使其具有物理意义。由于所关心的水平尺度比天气尺度小,同时边界层大气受地表特征、地形以及湍流过程影响,流动性质复杂,对其进行分类统计并描述其主要特征,有助于增进对保定-雄安新区低层大气运动性质的认识,对解释该地区经常出现的重污染现象有现实意义。另外,本文建立的分析方法对研究其他地区的局地大气流动性质也有一定的参考价值。

### 2.2 分类依据

通过对2016—2017年每日轨迹和风场的判读,我们设定如下标准,将保定-雄安新区的大气流动分为3个类型,并按年、月和季节进行统计。

第一类:系统大风型。输送轨迹同时满足以下条件:1)从原点出发的轨迹迅速离开区域中心,轨

迹终点距离原点100 km以上;2)24小时内风向基本上不变,即轨迹不发生明显的弯折。如此,则把当天的大气流动划归系统大风型,具体个例如图2所示。该流动形态主要受外界较强天气系统的影响,扩散输送条件良好,污染物可以较快地随风输送出模式区域。

第二类:局地环流型。输送轨迹同时满足以下条件:1)研究区域在一天之内无主导风向,轨迹多次改变方向,并表现出白天偏向西部山地、夜间折返回平原地区的趋势;2)轨迹盘旋在出发点附近,轨迹终点距离原点100 km内。这种情况的个例见图3。图3(a)显示,所有轨迹呈东南-西北向分布,往复变化,与当地山地-平原风的日夜转换规律一致,风速很小,轨迹密集。图3(b)和(c)中,中午之前出发的轨迹呈西南走向,午后15时开始,轨迹明显地向西部山地偏转,表明平原风的影响开始出现,入夜21时后重新回到偏西南的流动形态。图3(d)中轨迹极为密集,模式中心区域风速很小,需从风场的日变化进一步判断当天流场受局地大气环流的影响。需要说明的是,山地-平原风环流是本研究区域最具特色的大气流动,其机制与山谷风相同,尺度略大,因此本文称其为局地环流类型。

第三类:弱系统影响型,介于系统大风型与局地环流型之间。受外界较弱天气系统影响,研究区域处于天气系统快速变化的过渡状态。此时传输速度较快,轨迹方向在一天内变化很大。此类型轨迹个例见图4。从图4(d)可以看出,部分个例的轨迹仍显示山地-平原大气环流带来的效应。

从轨迹输送的方向和影响范围来看,各流动类型与当地大气扩散条件有明显的关系。总体而言,研究区域大气的扩散能力以系统大风型为最强,弱系统影响型次之,局地环流型较差。

### 2.3 分类统计结果

将保定-雄安新区3个类型的大气流动状态按季节统计出现次数(天数),结果见表1。统计结果显示,虽然2016与2017年各大气流动类型出现的天数有所不同,但总体上变化不大。在所有流动形态中,局地环流型占比最高(约占一半),是该区域最常见的大气流动类型;系统大风型的出现频率最低,不到10%;其余约40%为弱系统影响型。从表1还可以看出,春夏季出现次数较多的是系统大风型和弱系统影响型流动,秋冬季出现次数较多是局地环流型流动,从侧面说明保定-雄安新区春夏季的扩

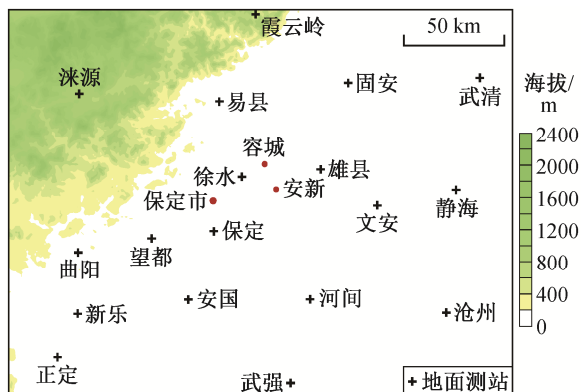


图 1 研究区域地形和地面气象测站分布

Fig. 1 Terrain and meteorological stations in model domain

散条件好于秋冬季。

从各流动类型出现日数的逐月分布情况(图 5)可以看出, 2016 和 2017 年的季节变化趋势有较好的一致性。系统大风型流动主要出现在春夏季; 局地环流型则相反, 春夏季为低值, 秋冬季出现频率高; 弱系统影响型全年变化较小, 但在初秋和入冬月份出现的频率明显偏低。系统大风型流动出现的次数在 2017 年的多数月份都多于 2016 年(图 5(a)), 弱系

