

# 京津冀雾霾消散因子及其阈值研究\*

周须文 韩世茹 井元元 高旭旭 于长文

ZHOU Xuwen HAN Shiru JING Yuanyuan GAO Xuxu YU Changwen

河北省气候中心, 石家庄, 050021

Hebei Climate Center, Shijiazhuang 050021, China

2019-02-18 收稿, 2019-06-18 改回.

周须文, 韩世茹, 井元元, 高旭旭, 于长文. 2020. 京津冀雾霾消散因子及其阈值研究. 气象学报, 78(1): 154-162

Zhou Xuwen, Han Shiru, Jing Yuanyuan, Gao Xuxu, Yu Changwen. 2020. A study on haze dissipation factors and their thresholds over Beijing-Tianjin-Hebei area. *Acta Meteorologica Sinica*, 78(1):154-162

**Abstract** Based on conventional observation data collected at weather stations over Beijing-Tianjin-Hebei area during 2006–2015 and daily reanalysis data of the NCEP/NCAR, several meteorological elements in stable atmosphere condition corresponding to haze formation and in transparent atmosphere condition corresponding to haze dissipation in the autumn and winter are statistically analyzed. The results show that precipitation in Beijing-Tianjin-Hebei area in the autumn and winter actually promotes the formation and maintenance of haze instead of washing it out. Haze dissipation over Beijing-Tianjin-Hebei area in the autumn and winter is mainly controlled by wind field factors. The atmospheric state for haze dissipation can be divided into three types. Under different atmospheric states, the contribution of each wind field factor to haze dissipation is different. The optimum threshold of wind field factor can be found by the "class difference maximum threshold segmentation method of iteration self-organizing data". According to the sensitivity of each wind field factors to haze dissipation and the correlation between the factors, the index factors of haze dissipation for the three types are found out. Using index iterative method, the atmospheric states in the autumn and winter of 2016 and 2017 are inspected. The results show that according to the haze dissipation index and its threshold value, the statically stable atmosphere and the transparent atmosphere can be well distinguished, which provides a good indication for the haze process. The interpretation and application of derf2.0 model products can provide technical support for objective prediction of haze process.

**Key words** Haze, Weather type, Dissipation factor, Threshold

**摘要** 利用2006—2015年京津冀气象站的常规观测资料和同期NCEP/NCAR再分析资料,以秋冬季影响雾霾形成与消散的静稳大气和通透大气为研究对象,统计分析了气象因子的分布状况。结果表明:京津冀秋冬季降水对雾霾起不到冲刷作用,反而促进雾霾的形成与维持;京津冀秋冬季雾霾消散主要是风场因子的贡献。雾霾消散的大气状态可分为3种类型,在不同大气状态下,各风场因子对雾霾消散的贡献不同。采用迭代自组织数据类差最大值阈值分割法找出了各风场因子的最佳阈值。根据各风场因子对雾霾消散的敏感性和因子间的相关,筛选出3类大气状态下雾霾消散因子指标。采用指标叠套法对2016、2017年秋冬季大气进行检验,表明雾霾消散指标及其阈值能较好区分静稳大气和通透大气,对雾霾过程具有较好的指示意义;通过对derf2.0模式产品释用,可为延伸期雾霾过程客观化预测提供技术支撑。

**关键词** 雾霾, 大气类型, 消散因子, 阈值

中图法分类号 P456

\* 资助课题:河北省科技计划项目(17275303D)、河北省重点研发计划项目(18273705D)。

作者简介:周须文,主要从事短期气候预测。E-mail: hbszxwgood@163.com

通信作者:韩世茹,主要从事短期气候预测。E-mail: hanshiru615@163.com

## 1 引言

近年来,中国中东部地区大范围持续雾霾天气频发,已成为较严重的灾害性天气,引起了政府和民众的广泛关注。众多学者已对雾霾天气进行了多学科多视角的深入研究。对雾霾天气长期变化趋势和气候特征的研究(丁一汇等, 2014; 宋连春等, 2013; 王珊等, 2014)表明,中国年霾日数自20世纪80年代以后呈明显的增多趋势,霾日增多明显区域主要分布在中国东部和南部经济较发达地区。比较多的研究(伍复胜等, 2011; 张小曳等, 2013)分析了各地灰霾天气污染特征并提出了治理对策。在雾霾天气有机化学过程和有机组分等方面也有一些开创性研究(傅家谟, 2008; Yu, et al, 2010)。通过对重雾霾天气过程的分析(潘鹤等, 2010; 吴兑等, 2014)、数值模拟(刘红年等, 2009)等方法研究了雾霾天气的成因,结果表明:雾霾的形成与气溶胶浓度和局地气象条件密切相关,雾霾问题主因是严重的气溶胶污染,但气象条件对其形成、分布、维持与变化具有显著影响。对大气环流状态研究(Jia, et al, 2018)表明:西伯利亚高压位置与中国北方雾霾天气有密切关系。

