

石家庄近地层风场辐合与重污染关系研究

李二杰^{1,2}, 张智¹, 祁妙¹, 赵玉广^{1,2*}

1.河北省环境气象中心, 河北 石家庄 050021

2.中国气象局邢台大气环境野外科学试验基地, 河北 邢台 054008

摘要: 石家庄多发生以风场辐合为特征的局地污染事件, 客观判识辐合区和辐合过程强弱对重污染预报指示意义重大. 为研究石家庄风场辐合特征及其对局地污染的贡献, 更好地为区域重污染天气预报预警提供客观指标参考, 在引入固定高度层内矢量通风系数物理量的基础上, 结合箱体模型提出一种定量计算近地层风场辐合强度系数的方法, 并利用 ERA-Interim 再分析资料计算了京津冀地区矢量通风系数以及辐合强度系数, 对 2016 年 9 月—2019 年 3 月期间 10 次典型风场辐合污染过程进行分析, 探讨了风场辐合形成的原因和对污染贡献的关系. 结果表明: ①受地形影响, 石家庄易出现近地层风向、风速辐合, 均可归结为区域内输入通风量大于输出通风量, 西部太行山地形的阻挡加重了其辐合程度. ②风场辐合使空气中的水汽和污染物汇聚, 为二次反应提供高湿条件, 这种正反馈作用促发 $PM_{2.5}$ 爆发性增长, 期间 $\rho(PM_{2.5})$ 平均每小时可上升 $25 \mu g/m^3$. ③石家庄近地层辐合强度系数在 26 以上时对污染贡献作用明显, 辐合区污染强度比周边偏高 1~2 个等级, $\rho(PM_{2.5})$ 比区域背景值偏高 85%~200%. 研究显示, 风场辐合对重污染贡献明显, 是形成局部污染物浓度偏高、 $PM_{2.5}$ 爆发性增长的重要气象指标.

关键词: 风场辐合; 矢量通风系数; 辐合强度系数; 重污染; $PM_{2.5}$ 爆发性增长

中图分类号: X51

文章编号: 1001-6929(2021)01-0063-08

文献标志码: A

DOI: 10.13198/j.issn.1001-6929.2020.11.23

Relationship between Near Ground Wind Convergence and Heavy Pollution in Shijiazhuang

LI Erjie^{1,2}, ZHANG Zhi¹, QI Miao¹, ZHAO Yuguang^{1,2*}

1.Hebei Provincial Environmental Meteorological Center, Shijiazhuang 050021, China

2.Xingtai Atmospheric Environment Field Scientific Test Base of CMA, Xingtai 054008, China

Abstract: Local pollution events caused by wind convergence occur frequently in Shijiazhuang. It is important to objectively identify the area and intensity of wind convergence zone for forecasting heavy pollution events. In order to study the convergence characteristics of near ground wind in Shijiazhuang its contribution to local pollution, and to provide an objective indicator reference for the prediction and early warning of regional heavy pollution, a method based on the introduction of vector ventilation coefficient in the fixed height for quantitatively calculating intensity coefficient of wind convergence was proposed using the box model. The vector ventilation and convergence intensity coefficients in the Beijing-Tianjin-Hebei Region were calculated using ERA-Interim reanalysis data, and 10 typical pollution processes occurred from September 2016 to March 2019 associated with wind convergence were analyzed. The reasons for the formation of wind convergence and its contribution to pollution were discussed. The results showed that: (1) Affected by the terrain, Shijiazhuang was prone to wind convergence, which could be attributed to the fact that the input ventilation volume in this area was greater than the output ventilation volume, and the Taihang Mountains increased this convergence. (2) The convergence of wind field accumulated water vapor and pollutants, and provided high humidity conditions for the secondary chemical reactions between pollutants. The positive feedback promoted the explosive growth of $PM_{2.5}$, and the average increase of $\rho(PM_{2.5})$ was $25 \mu g/m^3$ per hour during the process. (3) Wind convergence had an obvious contribution to the pollution when the convergence intensity coefficient was above 26 in Shijiazhuang. Under these conditions, the pollution intensity in the convergence area was 1 to 2 levels higher than that in other regions, and $\rho(PM_{2.5})$ was 85%-200% higher than the background average. The results also showed that the near ground wind

收稿日期: 2020-08-20 修订日期: 2020-10-31

作者简介: 李二杰 (1978-), 男, 安徽砀山人, 84845357@qq.com.

* 责任作者, 赵玉广 (1969-), 男, 河北石家庄人, 研究员级高级工程师, 硕士, 主要从事天气及空气质量预报研究, 564250769@qq.com

基金项目: 国家重点研发计划项目 (No.2016YFC0203302); 大气重污染成因与治理攻关项目 (No.DQGG0104)

Supported by National Key Research and Development Program of China (No.2016YFC0203302); National Research Program for Key Issues in Air Pollution Control, China (No.DQGG0104)

convergence contributed significantly to heavy pollution, and was an important meteorological indicator for the formation of high local pollution and explosive growth of $\text{PM}_{2.5}$.

Keywords: wind convergence; vector ventilation coefficient; convergence intensity coefficient; heavy pollution; explosive growth of $\text{PM}_{2.5}$

随着我国对大气污染防治的持续推进,京津冀地区空气质量整体趋势持续改善,大气污染治理效果明显.《2017年大气环境气象公报》指出,尽管大气环境呈现向好趋势,但受不利气象条件影响,持续性、区域性重污染天气仍时有发生.石家庄市是京津冀大气污染传输通道“2+26”城市之一,地处河北省中南部,地理位置 $37^{\circ}27'N \sim 38^{\circ}47'N$ 、 $113^{\circ}30'E \sim 115^{\circ}20'E$,东部平原海拔一般在 $30 \sim 100 \text{ m}$ 之间,受太行山地形的影响,近地面存在着几乎定常的风场辐合^[1],其厚度由地面伸展至高空几百米甚至近千米,易造成污染物汇聚^[2],使局地污染程度超出周边 $1 \sim 2$ 个等级,出现浓度峰值、“爆表”等.