统影响型也有这种情况(图 5(c)), 但局地环流型流动 2017 年出现的次数略少于 2016 年。系统大风型流动出现的总频数较少, 两年间的变化相对较大。

## 2.4 典型大气流动场的日变化

3 个大气流动类型中, 系统大风型风场的日变化最小。由于研究区内系统大风型的情况较少发生(表 1), 因此维持整天大风且风向不变的典型个例很少。这可能与研究区域内、外特定的山地-平原地形分布有关, 也可能与天气系统在该区域的变化特点有关。例如图 2(a)中个例, 在当日凌晨 01:00, 该地区还以北风和东北风为主, 西部山前一带还能看出夜间山地下坡气流的影响。随着时间的推移, 风向转为西南向, 午后风速增大, 整个风场受偏南和西南风控制, 风向较为稳定。尽管如此, 在山地与平原的交界地带, 风场仍然有一些扰动, 有白天从平原吹向山地、夜晚从山地吹向平原的趋势。因此, 可以认为是当地地形产生的山地-平原风带来的效应。

局地环流型是当地出现最多的大气流动形式, 2017 年 8 月 10 为该流动类型的典型个例(图 6)。当

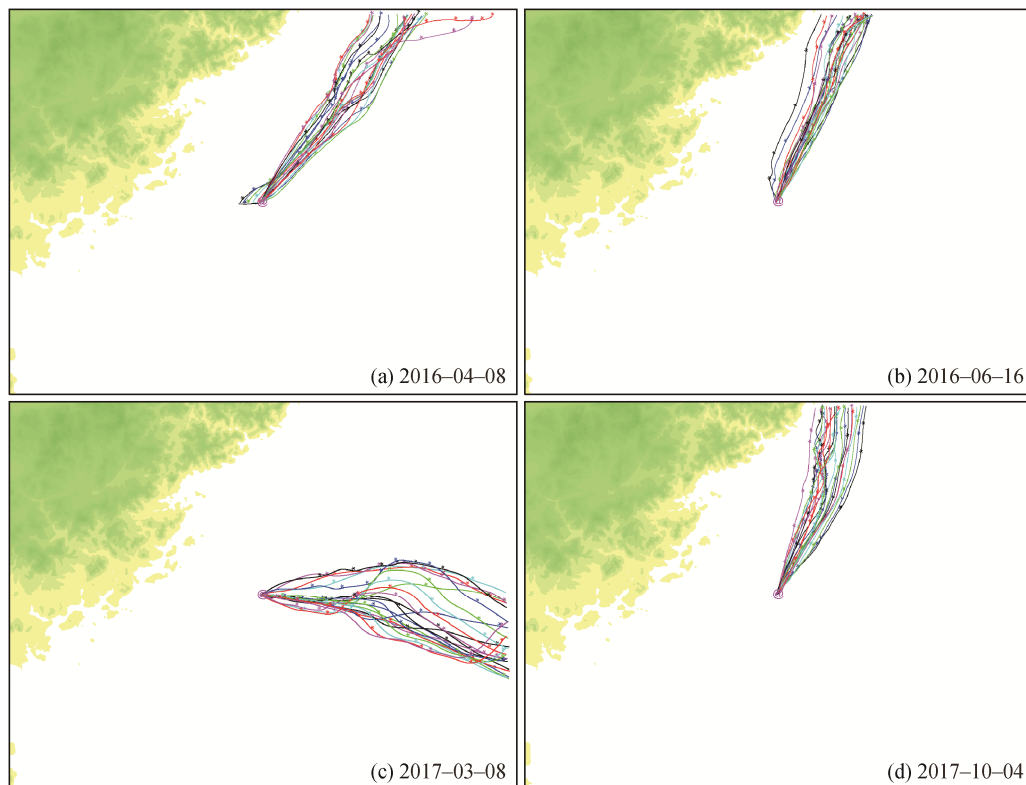


图 2 系统大风型流动轨迹个例

Fig. 2 Trajectories under systematic flow type