在雾霾的预报、预测研究方面,大多数研究着眼于雾霾数值预报模式(李曼等, 2014; 陈焕盛等, 2013; 潘锦秀等, 2016),这些模式主要应用在雾霾天气的短期预报方面;由于延伸期大气中的气溶胶粒子及其浓度具有不确定性,使延伸期雾霾模式预测成为难题,目前针对雾霾延伸期预测方法的研究较少。而要做到精准治理,解决中国发展和环境两大难题,对延伸期雾霾过程预测是不可缺少的重要环节。为了解决延伸期雾霾天气过程的客观预测问题,文中从天气学角度出发,研究雾霾生消的大气状态及关系密切的气象因子,寻找对雾霾生消敏感的气象因子指标及其阈值指标,探索雾霾延伸期预测方法,为雾霾延伸期预测提供科技支撑。

## 2 资料和方法

### 2.1 资料

雾霾观测资料来自河北省气象信息共享平台 V2.0 中的京津冀雾霾专题数据集。该数据集包含 1981—2015 年京津冀 176 个气象站观测的天气现象日资料和每天 4 个标准时次的常规观测资料。美

国国家环境预报中心(NCEP/NCAR)提供的温度、气压和风的再分析逐日资料(Kalnay, et al, 1996)。第2代动力延伸预测模式(derf2.0)资料来自中国气象业务内网,1.0°×1.0°水平分辨率17层等压面NetCDF数据格式5d滑动集合平均数据集,预报时效52d。

### 2.2 方法

单站雾霾日、消散日的确定:雾霾是对大气中各种悬浮颗粒物含量超标的笼统表述,雾霾天气是一种大气污染状态。考虑到雾和霾的观测手段和观测标准在不同时期不一致,并且在一定的观测时段内,由于大气湿度的变化,雾、霾是相互转化的。因此,文中把观测记录中的霾日和14时(北京时,下同)能见度低于10km的雾日统称为单站雾霾日。把雾霾日中20时能见度超过10km,且次日能见度仍在10km以上的日期定义为单站雾霾消散日。

区域雾霾日和消散日的确定:京津冀雾霾的发生具有明显的区域特点(图1),中南部地区(保定、衡水以南)、京津地区(北京至天津一带)的雾霾日数明显多于东部地区(沧州、唐山、秦皇岛)和北部地区(张家口、承德),同一区域雾霾的生消具有一致性,要研究雾霾生消的大气状态,针对区域比对单站的雾霾研究更具科学性和合理性。因此,把雾霾站数达到区域总站数的1/3或在10站以上时,记为一个区域雾霾日,简称雾霾日。雾霾消散站数达到区域雾霾总站数1/2以上,确定为区域雾霾消散日,简称消散日。把不符合雾霾日和消散日条件的记为非雾霾日。

虽然京津冀雾霾一年四季均可发生(图2),但秋冬季明显多于春夏季,尤其是重雾霾天气主要发生在秋冬季,表明京津冀雾霾与气候环流背景密切相关,故以河北中南部区域秋冬季的雾霾天气为研究对象,采用聚类分析、相关分析等统计方法,分析雾霾日和消散日各气象因子的分布特征,研究雾霾消散大气状态及敏感气象因子,探索延伸期雾霾过程客观预测方法。