气象条件变化是影响大气污染的主要原因^[3-4],边界层内气象要素与污染物的输送、聚集、扩散等密切相关^[5-8].已有众多学者对重污染发生的天气背景和气象条件进行了分析,例如,ZHANG等^[9]利用主成分分析法将天气形势分类,指出天气形势是北京地区污染物浓度逐日变化的主要驱动因子;风速、相对湿度、混合层高度、通风量等局地气象条件是影响污染物浓度的重要因素,均与污染物浓度呈显著相关^[10-12];AN等^[13]对2015年一次重污染过程数值模拟显示,区域传输对北京 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 的平均贡献率达39%;王丛梅等^[14]研究认为,2013年1月河北省中南部地面风小且多风向、风速辐合线,均加剧了近地层水汽和污染物的汇聚,导致大气污染严重.另外,也有学者开展了一些综合指数的研究,例如,廖碧婷等^[15]构建并利用垂直交换系数对污染物的垂直输送能力进行评估;花丛等^[16-17]结合 $\text{PM}_{2.5}$ 排放源强度构建和改进了气象传输指数,并解析了北京、天津、石家庄近地面高度上的主要污染传输通道;张恒德等^[18]统计得出10个对静稳天气指示意义较强的气象要素,并计算各要素分指数,叠加得到北京地区静稳天气指数.上述指数从垂直、水平、静稳等不同方面表征了气象条件对空气污染的影响机理,包括与低层大气和污染物扩散相关的动力、热力条件因素,但对局地环流所形成的风场辐合^[19]考虑不足,大多文献对其定性描述较多,缺乏针对性和定量化的指标研究,传统的散度量无法表征近地面多层风叠加辐合效果和地形阻挡的影响,另外,对风场辐合中心散度值接近为零时失效,具有一定局限性.

为了进一步分析气象条件对大气污染的贡献,该研究以石家庄区域为中心,在引入矢量通风系数的基础上,提出一种能够定量计算近地层风场辐合强度系数的方法,并结合典型污染过程分析石家庄风场辐合形成原因及其对污染的贡献,以期为提高气象条件指标效果和重污染预报预警提供客观参考依据.

1 数据与方法

1.1 数据来源

气象数据采用欧洲气象中心 ERA-Interim 再分析资料中的水平 U 、 V 分量风和高度场产品,空间分辨率为 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$,每天4次,分别为北京时间 02:00、08:00、14:00 和 20:00. 空气质量数据来源于河北省生态环境监测中心空气质量实时发布平台 (<http://121.28.49.85:8080>). 数据观测时段均为2016年9月—2019年3月. 所用数据还包括地理空间数据云 (<http://www.gscloud.cn>) 共享的 GDEM V2 30 m 分辨率的地形数字高程 (Digital Elevation Model) 数据.

1.2 研究方法

1.2.1 矢量通风系数

大气混合层高度^[20-21]及其中风速反映了混合层内大气对污染物的扩散稀释能力,通风系数^[22-24]为混合层高度与混合层高度内平均风速的乘积,定义:

$$V_h = h \times \bar{u} \quad (1)$$

式中: h 为混合层高度, m ; $\bar{u}$ 为混合层内平均风速, m/s ; V_h 为通风系数, m^2/s .

在通风系数的定义中,混合层高度常用实测(干绝热法、激光雷达资料反演等)、经验公式(罗氏法、国标法)和数值模式模拟方法获取^[11,25-27],是随时间和空间变化的物理量.王继康等^[28]认为,200~600 m 高度是大气污染物的主要传输带,朱芳等^[29]对石家庄一次重污染过程分析得出重污染发展和维持阶段大气边界层高度范围为 620~712 m. 为了研究近地层风场辐合与大气污染的关系,引入固定海拔高度内的矢量通风系数,结合石家庄地区平均海拔,最终选取固定海拔高度为 700 m,采用空间多层格点 U 、 V 分量风(对应 X 、 Y 轴方向)数据分别计算,并对低于海拔高度的风数据(一般为山体内部)进行扣除,从而获得固定海拔高度内格点化的矢量通风系数.

U 分量方向(X 轴为东西方向,西风为正、东风为负)

通风系数(V_u)的计算方法:

$$V_u = \int_0^H u(z) dz \quad (2)$$

V 分量方向(Y 轴为南北方向,南风为正,北风为负)

通风系数(V_v)的计算方法:

$$V_v = \int_0^H v(z) dz \quad (3)$$

式中: H 为海拔高度,取固定值 700 m; z 为海拔高度, m; $u(z)$ 为随高度变化的 U 分量风速, m/s; $v(z)$ 为随高度变化的 V 分量风速, m/s.

1.2.2 箱体模型计算辐合强度系数

如果在某一特定时间内进入指定区域的通风量多于输出的通风量,则表示该区域存在风场辐合,单位时间内进入箱体内部的通风量越多,辐合越强;反之,存在风场辐散.由于大气层内垂直 W 分量风的量级一般相对较小,该研究主要考虑水平风的辐合贡献,即水平风场辐合(简称“风场辐合”).由此,从风场辐合的物理意义出发,取单位时间为秒,对于水平区域 S 对应的气柱内,如果输入的通风系数大于输出的通风系数,那么就存在风场辐合,反之存在风场辐散,分别计算区域南、北、东、西 4 个边界上的有效输入通风系数,即可得到该区域的水平风辐合量.综上,利用矢量通风系数将不同高度、方向的风融合在一起,达到降维分析,从而将近地面多层风辐合问题转化为通风系数辐合(见图 1).