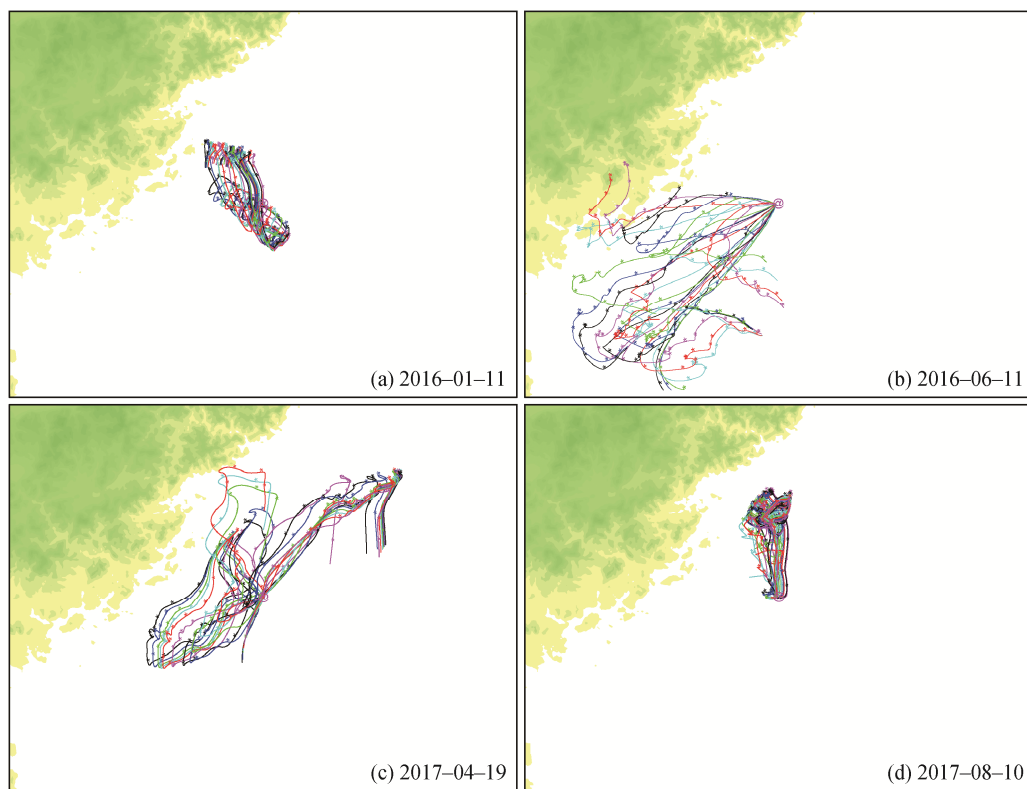


图 3 局地环流型的轨迹个例  
Fig. 3 Trajectories under the type of local circulation

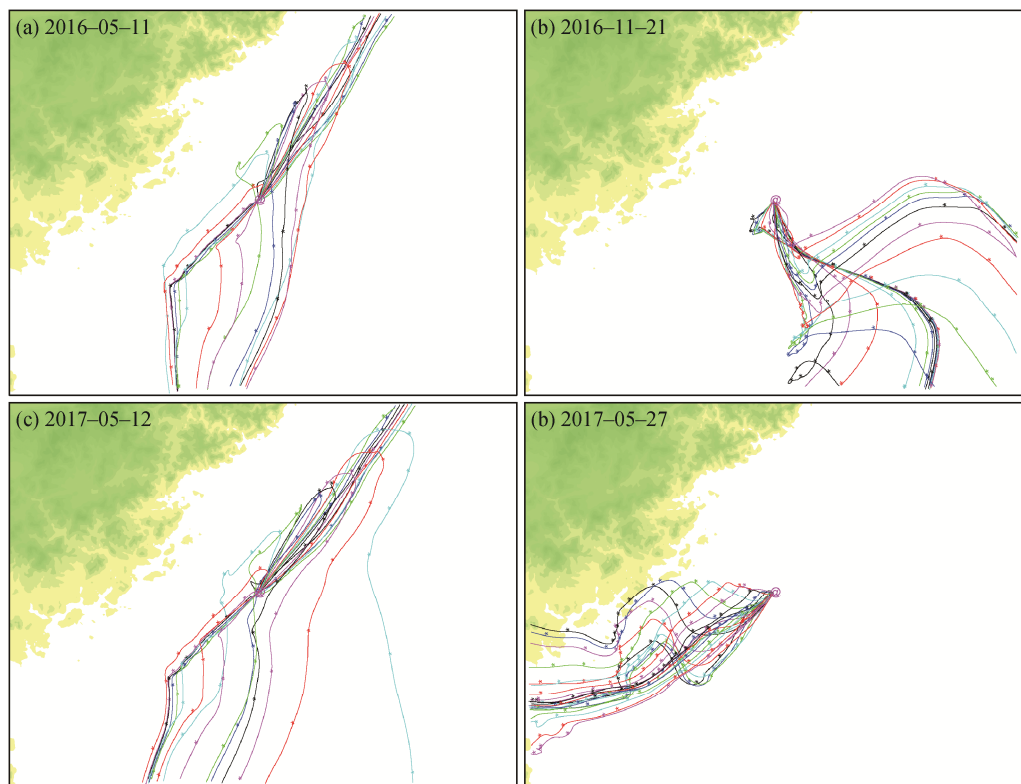


图 4 弱系统影响型轨迹个例  
Fig. 4 Trajectories under the type of weak synoptic winds

表 1 2016 和 2017 年各大气流动类型日数统计

Table 1 Days of three flow types in 2016 and 2017

大气流动类型	春季		夏季		秋季		冬季		总日数(占比/%)	
	2016 年	2017 年	2016 年	2017 年	2016 年	2017 年	2016 年	2017 年	2016 年	2017 年
系统大风型	9	11	7	14	4	8	3	3	23 (6.3)	36 (9.9)
局地环流型	46	32	47	42	67	56	55	51	215 (58.9)	181 (49.6)
弱系统影响型	37	49	38	36	20	27	32	36	127 (34.8)	148 (40.5)