## 3 雾霾消散因子及消散大气分类

### 3.1 雾霾消散因子分析

众所周知,雾霾消散主要有两种情况:一种是湿沉降,即通过降水冲刷大气中的污染物使雾霾消散。另一种是由静稳大气转为通透大气,即空气的

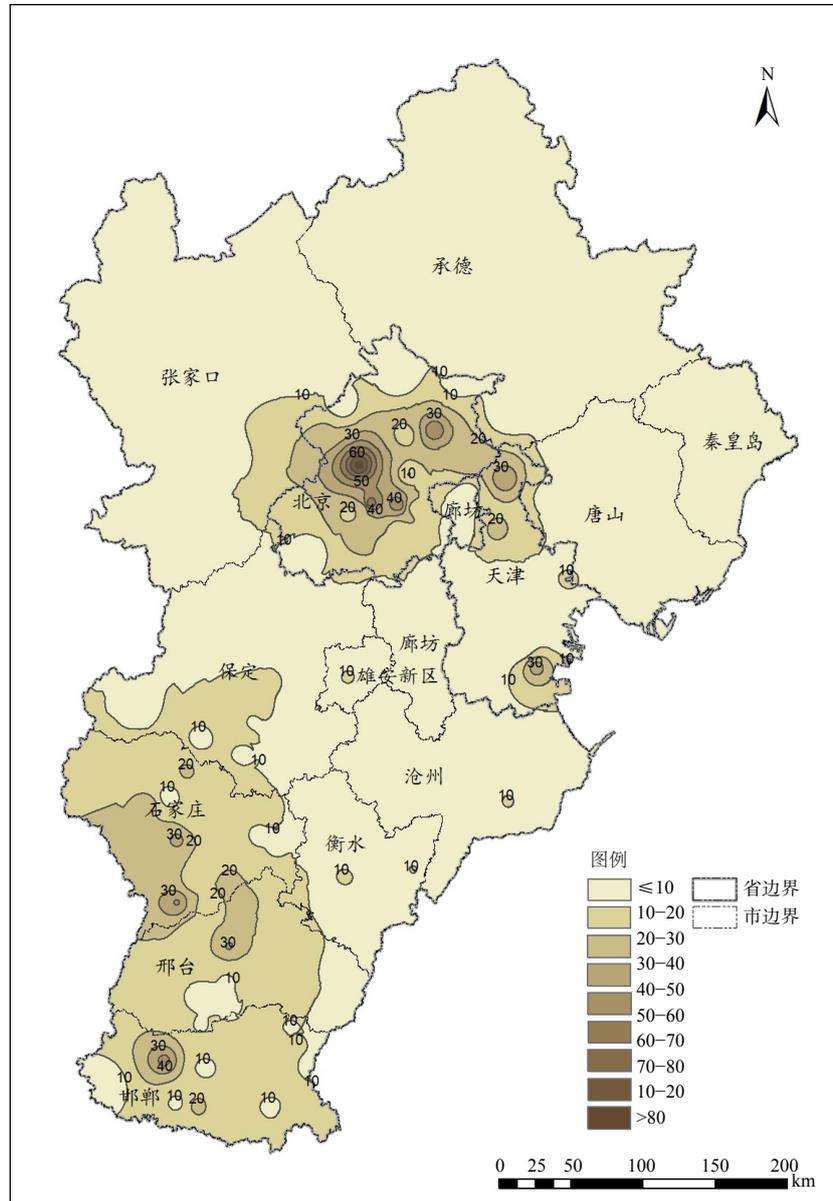


图1 1981—2010年秋冬季京津冀年均雾霾日数的空间分布

Fig. 1 Distribution of haze days in the autumn and winter over Beijing-Tianjin-Hebei area during 1981–2010

水平风速或垂直运动变大,将空气中的气溶胶颗粒吹散。

### 3.1.1 湿沉降因子分析

从2006—2015年秋季河北中南部雾霾日和消散日降水情况(图3)可以看出,河北省中南部秋冬季降水大多为小雨量级,并且各量级降水雾霾日频次均高于消散日,说明秋冬季降水起不到对大气中污染物的冲刷作用,降水不是秋冬季雾霾的消散因子。降水会增大近地面大气湿度,湿度增大有利于雾霾形成(吴萍等,2016;樊高峰等,2016),所以大多

数降水日都是雾霾日,秋冬季的降水有利于雾霾的形成、维持。

### 3.1.2 风场因子分析

对雾霾天气的大量研究成果(李江波等,2010;刘熙明等,2010;杨军等,2010;周小刚等,2004)表明雾霾天气的生消主要与对流层中下层的气流运动有关。从对流层中下层各标准等压层风场因子的统计分析(表1)可以看到,消散日各层的水平风速( $V_{500\text{hPa}}$ 、 $V_{600\text{hPa}}$ 、 $V_{700\text{hPa}}$ 、 $V_{850\text{hPa}}$ 、 $V_{925\text{hPa}}$ 、 $V_{1000\text{hPa}}$ )和垂直风速( $\omega_{500\text{hPa}}$ 、 $\omega_{600\text{hPa}}$ 、 $\omega_{700\text{hPa}}$ 、 $\omega_{850\text{hPa}}$ 、 $\omega_{925\text{hPa}}$ 、

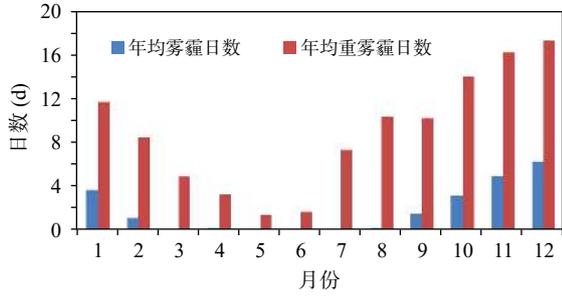


图2 1981—2010年京津冀年均雾霾和重雾霾日数月分布

Fig. 2 Monthly distribution of annual mean haze days and heavy haze days over Beijing-Tianjin-Hebei area during 1981-2010

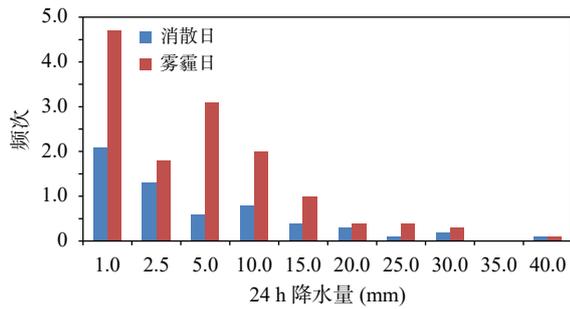


图3 河北省中南部2006—2015年秋季雾霾日和消散日的降水

Fig. 3 Precipitation in stable days and transparent days in the autumn and winter during 2006-2015