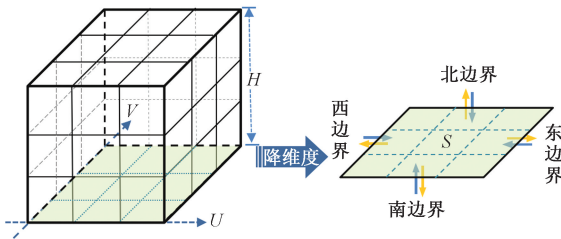


图1 箱体模型计算区域输入输出通风量示意

Fig.1 Schematic diagram of calculating input and output ventilation in box model

指定水平区域 S 和 Δt 时间(单位时间为秒)内有效输入通风量的计算方法:

$$F_S = \sum_{k=1}^4 (V_{k,in} - V_{k,out}) \times L_k \times \Delta t \quad (4)$$

式中: F_S 为有效输入通风量, m^3 ; k 取值 1~4, 分别表征南、北、东、西 4 个边界; $V_{k,in}$ 为 k 边界平均输入通风系数, m^2/s ; $V_{k,out}$ 为 k 边界平均输出通风系数, m^2/s ; L_k 为 k 边界长度, m.

为了表征风场辐合的强弱,该研究定义单位体积气柱内辐合量的大小作为辐合强度系数,因此给定水

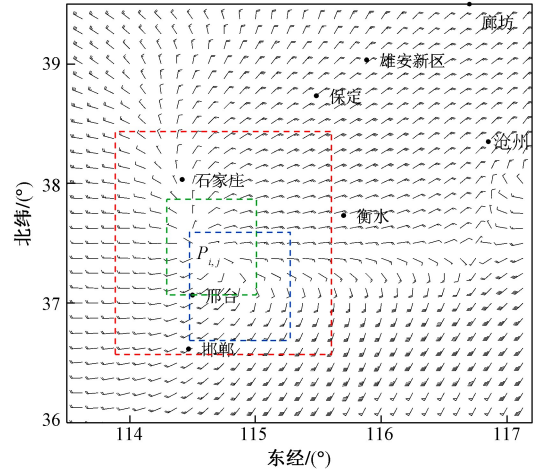
平区域 S 内辐合强度系数可表示为

$$G_s = \frac{F_s}{A \times h_{air}} \quad (5)$$

式中: G_s 为辐合强度系数; A 为水平区域面积, m^2 , 该研究中折算为 1 km^2 ; h_{air} 为实际对应气柱高度, m. G_s 值越大,表征风场辐合越强.

1.2.3 动态窗格计算最大辐合强度系数

对于一个区域或者一个格点,选取不同大小的区域范围所计算出来的辐合强度系数会大不相同,由图 2 可明显看出,矩形区域对应窗格选取太大、太小或者偏离均不能最优表征辐合区范围,关键在于寻找合适的窗格,该窗格需满足 2 个条件:①范围足够大,能够覆盖范围内所关注的辐合区;②范围又要足够小,小到仅能覆盖辐合区,最好仅能覆盖辐合区边界.



注: P_{ij} 为任意格点,绿色框表示所选窗格最优,红色框范围偏大,蓝色框范围偏离.

图2 动态窗格确定最大风场辐合区示意

Fig.2 Schematic diagram of the dynamic window to determine the maximum wind convergence region

利用辐合强度系数计算方法,对于任意格点 P_{ij} 动态调整其所在矩形窗格(半径为 r_m) 大小并计算可以得到一系列辐合强度系数 $C_{i,j,m}$, 满足上述 2 个条件的窗格必然是 $C_{i,j,m}$ 中最大的一个. 因此可以利用动态窗格扫描的方法,获取最大 $C_{i,j,m}$ 所在的区域作为计算窗格,所对应的辐合强度系数定为格点 P_{ij} 的最终辐合强度系数,由此得到任意格点 P_{ij} 的辐合强度系数(C_{ij}):

$$C_{ij} = \max C_{i,j,m} \quad (6)$$

一般近地层风场辐合场大小在 2~3 个经纬度范围,对于分辨率为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 的中尺度气象模式格点风场,设定最大扫描半径 r 为 4~6 个格距即可覆