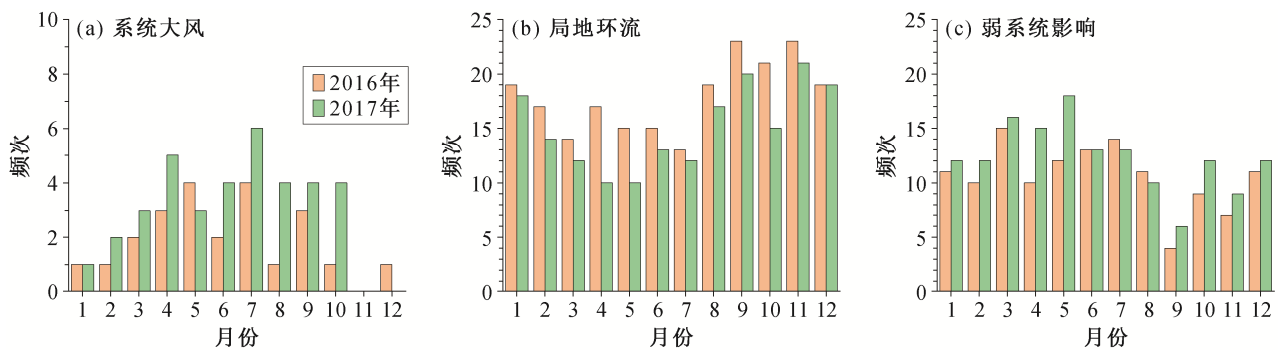


图 5 各流动类型出现频次的逐月分布  
Fig. 5 Monthly frequency of each flow types

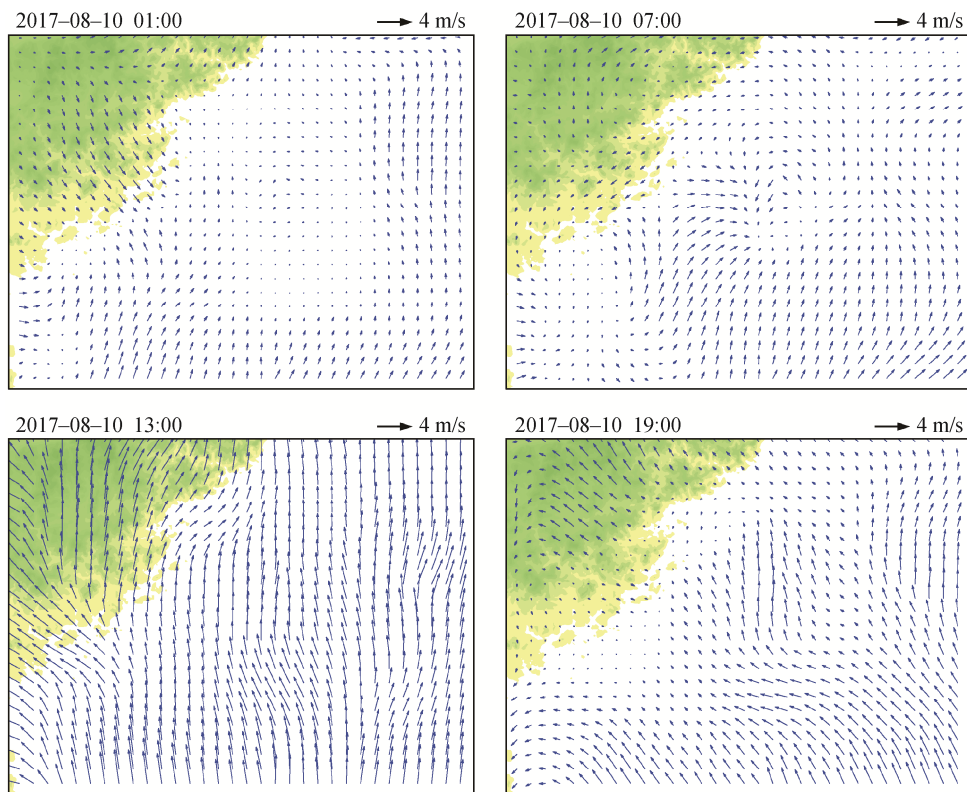


图 6 局地环流型风场日变化个例  
Fig. 6 Diurnal variation of wind field under local circulation