$\omega_{1000hPa}$ )的中位数都明显大于雾霾日,表明大气的水平运动或垂直运动足够强时,大气中的污染物无法滞留堆积,不易形成雾霾天气,并促使雾霾天气消

散。显然,风场因子是雾霾消散的主要因子。

从标准差和极差来看,各风场因子在消散日和雾霾日的标准差和极差都较大,表明无论是消散日还是雾霾日各风场因子的离散度都很大,风速值在一个较大区间范围,雾霾日和消散日的风速值存在较大的交叉区间。对比各风场因子的变差系数,各层水平风速变差系数相差不大,它们的离散程度相当;各层垂直风速的变差系数明显大于水平风速变差系数,表明垂直风速的离散程度更大,即在不同大气状态下,垂直运动会出现较大差异。显然雾霾消散是复杂过程,在不同的雾霾消散过程中平流输送、垂直交换、湍流输送发挥作用的大小不同,即各风场因子贡献不同,因此需要对雾霾消散大气进行分类研究。

### 3.2 雾霾消散大气分类

大气水平或垂直运动的变化是由冷(暖)气团的移动引起的。这是因为冷(暖)气团的移动过程中伴随着对流、湍流、辐射、蒸发和凝结等物理过程,这些物理过程对大气的运动产生影响。雾霾消散就是对流层中下层不同性质气团移动,使大气中的污染物稀释、扩散的结果,因此根据对流层中下层冷暖气团的变化特征对雾霾消散大气进行分类。

选取(35°—42.5°N, 110°—120°E)范围内的格点,对流层中下层6个标准等压层的24 h变温( $\Delta T_{24}$ )因子,对2006—2009年秋季47个雾霾消散大气进行聚类分析。聚类分析采用系统聚类法中

表1 各因子雾霾日、消散日分布情况统计

Table 1 Statistics of factors distributions on stable days and transparent days

	中位数		标准差		极差		变差系数	
	雾霾日	消散日	雾霾日	消散日	雾霾日	消散日	雾霾日	消散日
$V_{500hPa}$	18.1	26.2	7.45	7.68	44.0	36.4	0.40	0.29
$V_{600hPa}$	12.8	19.0	5.73	6.15	33.5	27.6	0.43	0.31
$V_{700hPa}$	8.9	14.3	4.34	4.88	23.7	22.9	0.46	0.34
$V_{850hPa}$	5.4	9.7	2.7	3.2	15.1	18.3	0.47	0.33
$V_{925hPa}$	4.3	7.7	2.2	2.6	12.6	14.0	0.50	0.33
$V_{1000hPa}$	3.2	5.8	1.6	1.9	9.6	10.7	0.50	0.33
$\omega_{500hPa}$	0.05	0.14	0.10	0.12	0.70	0.74	2.08	0.89
$\omega_{600hPa}$	0.05	0.16	0.09	0.11	0.64	0.68	1.81	0.77
$\omega_{700hPa}$	0.05	0.16	0.08	0.11	0.58	0.58	1.65	0.71
$\omega_{850hPa}$	0.04	0.16	0.07	0.10	0.59	0.48	1.63	0.67
$\omega_{925hPa}$	0.03	0.15	0.07	0.08	0.47	0.43	1.88	0.58
$\omega_{1000hPa}$	0.04	0.14	0.06	0.07	0.36	0.39	1.53	0.50

的类平均法,相似性度量指标采用变量间相关距离系数。按相关距离系数 $<0.5$ 来划分,47个雾霾消散大气大致可分为3类(图略)。分别对各类雾霾消散大气的 $\Delta T_{24}$ 合成分析,可以看出各类雾霾消散大气的 $\Delta T_{24}$ 的垂直分布(图4)具有明显特征:Ⅰ类对流层中下层均为明显的负变温,表明有较强的冷空气入侵,称为冷空气型;Ⅱ类对流层中下层均为正变温,表明有较强的暖气团移入,称为暖空气型;Ⅲ类在700—850 hPa高度上为正变温,其他高度为负变温,该类在各高度上变温值都相对较小,说明该类的每个雾霾消散过程在不同高度上移动的气团性质不同,因此称作混合型。

众所周知,地面24 h变压( $\Delta p_{24}$ )与对流层的冷暖平流密切相关。统计各类型消散大气 $\Delta p_{24}$ 出现频次(图5),可以看到对应不同的 $\Delta p_{24}$ 值,各类型消散大气的频次有明显差异,因此可以根据 $\Delta p_{24}$ 各类消散大气出现频次多少来划分消散大气类型,划分结果: $\Delta p_{24} \leq -3.7$  hPa,为暖空气型; $-3.7$  hPa  $< \Delta p_{24} \leq 0.6$  hPa,为混合型; $\Delta p_{24} > 0.6$  hPa,为冷空气型。