盖最优辐合区。

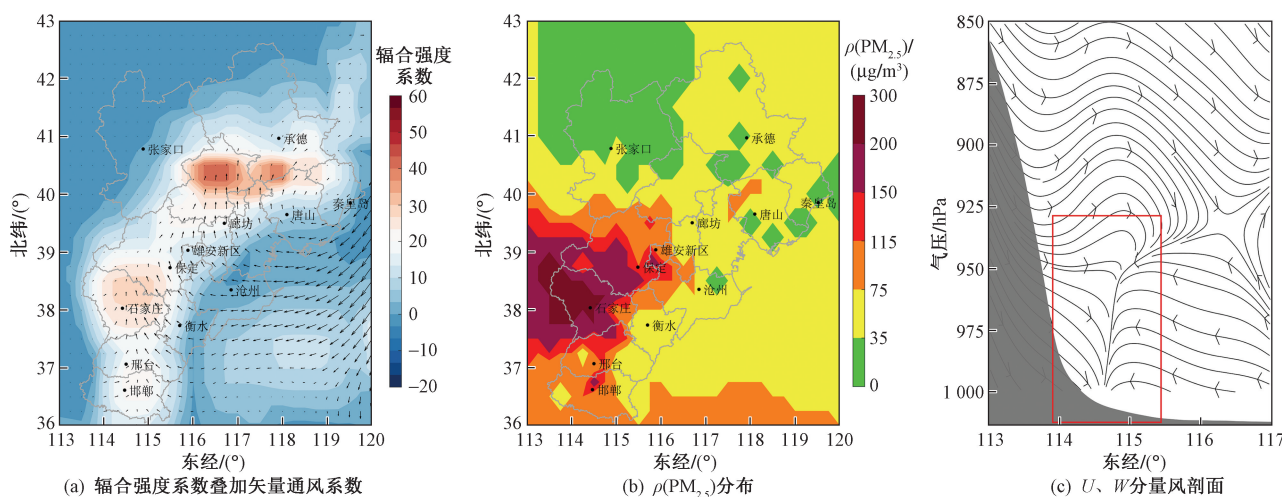
2 结果与讨论

2.1 风场辐合与污染成因

一般在暖低压型天气背景下,石家庄及其南部地区为系统性偏南风,或者在东北至偏东气流作用下,进入石家庄的风速逐渐减小,形成风速辐合^[30]。另外,受太行山地形效应的影响,石家庄夜间容易吹山风,西部山区为偏西风,与偏南风构成“人字形”辐合线^[1,31]。以2019年1月6日02:00的风场辐合污染过程为例(见图3),石家庄近地层矢量通风系数表现为东南部地区通风系数较大,且方向指向偏西至西北,受太行山地形梯度的影响,西部和北部地区通风系数逐渐减小(海拔高的地区为0),方向指向偏东至东北。从图3(c)可以看出,红色框内 U 分量风由东部边界输入,西部边界975 hPa高度以上为弱偏西风,975 hPa高度以下为山体影响,风速不计入,单位

时间内东、西边界有效输入通风量大于输出量, V 分量类似,这是形成近地层风场辐合的根本原因,对应石家庄近地面风向呈逆时针旋转,风速由外围到内部梯度逐渐减小,气流从四周流向中心,最终形成风向、风速叠加地形影响的辐合场。

另外,从图3(b)所示污染分布来看,辐合区外围的邢台、邯郸、保定部分地区空气质量以轻度至中度污染为主,为辐合提供了污染物质条件,在风场辐合作用下污染物向石家庄汇集且无法扩散,形成风场辐合性传输,局部地区出现重度至严重污染,污染强度偏高1~2个等级,而同时刻辐合较强、空气质量相对较好的北京地区没有出现重污染,表明风场辐合是局地污染形成的必要非充分条件,辐合只是提供了气象条件场,辐合造成的污染程度与区域背景污染物浓度有关,风场辐合可理解为一种“只进不出”的污染输送方式。



注:图(c)中红色框为计算输入通风系数边界。

图3 2019年1月6日02:00石家庄及周边地区风场辐合、 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 分布及 U 、 W 分量风剖面图

Fig.3 Wind convergence $\rho(\text{PM}_{2.5})$ distribution and U & W wind profiles at 02:00 on January 6th, 2019

2.2 风场辐合促进 $\text{PM}_{2.5}$ 爆发性增长

研究^[32-33]表明,气态污染物(SO_2 、 NO_x 、 NH_3 等)在高湿条件下发生化学转化,能够快速生成 $\text{PM}_{2.5}$ 中的二次组分(SO_4^{2-} 、 NO_3^- 、 NH_4^+ 等)并吸湿增长,导致 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 进一步快速升高,出现 $\text{PM}_{2.5}$ 爆发性增长,这种增长背后势必会有气象条件变化起助推作用。利用2016年11月11日20:00石家庄出现的一次典型风场辐合污染过程进行分析(见图4、5),从气象条件来看,前期(02:00—08:00)风场辐合区主要集中在保定、廊坊一带,石家庄虽然有一定的风场辐合,但主要受偏西风影响,上游污染物浓度较低, U 分量通风系数为1377~1530 m^2/s ,水平扩散能力较强,08:00污

染物浓度略有降低。14:00—18:00风速降至2 m/s以下并维持小风状态, U 、 V 分量通风系数均在500 m^2/s 以下,平均相对湿度为45%,4 h内 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 由159 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 逐渐增至211 $\mu\text{g}/\text{m}^3$,平均每小时增加13 $\mu\text{g}/\text{m}^3$,主要受通风系数小、水平扩散条件差的影响,污染物积累浓度逐渐升高^[34]。20:00前出现明显风场辐合,石家庄处于辐合区中心,辐合强度系数为59.6, V 分量通风系数由正开始转负,相对湿度快速增加并稳定至70%, $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 出现峰值(261 $\mu\text{g}/\text{m}^3$),19:00—20:00 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 增加了50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$,平均每小时增加25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$,增长速度约为之前的2倍,出现 $\text{PM}_{2.5}$ 爆发性增长。这主要是因为,低空偏西气