日整天风速较小,受弱的偏南背景气流影响,模式区域东部的平原地区基本上维持偏南风,山地与平原的交界地带则呈现典型的山地-平原风效应。凌晨 01:00,在从山地指向平原的偏西北风与偏南背景风相交汇的曲阳和易县等地区,风速极小,甚至出现局地辐合中心,区域中心的保定-雄安一带也出现大面积小风区。早晨 07:00,在夜间山风逐渐向白天平原风转化的时段,山地下坡风强度减弱,平原地区风速略有增强,山前平原地区维持较小的风速。午后 13:00,风场全面转变成从平原指向山地的上坡风,风速加大。我们注意到,从偏西南的曲阳到偏西北的易县,风场表现出地形绕流的现象。傍晚 19:00 后,风场再次转换,山前一带风速减小,偏东南的来流止于山前小风带,山地开始出现偏西北风向的下坡风。

由此看出,山地-平原风在研究区域的影响范围主要覆盖山地与平原交界部位跨度约为 100 km 的地带,保定市经常处于该影响范围之内。这可能是保定出现严重空气污染的气象条件之一,因为局地环流经常造成日夜往复的大气流动,同时在日夜转换时期维持较小的风速,这些都有利于污染物在本地累积。保定以东的雄安新区大致处于山地-平原环流影响范围的边缘,有可能受到山前一带累积的污染物影响。当然,由于研究区域的东部为开阔的平原,大气流动易受外界系统的影响。从现有统计结果来看,2016 和 2017 两年的 396 个局地环流日,绝大多数叠加了部分背景风的影响,只有 18 例表现为单纯的山地-平原风日夜循环特征。

弱系统影响型也是当地重要的大气流动形态,2017 年 5 月 12 日为该类流动的典型个例(图 7)。凌晨 01:00,模式区域内主要风向为东风,同时区域的西北部主要由西北部山地来的西风和西北风控制。与局地环流的情况相似,山地与平原交界处的曲阳等地也出现小风速的情况。早晨 07:00,受到外来系统的影响,区域内白天主要由较强的西南风控制,地形的影响不明显。傍晚 19:00,区域内经历从北向南的系统转换过程,风向发生反转,在地形的影响和系统的作用下,区域西北部的风向明显地从山地指向平原。在该种大气流动状态下,区域同时受到地形和外界系统的影响,或区域内处于系统的变化状态,大气流动的特性也介于系统大风与局地环流之间。研究区域东部的平原多受到外来系统的影响,西北部山区的大气流动形态往往无法由单独一

种作用主导,大多数时候是受外界系统和地形作用的共同影响。

## 2.5 输送路径与方向

为了解主要传输路径,初步判断污染物的扩散影响范围,将 2016 和 2017 两年中不同大气流动类型的轨迹按季节叠加,得到保定-雄安新区大气输送的总体状况。图 8 展示四季所有系统大风型流动的输送轨迹,可见保定-雄安新区的输送路径在夏季和秋季都是东北和西南这两个方向,春季和冬季除这两个主要方向外,还有一条东南方向的输送路径。当然,系统大风型流动在该地区出现较少,两年中春夏秋冬各季分别只有 20, 21, 12 和 6 个样本日,因此现有结果可能存在不确定性。

局地环流型大气流动的四季输送轨迹(图 9)最明显的特征是,所有轨迹大致呈西南-东北向的纺锤状分布,与地形走向一致,充分反映山地-平原环流对该类型输送的影响:各季平均而言,的确有轨迹垂直于山地-平原交界线的往复运动的情况,但在偏东北或西南的背景流动的作用下,在太行山东麓的山前,轨迹沿山地向西南-东北方向延伸。由于轨迹的计算时长是 2 天,因此轨迹的总长度受限,大部分轨迹停留在模式区域内,远处轨迹稀少。由此也可看出,在局地环流型大气流动条件下,本地污染物极易在本区域累积,不易输送出境。这种情况在秋季和冬季可能更严重,因为轨迹的分布范围相对小一些。图 9 中春夏秋冬各季的轨迹个例日数分别为 78, 89, 123 和 106, 合计 396 日。

弱系统影响型轨迹的各季分布情况示于图 10。显然,此条件下的多数轨迹输送出模式边界,说明大气扩散输送能力比局地环流型强。输送的方向仍然以东北向和西南向为主,春季偏西的输送比例增加。另外,春秋冬三季都有不少偏东南方向的输送。总体而言,弱系统影响型的轨迹更具发散性。图 10 中春夏秋冬各季的轨迹日数分别为 86, 74, 47 和 68, 合计 275 日。