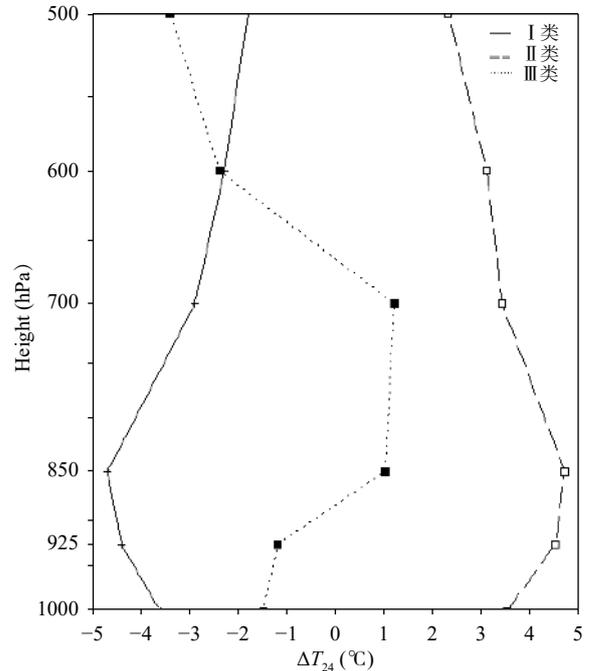


图4 三类消散大气 $\Delta T_{24}$ 垂直分布

Fig. 4 Vertical distribution of 24 h temperature variation for the three types on transparent days

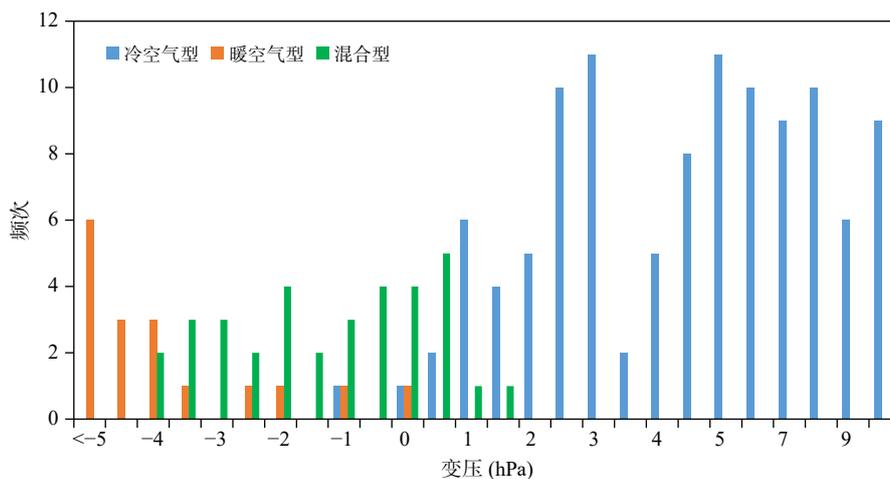


图5  $\Delta p_{24}$ 各类型消散大气出现频次

Fig. 5 Frequency distribution of 24 h pressure variation for various weather types on transparent days

## 4 指标因子及其阈值的选取

### 4.1 因子阈值的选取方法

阈值分割原理:设定因子某一阈值,阈值将因子样本分割为两部分,一部分对应的雾霾日尽可能的多,消散日尽可能的少;另一部分对应的消散日尽可能的多,雾霾日尽可能的少。

采用基于迭代自组织数据的表征量最大值阈值分割法来确定因子阈值。根据风场因子的正态分布特征,设定了类差和分割正确率2个表征量,用于表征对因子的分割效果。具体方法为:设研究的雾霾过程中,雾霾日和消散日的总样本分别为 $A$ 和 $B$ ,因子的每一个可能取值 $x_i (i=1, 2, \dots, n)$ 对应发生的雾霾日和消散日日数分别为 $A_1(x_i)$ 和 $B_1(x_i)$ 。设定表

征量：

(1) 类差

$$F(X_k) = \left( \frac{1}{A} \sum_{i=1}^k A_1(X_i) - \frac{1}{B} \sum_{i=1}^k B_1(X_i) \right) \times 100\% \quad (1)$$

$$i = 1, 2, \dots, k, \quad k < n$$

即雾霾日和消散日的累积概率分布函数差。

(2) 分割正确率

$$P(X_k) = \frac{\sum_{i=1}^k A_1(X_i) + B - \sum_{i=1}^k B_1(X_i)}{A + B} \times 100\% \quad (2)$$

$$i = 1, 2, \dots, k, \quad k < n$$

即分割正确的雾霾日与消散日之和占总样本的百分比。

计算 3 类大气状态下各风场因子的表征量, 发现其分布形态基本一致。从冷空气型 1000 hPa 水平风速表征量分布(图 6)可以看出: 类差呈近似正态分布, 当类差值最大时, 分割的雾霾日多而消散日少, 符合阈值分割原理; 分割正确率的分布近似“厂”型, 这是由于因子值在雾霾日和消散日的离散度都较大, 样本中雾霾日明显多于消散日, 显然分割正确率最大值无法满足阈值分割原理。经过去倍数化处理, 计算的去倍数分割正确率与类差的变化趋势和分布形态基本一致, 表明类差较好地表现各风场值的分割效果, 类差最大值对应的风速值即为阈值。