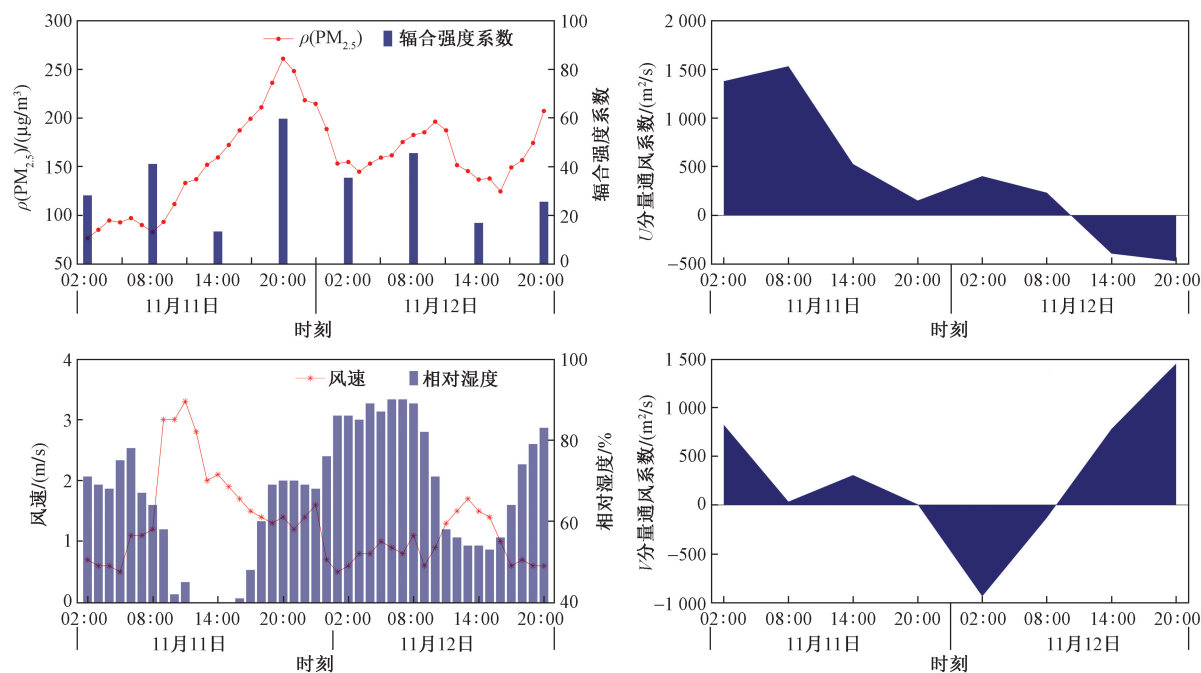


图 4 2016 年 11 月 11 日 02:00—12 日 20:00 石家庄 $\text{PM}_{2.5}$ 、辐合强度系数、风速、相对湿度及矢量通风系数变化

Fig.4 Changes in $\text{PM}_{2.5}$, convergence intensity coefficient, wind speed, relative humidity and vector ventilation coefficient at Shijiazhuang Station from 02:00 on November 11th to 20:00 on November 12th, 2016

流越过太行山后在山麓东侧下沉,与平原地区吹来的偏东风形成风向、风速辐合,加剧了近地层水汽和污染物的汇聚^[14],使相对湿度和污染物浓度迅速升高,为二次转化提供了高湿条件,这种正反馈作用无疑成为促使污染物浓度爆发性增长的动力机制,因此,辐合性传输是造成石家庄 $\text{PM}_{2.5}$ 爆发性增长和出现污染峰值的关键气象条件因素^[2,35].

2.3 风场辐合对大气污染的贡献

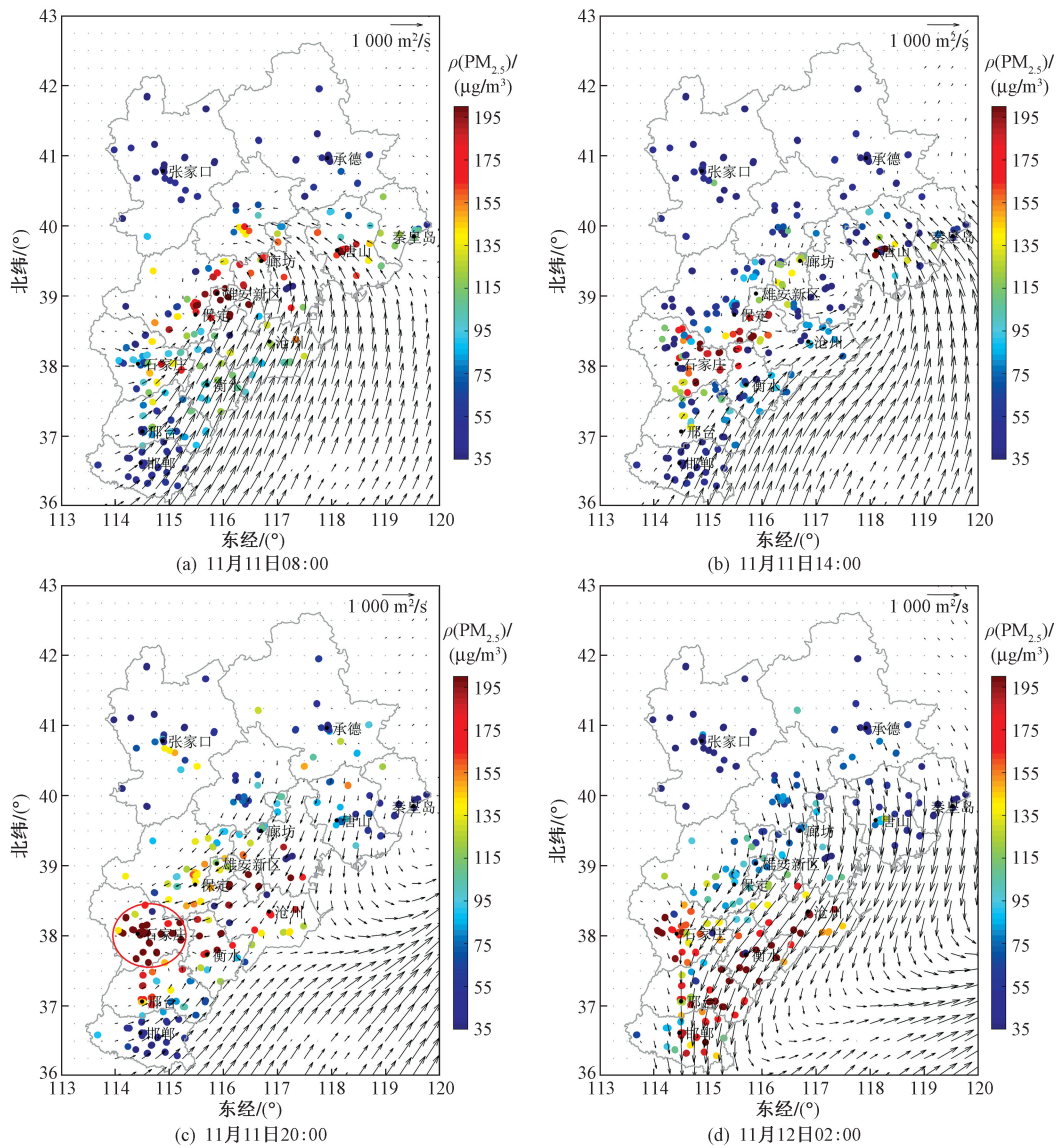
为了进一步研究风场辐合对区域 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 的贡献,根据 HJ 633—2012《环境空气质量指数(AQI)技术规定》,以 $\rho(\text{PM}_{2.5}) > 150 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (对应 $\text{AQI} > 200$) 作为重污染筛选条件,并剔除春节、沙尘过程时段数据,选取 2016 年 9 月—2019 年 3 月石家庄具典型辐合污染特征时次的样本 10 组. 以石家庄邻近的保定、廊坊、邢台、衡水、邯郸中没有明显风场辐合的站点 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 均值作为区域背景值,统计结果(见表 1)显示,发生风场辐合污染时 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 是区域背景值的 2~3 倍,利用石家庄 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 相对于区域背景值的偏高率作为风场辐合对污染浓度贡献的参考量,统计得出风场辐合对大气污染贡献在 85%~200%之间,平均值为 155%. 另外还可以看出,辐合强度系数越大、区域背景值越高,最终污染程度越强,表明在不考虑地区排放源和其他气象要素差异的情况下,风场辐合有利于污染物的局地积累,是