## 3 结论

本文基于 2016 和 2017 两年的地面观测资料,用风场诊断和轨迹分析方法,研究保定-雄安新区的大气流动和输送扩散背景性质,结论如下。

1) 该地区大气流动形态可以划分为系统大风型、局地环流型和弱系统影响型,3 类大气流动的比例两年平均值大致为 10%, 50% 和 40%。

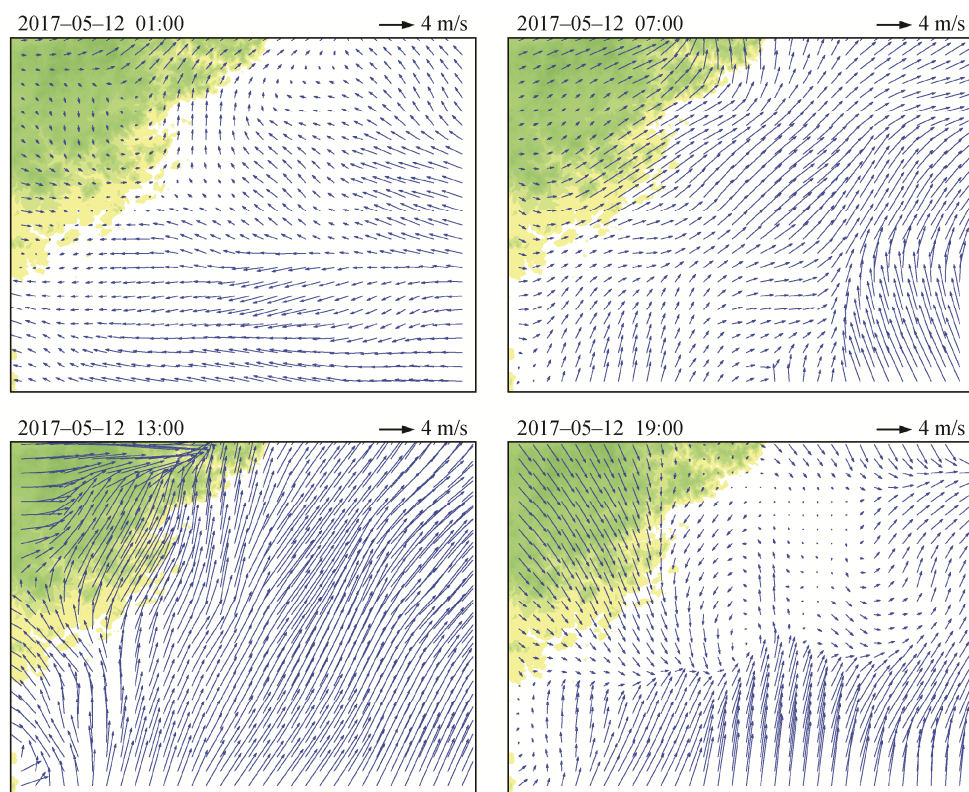


图 7 弱系统影响型风场日变化个例  
Fig. 7 Diurnal variation of wind field under weak synoptic winds

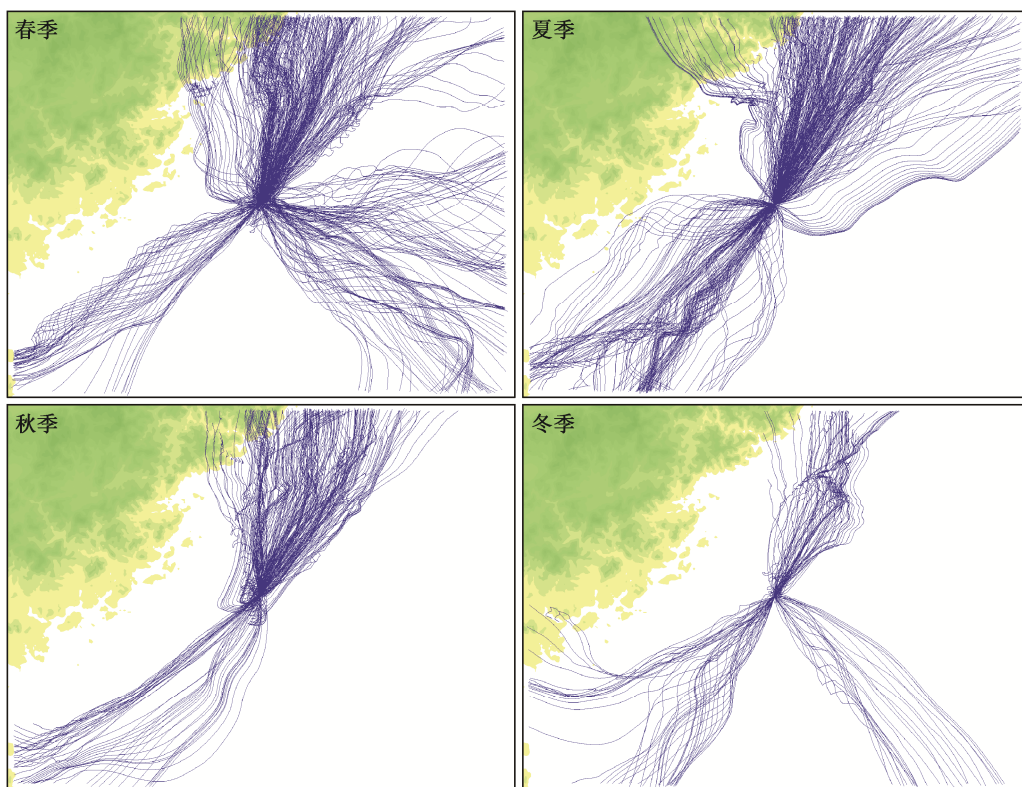


图 8 系统大风型输送轨迹的四季分布  
Fig. 8 Seasonal distribution of transport trajectories under systematic flow