#### 4.2 雾霾消散指标因子的选取

对于不同的风场因子, 因子阈值所对应的分割

正确率越高, 表明因子阈值分割效果越好, 因子的敏感性也就越高, 对雾霾消散贡献越大。选取雾霾消散指标因子, 首先考虑因子对雾霾消散的敏感性。从各风场因子阈值所对应的分割正确率(图 7)可以看到: 不同类型的雾霾消散大气, 各风场因子阈值分割正确率具有明显差异, 即各风场因子对雾霾消散的敏感性不同, 作用也不同。冷空气型主要表现为对流层下层(850 hPa 以下)的水平输送和垂直运动对雾霾消散的贡献较大; 暖空气型主要是对流层中层的水平输送和垂直运动以及近地面大气的垂直运动作用较大; 混合型雾霾消散大气对流层中下层各风场因子的作用都较大, 相对而言, 垂直风速的贡献更大一些。

雾霾消散是多个风场因子共同作用的结果, 由消散日各风场因子的相关性分析(表 2)看到, 这些因子间既存在相关性又存在相对的独立性。除了 700 hPa 与 850 hPa 的水平风速相关系数只有 0.75 外, 其他各相邻层的水平风速和垂直风速的相关系数均在 0.9 以上;  $V_{500\text{hPa}}$ 、 $V_{600\text{hPa}}$ 、 $V_{700\text{hPa}}$  具有较高的相关性, 表明对流层中层的大气水平运动具有较高一致性;  $V_{850\text{hPa}}$ 、 $V_{925\text{hPa}}$ 、 $V_{1000\text{hPa}}$  具有较强的相关, 说明对流层底层的大气水平运动具有较高的一致性; 垂直运动相邻 3 层都具有较强相关。因此, 选取雾霾消散指标因子除考虑因子敏感性外, 还要考虑因子间的相对独立性。根据各因子对雾霾消散的敏感性和因子间的关联程度, 筛选出 3 类大气的雾霾消