形成局部区域污染物浓度偏高的主要气象条件因素,受非单一因子影响,贡献参考量与辐合强度系数呈非线性关系. 由于辐合强度系数越大,风场辐合越强,可将最小值 26.1 (取整 26) 作为指标下限值阈值,不设上限,高于该值,则认为风场辐合将对污染贡献明显.

表 1 石家庄 10 次典型风场辐合污染过程统计结果

Table 1 Details of 10 typical wind convergence pollution process in Shijiazhuang

时间	$\rho(\text{PM}_{2.5}) / (\mu\text{g}/\text{m}^3)$	区域背景 $\rho(\text{PM}_{2.5}) / (\mu\text{g}/\text{m}^3)$	辐合强度系数	区域风场特征
2016-11-11 T 20:00:00	261	109	59.6	偏南、偏北风
2016-12-14 T 08:00:00	167	69	51.7	偏东北风
2016-12-17 T 08:00:00	443	199	38.0	偏南、偏北风
2017-01-15 T 02:00:00	225	76	32.4	东北转偏东风
2017-02-15 T 14:00:00	478	209	30.9	偏南风
2018-03-01 T 08:00:00	162	55	53.3	东北转偏东风
2018-11-03 T 14:00:00	199	75	26.1	偏南风
2019-01-06 T 02:00:00	232	85	26.8	偏南、偏北风
2019-01-08 T 08:00:00	259	115	50.5	东北、西北风
2019-02-24 T 20:00:00	276	148	40.4	偏东北风



注: 图(c)中红圈为石家庄处于明显辐合区。

图5 2016年11月11—12日不同时刻京津冀地区矢量通风系数(箭头)和 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 分布

Fig.5 The distribution of vector ventilation coefficient (arrow) and $\rho(\text{PM}_{2.5})$ in Beijing-Tianjin-Hebei Region at different times from November 11th to 12th, 2016

3 结论

a) 通过引入矢量通风系数物理量集成了多层风叠加效果,并结合箱体模型提出了一种定量计算近地层风场辐合强度系数的方法,能够反映地形阻挡引起的辐合量,该指标值越大,表征风场辐合作用越强,可作为基础物理量用于风场辐合过程强弱对比和污染气象条件预报。

b) 石家庄风场辐合主要为偏南风或者东北转偏东风两种类型气流叠加地形影响造成的,在近地层主要表现为风向、风速辐合,从矢量通风系数分析,均可归结为该地区东部(南部)输入通风量大于西部(北部)输出通风量。

c) 风场辐合使污染物和空气中的水汽快速局地聚集,为大气污染物二次转化提供湿度条件,是形成局部区域污染物浓度偏高和 $\text{PM}_{2.5}$ 爆发性增长的重要气象因素。但辐合污染需要一定的污染基础,当背景大气污染物浓度较低时,即使有风场辐合,也不容易出现污染物浓度比周边明显偏高的现象。

d) 石家庄近地层辐合强度系数在26以上时,风场辐合对污染贡献作用明显,辐合区内污染强度比周边地区偏高1~2个等级, $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 比区域背景值偏高85%~200%。由于精确定量区分风场辐合造成的污染贡献尚存在技术难题,该贡献参考量是利用辐合区污染物浓度与区域背景值差来确定,没有考虑地区

排放源差异和其他气象要素影响.