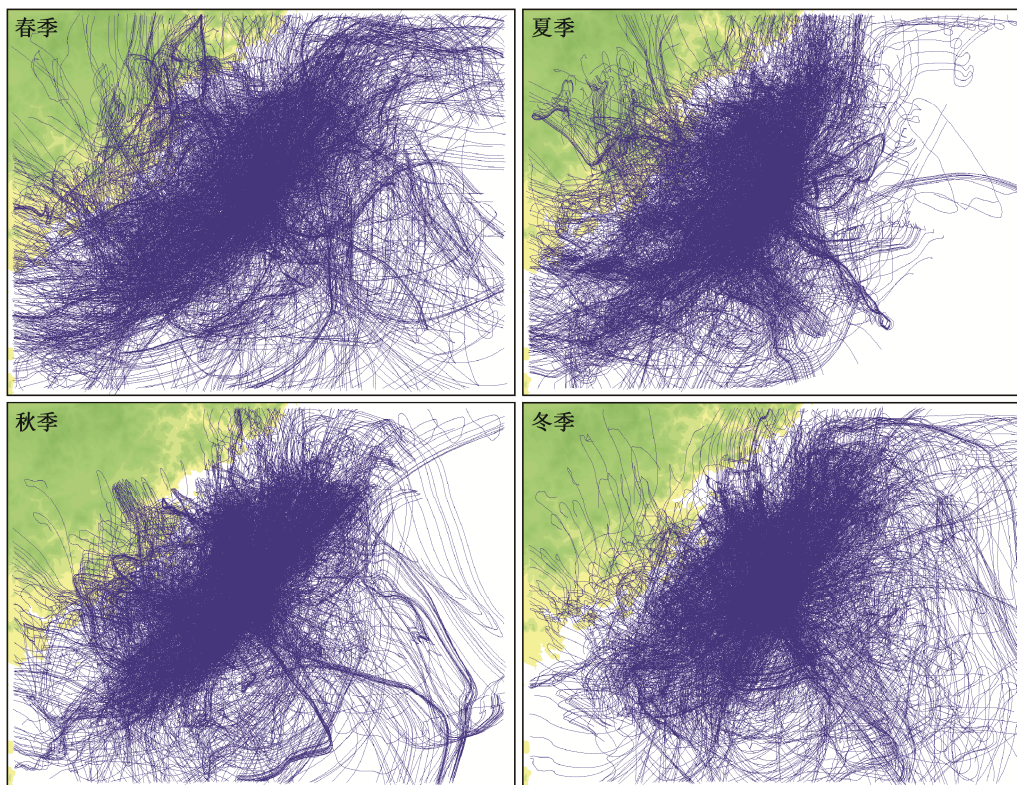


图 9 局地环流型输送轨迹的四季分布特征

Fig. 9 Seasonal distribution of transport trajectories under local circulation

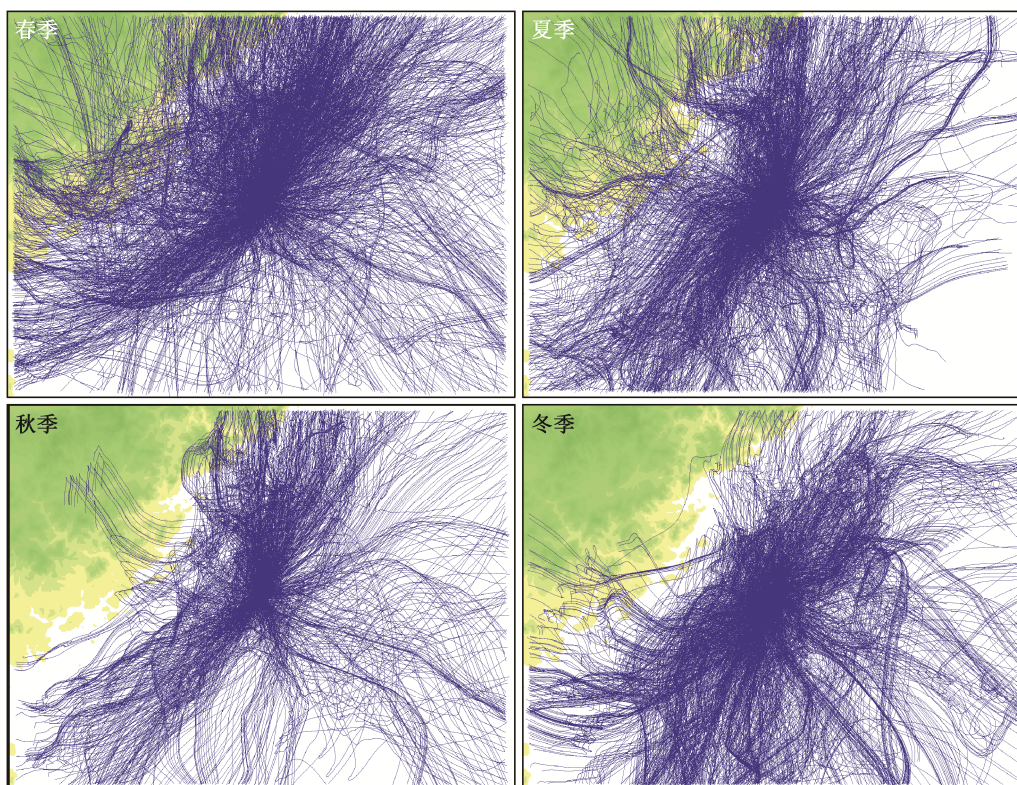


图 10 弱系统影响型输送轨迹的四季分布

Fig. 10 Seasonal distribution of transport trajectories under weak synoptic winds

2) 系统大风型流动春夏季略多, 秋冬季较少; 局地环流型流动春夏季出现频率为低值, 秋冬季较高; 弱系统影响型流动在秋冬季出现的频率较低, 全年变化较小。

3) 该地区的大气流动受西北部山地影响显著, 山地-平原风可控制山前跨度约为 100 km 的范围, 覆盖保定市, 雄安新区在其影响范围的边缘。山地-平原风一日两次的风向反转以及日夜转换时段的山前小风状况对当地的污染扩散过程有重要影响。

4) 该地区的输送轨迹以西南-东北方向为主轴, 与大尺度背景流动情况相对应, 同时在东南-西北方向横向扩展, 反映局地地形环流的影响。在系统大风和弱系统影响情况下, 冬春季出现部分直接向东南方向输送的轨迹。

### 参考文献

- [1] 吴兑, 廖碧婷, 吴蒙, 等. 环首都圈霾和雾的长期变化特征与典型个例的近地层输送条件. 环境科学学报, 2014, 34(1): 1-11
- [2] 缪育聪, 刘树华. 雄安新区大气污染的气象特征分析. 科学通报, 2017, 62(23): 2666-2673
- [3] 郑悦, 程方, 张凯, 等. 保定市大气污染特征和潜在输送源分析. 环境科学研究, 2020, 33(2): 260-270
- [4] Ji Xiangguang, Liu Cheng, Xie Zhouqing, et al. Comparison of mixing layer height inversion algorithms using lidar and a pollution case study in Baoding, China. *Journal of Environmental Sciences*, 2019, 79(5): 81-90
- [5] 刘旭艳. 京津冀PM<sub>2.5</sub>区域传输模拟研究[D]. 北京: 清华大学, 2015
- [6] 杨洋, 唐贵谦, 吉东生, 等. 夏季局地环流对京津冀区域大气污染影响. 环境工程学报, 2015, 9(5): 2359-2367