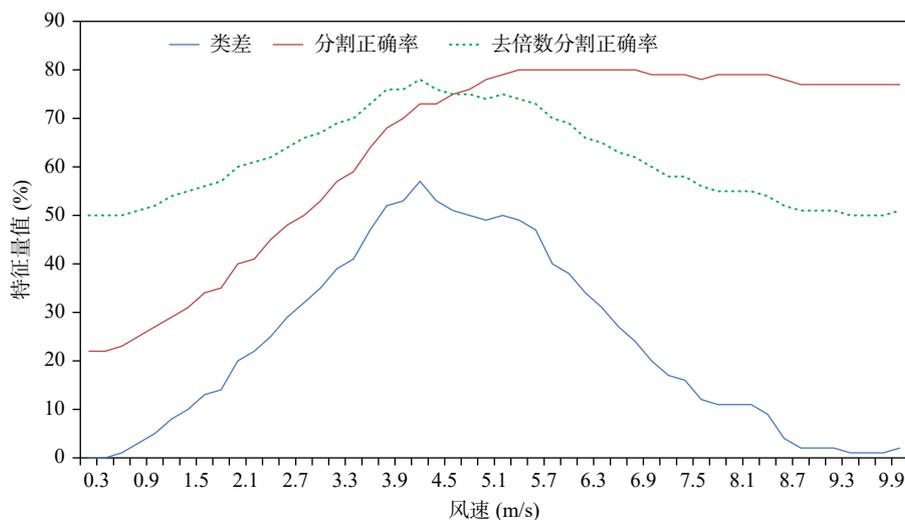


图 6 1000 hPa 水平风速对应的表征量值

Fig. 6 Representative values of 1000 hPa wind speed

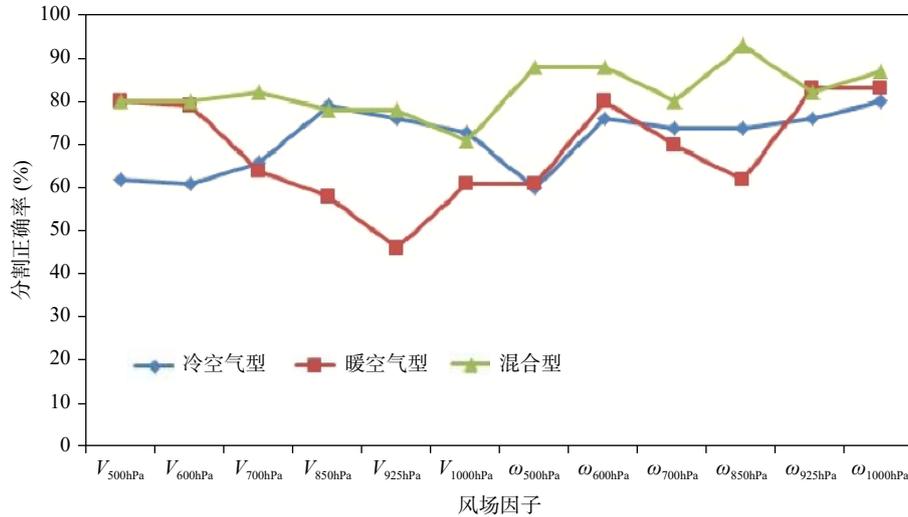


图 7 因子阈值分割正确率

Fig. 7 The Accuracy of factor threshold segmentation

表 2 消散日各风速因子间的相关系数

Table 2 Correlation coefficients between wind speed factors during transparent days

	$V_{600hPa}$	$V_{700hPa}$	$V_{850hPa}$	$V_{925hPa}$	$V_{1000hPa}$	$\omega_{500hPa}$	$\omega_{600hPa}$	$\omega_{700hPa}$	$\omega_{850hPa}$	$\omega_{925hPa}$	$\omega_{1000hPa}$
$V_{500hPa}$	0.93	0.78	0.47	0.30	0.24	0.29	0.38	0.45	0.40	0.40	0.42
$V_{600hPa}$		0.93	0.59	0.38	0.27	0.40	0.48	0.55	0.50	0.47	0.44
$V_{700hPa}$			0.75	0.50	0.37	0.53	0.59	0.66	0.64	0.58	0.51
$V_{850hPa}$				0.90	0.79	0.46	0.54	0.63	0.76	0.75	0.69
$V_{925hPa}$					0.95	0.30	0.38	0.47	0.62	0.66	0.64
$V_{1000hPa}$						0.26	0.33	0.40	0.55	0.63	0.65
$\omega_{500hPa}$							0.96	0.83	0.64	0.57	0.49
$\omega_{600hPa}$								0.95	0.78	0.70	0.61
$\omega_{700hPa}$									0.91	0.83	0.71
$\omega_{850hPa}$										0.96	0.84
$\omega_{925hPa}$											0.94

散指标因子,冷空气型为:  $V_{850hPa}$ 、 $\omega_{600hPa}$ 、 $\omega_{1000hPa}$ ,暖空气型为:  $V_{500hPa}$ 、 $\omega_{600hPa}$ 、 $\omega_{1000hPa}$ ,混合型为:  $V_{700hPa}$ 、 $\omega_{500hPa}$ 、 $\omega_{850hPa}$ 。

### 5 雾霾消散指标的检验和应用

根据各类雾霾消散大气的指标因子及其阈值,采用指标叠套法对大气通透状况做出判断,在选取的3个指标因子中,任意一个因子值不小于其阈值时,认为大气通透状况好,确定为消散日;当3个指标因子值均小于其阈值时,认为大气通透状况较差,确定为静稳日。

评估规则是:当指标确定的消散日对应实况为消散日和非雾霾日时,认为指标正确( $N_A$ );对应实况

是雾霾日时,为空报( $N_B$ );当指标确定的静稳日对应实况为雾霾日时为正确( $N_D$ );对应实况是消散日和非雾霾日时为漏报( $N_C$ )。正确率( $P_C$ )计算公式如下

$$P_C = \frac{N_A + N_D}{N_A + N_B + N_C + N_D} \times 100\% \quad (3)$$

采用NCEP实况资料对2016和2017年秋冬季逐日判别结果进行检验。由表3可以看到,2016年正确率为86%,2017年正确率为75%,表明大多数的雾霾日和消散日的判别是正确的。雾霾消散指标能较好地地区分静稳大气和通透大气,对雾霾过程的消散具有较好的指示意义。

为了在雾霾过程预测业务中应用,选取每月1、11、21日的derf2.0模式产品对2016和2017年秋

表3 2016、2017年秋冬季雾霾消散指标评估结果  
Table 3 Forecast quality of haze dissipation in the autumn and winter during 2016 and 2017

时间	NCEP资料检验 正确率(%)	derf2.0模式产品预测正确率(%)		
		1—10 d	11—20 d	21—30 d
2016年	86	69	61	33
2017年	75	59	48	21

冬季逐日大气状况进行预测。对预报时效为1—10 d、10—20 d、20—30 d的预测结果进行评估,由表3看到:1—10 d的预测效果最好,2016、2017年的正确率分别为69%和59%;11—20 d的预测效果次之,2016年为61%,2017年为48%。21—30 d预测效果较差。各预报时段2016年秋冬季的预测正确率均高于2017年,并且与NCEP资料的评估结果一致。说明derf2.0模式产品具有一定的预报能力,对1—20 d的雾霾过程预测具有一定的参考价值。