参考文献 (References):

- [1] 王丽荣,刘黎平,王立荣,等.太行山东麓地面辐合线特征分析[J].气象,2013,39(11):1445-1451.
WANG Lirong, LIU Liping, WANG Lirong, *et al.* Analysis of surface convergence line features in the eastern side of Taihang Mountain [J]. Meteorological Monthly, 2013, 39(11): 1445-1451.
- [2] 吴进,李琛,孙兆彬,等.北京地区两次重污染过程中PM_{2.5}浓度爆发性增长及维持的气象条件[J].干旱气象,2017,35(5):830-838.
WU Jin, LI Chen, SUN Zhaobin, *et al.* Meteorological condition of explosive increase and maintaining of PM_{2.5} concentration during two heavy pollution processes in Beijing [J]. Journal of Arid Meteorology, 2017, 35(5): 830-838.
- [3] 李令军,王占山,张大伟,等.2013—2014年北京大气重污染特征研究[J].中国环境科学,2016,36(1):27-35.
LI Lingjun, WANG Zhanshan, ZHANG Dawei, *et al.* Analysis of heavy air pollution episodes in Beijing during 2013-2014 [J]. China Environmental Science, 2016, 36(1): 27-35.
- [4] 尚可,杨晓亮,张叶,等.河北省边界层气象要素与PM_{2.5}关系的统计特征[J].环境科学研究,2016,29(3):323-333.
SHANG Ke, YANG Xiaoliang, ZHANG Ye, *et al.* Statistical analysis of the relationship between meteorological factors and PM_{2.5} in the boundary layer over Hebei Province [J]. Research of Environmental Sciences, 2016, 29(3): 323-333.
- [5] 陈云波,徐峻,何友江,等.北京市冬季典型重污染时段PM_{2.5}污染来源模式解析[J].环境科学研究,2016,29(5):627-636.
CHEN Yunbo, XU Jun, HE Youjiang, *et al.* Model analytic research of typical heavy PM_{2.5} pollution periods in winter in Beijing [J]. Research of Environmental Sciences, 2016, 29(5): 627-636.
- [6] ZHANG Renhe, LI Qiang, ZHANG Ruonan. Meteorological conditions for the persistent severe fog and haze event over eastern China in January 2013 [J]. Science China: Earth Sciences, 2013, 57(1): 26-35.
- [7] WANG Zifa, LI Jie, WANG Zhe, *et al.* Modeling study of regional severe hazes over mid-eastern China in January 2013 and its implications on pollution prevention and control [J]. Science China Earth Sciences, 2013, 57(1): 3-13.
- [8] CHEN Z H, CHENG S Y, LI J B, *et al.* Relationship between atmospheric pollution processes and synoptic pressure patterns in northern China [J]. Atmospheric Environment, 2008, 42: 6078-6087.
- [9] ZHANG J P, ZHU T, ZHANG Q H, *et al.* The impact of circulation patterns on regional transport pathways and air quality over Beijing and its surrounding [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2012, 12: 5031-5051.
- [10] HE Jianjun, YU Ye, LIU Na, *et al.* Numerical model based relationship between meteorological conditions and air quality and its implication for urban air quality management [J]. International Journal of Environment and Pollution, 2013, 53(3/4): 265-286.
- [11] 蒋伊蓉,朱蓉,朱克云,等.京津冀地区重污染天气过程的污染气象条件数值模拟研究[J].环境科学学报,2015,35(9):2681-2692.
JING Yirong, ZHU Rong, ZHU Keyun, *et al.* Numerical simulation on the air pollution potential in the severe air pollution episodes in Beijing-Tianjin-Hebei Region [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2015, 35(9): 2681-2692.
- [12] 韩军彩,陈静,铃伟妙,等.石家庄市空气颗粒物污染与气象条件的关系[J].中国环境监测,2016,32(2):31-37.
HAN Juncai, CHEN Jing, QIAN Weimiao, *et al.* The research on relationship between meteorological condition and atmospheric particles in Shijiazhuang [J]. Environmental Monitoring in China, 2016, 32(2): 31-37.
- [13] AN Xingqin, ZHU Tong, WANG Zifa, *et al.* A modeling analysis of a heavy air pollution episode occurred in Beijing [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2007, 7: 3103-3114.
- [14] 王丛梅,杨永胜,李永占,等.2013年1月河北省中南部严重污染的气象条件及成因分析[J].环境科学研究,2013,26(7):695-702.
WANG Congmei, YANG Yongsheng, LI Yongzhan, *et al.* Analysis on the meteorological condition and formation mechanism of serious pollution in south Hebei Province in January 2013 [J]. Research of Environmental Sciences, 2013, 26(7): 695-702.
- [15] 廖碧婷,吴兑,陈静,等.灰霾天气变化特征及垂直交换系数的预报应用[J].热带气象学报,2012,28(3):417-424.
LIAO Biting, WU Dui, CHEN Jing, *et al.* A study of the variation trends of haze and application of the vertical exchange coefficient [J]. Journal of Tropical Meteorology, 2012, 28(3): 417-424.
- [16] 花丛,张恒德,张碧辉.2013—2014冬半年北京重污染天气气象传输条件分析及预报指数初建[J].气象,2016,42(3):314-321.
HUA Cong, ZHANG Hengde, ZHANG Bihui. Analysis on advective transport condition for heavy air pollution processes in Beijing during the 2013-2014 winter months and design of transmission weather Index [J]. Meteorological Monthly, 2016, 42(3): 314-321.
- [17] 花丛,刘超,张恒德,等.京津冀地区冬半年污染传输特征及传输指数的改进[J].气象,2017,43(7):813-822.
HUA Cong, LIU Chao, ZHANG Hengde, *et al.* Characteristics of air pollutant transport over Beijing-Tianjin-Hebei Region during winter months and improvement of transport weather Index [J]. Meteorological Monthly, 2017, 43(7): 813-822.
- [18] 张恒德,张碧辉,吕梦瑶,等.北京地区静稳天气综合指数的初步构建及其在环境气象中的应用[J].气象,2017,43(8):998-1004.
ZHANG Hengde, ZHANG Bihui, LV Mengyao, *et al.* Development and application of stable weather index of Beijing in environmental meteorology [J]. Meteorological Monthly, 2017, 43(8): 998-1004.
- [19] 鞠诗尧,张小玲,范广州,等.北京地区一次持续重污染过程的气象成因分析[J].程度信息工程大学学报,2017,32(4):419-425.
JU Shiyao, ZHANG Xiaoling, FAN Guangzhou, *et al.* Analysis of meteorological conditions for a continuous heavy pollution process in Beijing [J]. Journal of Chengdu University of Information Technology, 2017, 32(4): 419-425.
- [20] DAWSON J P, ADAMS P J, PANDIS S N. Sensitivity of PM_{2.5} to climate in the eastern US: a modeling case study [J]. Atmospheric