- [7] Xu W Y, Zhao C S, Ran L, et al. Characteristics of pollutants and their correlation to meteorological conditions at a suburban site in the North China Plain. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2011, 11(9): 4353-4369
- [8] 黄争超, 洪礼楠, 尹佩玲, 等. 保定市夏季臭氧污染来源及大气传输影响研究. 北京大学学报(自然科学版), 2018, 54(3): 665-672
- [9] 蔡旭晖, 邹青青, 郭梦婷, 等. 大气环境监测结果空间代表性的一个分析实例. 环境科学学报, 2018, 38(6): 2279-2286
- [10] 张小曳, 孙俊英, 王亚强, 等. 我国雾-霾成因及其治理的思考. 科学通报, 2013, 58(13): 1178-1187
- [11] Jiang L, Bai L. Spatio-temporal characteristics of urban air pollutions and their causal relationships: evidence from Beijing and its neighboring cities. *Scientific Reports*, 2018, 8(1): 1279-1290
- [12] 游春华, 蔡旭晖, 宋宇, 等. 京津地区夏季大气局地环流背景研究. 北京大学学报(自然科学版), 2006, 42(6): 779-783
- [13] Pack D H. Meteorology of air pollution: the need to preserve our air resources challenges our understanding of the atmosphere's capacities. *Science*, 1964, 146: 1119-1128
- [14] Scire J S, Robe F, Fernau M, et al. A user's guide for the CALMET meteorological model (version 5). Pennsylvania: Earth Tech Inc, 2000
- [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] 张振州, 蔡旭晖, 康凌, 等. 海南岛地区大气输送和扩散特征的数值模拟. 环境科学学报, 2014, 34(2): 281-289