- Chemistry and Physics, 2007, 7(16): 4295-4309.
- [21] KLEEMAN M J. A preliminary assessment of the sensitivity of air quality in California to global change [J]. *Climatic Change*, 2008, 87(S1): 273-292.
- [22] ASHRAFI K, SHAFIE-POUR M, KAMALAN H. Estimating temporal and seasonal variation of ventilation coefficients [J]. *International Journal of Environmental Research*, 2009, 3(4): 637-644.
- [23] PRAVEENA K, KUNHIKRISHNAN P K. Temporal variations of ventilation coefficient at a tropical Indian station using UHF wind profiler [J]. *Current Science*, 2004, 86(3): 447-451.
- [24] 李博, 王颖, 张稼轩, 等. 河谷城市通风系数研究 [J]. *环境科学研究*, 2018, 31(8): 1382-1388.
- LI Bo, WANG Ying, ZHANG Jiaxuan, *et al.* Ventilation coefficient in river valley terrain [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2018, 31(8): 1382-1388.
- [25] 廖国莲. 大气混合层厚度的计算方法及影响因子 [J]. *中山大学研究生学刊(自然科学与医学版)*, 2005, 26(4): 66-73.
- LIAO Guolian. Calculation methods and influence factors of the thickness of atmospheric mixed layer [J]. *Journal of the Graduates Sun Yat-sen University (Natural Sciences and Medicine)*, 2005, 26(4): 66-73.
- [26] LOTTERANGER C, PIRINGER M. Mixing-height time series from operational ceilometer aerosol-layer heights [J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 2016, 161(2): 265-287.
- [27] 王丽霞, 王颖, 赖锡柳, 等. WRF 模式不同边界层参数化方案模拟兰州冬季边界层高度的研究 [J]. *高原气象*, 2017, 36(1): 162-172.
- [28] 王继康, 花丛, 桂海林, 等. 2016 年 1 月我国中东部一次大气污染物传输过程分析 [J]. *气象*, 2017, 43(7): 804-812.
- WANG Jikang, HUA Cong, GUI Hailin, *et al.* Transport of PM_{2.5} of the haze pollution episod over Mid-Eastern China in January 2016 [J]. *Meteorological Monthly*, 2017, 43(7): 804-812.
- [29] 朱芳, 周颖, 程水源, 等. 石家庄市冬季一次重污染过程分析与反馈效应研究 [J]. *环境科学研究*, 2020, 33(3): 547-554.
- ZHOU Fang, ZHOU Ying, CHENG Shuiyuan, *et al.* Analysis of heavy air pollution process and aerosol feedback effect in Shijiazhuang City in winter [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2020, 33(3): 547-554.
- [30] 陈静, 铃伟妙, 韩军彩, 等. 石家庄市秋季典型天气背景下重污染特征分析 [J]. *气象与环境学报*, 2015, 31(4): 42-50.
- CHENG Jing, QIAN Weimiao, HAN Juncai, *et al.* Pollution characteristic under typical weather background in autumn over Shijiazhuang [J]. *Journal of Meteorology and Environment*, 2015, 31(4): 42-50.
- [31] 李青春, 李炬, 郑祚芳, 等. 冬季山谷风和海陆风对京津冀地区大气污染分布的影响 [J]. *环境科学*, 2019, 40(2): 513-524.
- LI Qingchun, LI Ju, ZHENG Zuofang, *et al.* Influence of mountain valley breeze and sea land breeze in winter on distribution of air pollutants in Beijing-Tianjin-Hebei Region [J]. *Environmental Science*, 2019, 40(2): 513-524.
- [32] LIU M X, SONG Y, ZHOU T, *et al.* Fine particle pH during severe haze episodes in northern China [J]. *Geophysical Research Letters*, 2017, 44(10): 5213-5221.
- [33] YE C, LIU P F, MA Z B, *et al.* High H₂O₂ concentrations observed during haze periods during the winter in Beijing: importance of H₂O₂ oxidation in sulfate formation [J]. *Environmental Science & Technology Letters*, 2018, 5(12): 757-763.
- [34] 付桂琴, 张杏敏, 尤凤春, 等. 气象条件对石家庄 PM_{2.5} 浓度的影响分析 [J]. *干旱气象*, 2016, 34(2): 349-355.
- FU Guiqin, ZHANG Xingmin, YOU Fengchun, *et al.* Effect of meteorological conditions on PM_{2.5} concentration in Shijiazhuang of Hebei [J]. *Journal of Arid Meteorology*, 2016, 34(2): 349-355.
- [35] 胡京南, 柴发合, 段菁春, 等. 京津冀及周边地区秋冬季 PM_{2.5} 爆发式增长成因与应急管控对策 [J]. *环境科学研究*, 2019, 32(10): 1704-1712.
- HU Jingnan, CHAI Fahe, DUAN Jingchun, *et al.* Explosive growth of PM_{2.5} during the autumn and winter seasons in the Jing-Jin-Ji and surrounding area and its control measures with emergency response [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2019, 32(10): 1704-1712.

(责任编辑:周巧富)