2017年正确率明显低于2016年,是由于政府加大治霾力度,消散日之后的静稳日中,非雾霾日数增多。这说明虽然雾霾消散指标能较好区分静稳大气和通透大气,但静稳大气只是雾霾形成的必要条件,在做雾霾过程预测时还需要考虑局地的相对湿度、污染物排放等因素。

derf2.0模式产品对雾霾过程延伸期预报提供了技术支持,但今后还需要进行详细的检验分析,研究模式产品的释用方法,进而提高延伸期雾霾过程客观化预测水平。

## 6 结论

(1)京津冀秋冬季降水对雾霾起不到冲刷作用,反而有利于雾霾的形成、维持;京津冀秋冬季雾霾消散主要是风场因子的贡献,对流层中下层各层的水平和垂直风速都与雾霾消散有关。

(2)表征量类差的大小能直观反映对因子的分割效果,符合阈值分割原理;基于迭代自组织数据的类差最大值阈值分割方法,是选取风场因子阈值的直观简便方法。

(3)京津冀雾霾消散有3种大气类型,分别是冷空气型、暖空气型和混合型。在不同类型下,各风场因子对雾霾消散的贡献不同。

(4)雾霾消散指标因子及其阈值能较好地地区分静稳大气和通透大气,对雾霾过程消散有较好的指示意义。

(5)采用雾霾消散因子及其指标,通过对derf2.0模式产品释用,可实现雾霾过程潜势客观化预测。由于derf2.0模式产品与NCEP实况资料存在一定差异,需要对derf2.0模式产品进行检验订正。另外,静稳日不一定是雾霾日,在做雾霾过程预测时,还需要仔细分析。

## 参考文献

- 陈焕盛,王自发,吴其重等. 2013. 空气质量多模式系统在广州应用及对PM10预报效果评估. *气候与环境研究*, 18(4): 427-435. Chen H S, Wang Z F, Wu Q Z, et al. 2013. Application of air quality multi-model forecast system in Guangzhou: Model description and evaluation of PM10 forecast performance. *Climatic Environ Res*, 18(4): 427-435 (in Chinese)
- 丁一汇,柳艳菊. 2014. 近50年我国雾和霾的长期变化特征及其与大气湿度的关系. *中国科学:地球科学*, 44(1): 37-48. Ding Y H, Liu Y J. 2014. Analysis of long-term variations of fog and haze in China in recent 50 years and their relations with atmospheric humidity. *Sci China Earth Sci*, 57(1): 36-46
- 樊高峰,马浩,张小伟等. 2016. 相对湿度和PM<sub>2.5</sub>浓度对大气能见度的影响研究:基于小时资料的多站对比分析. *气象学报*, 74(6): 959-973. Fan G F, Ma H, Zhang X W, et al. 2016. Impacts of relative humidity and PM<sub>2.5</sub> concentration on atmospheric visibility: A comparative study of hourly observations of multiple stations. *Acta Meteor Sinica*, 74(6): 959-973 (in Chinese)
- 傅家谟. 2008. 傅家谟:二次气溶胶对灰霾贡献大. *环境*, (7): 28-29. Fu J M. 2008. Large contribution of secondary aerosol on haze. *Environment*, (7): 28-29 (in Chinese)
- 李江波,赵玉广,孔凡超等. 2010. 华北平原连续性大雾的特征分析. *中国海洋大学学报*, 40(7): 15-23. Li J B, Zhao Y G, Kong F C, et al. 2010. Characteristics of sustained heavy fog in North China plain. *Period Ocean Univ China*, 40(7): 15-23 (in Chinese)
- 李曼,张载勇,李淑娟等. 2014. CUACE系统在乌鲁木齐空气质量预报中的效果检验. *沙漠与绿洲气象*, 8(5): 63-68. Li M, Zhang Z Y, Li S J, et al. 2014. Verification of CUACE air quality forecast in Urumqi. *Des Oasis Meteor*, 8(5): 63-68 (in Chinese)
- 刘红年,胡荣章,张美根. 2009. 城市灰霾数值预报模式的建立与应用. *环境科学研究*, 22(6): 631-636. Liu H N, Hu R Z, Zhang M G. 2009. Development and application of urban haze numerical forecast model. *Res Environ Sci*, 22(6): 631-636 (in Chinese)
- 刘熙明,胡非,邹海波等. 2010. 北京地区一次典型大雾天气过程的边界层特征分析. *高原气象*, 29(5): 1174-1182. Liu X M, Hu F, Zou H B, et al. 2010. Analysis on characteristic of atmospheric boundary layer during a typical heavy fog process in Beijing Area. *Plateau Meteor*, 29(5): 1174-1182 (in Chinese)
- 潘鹄,耿福海,陈勇航等. 2010. 利用微脉冲激光雷达分析上海地区一次灰

- 霾过程. 环境科学学报, 30(11): 2164-2173. Pan H, Geng F H, Chen Y H, et al. 2010. Analysis of a haze event by micro-pulse light laser detection and ranging measurements in Shanghai. *Acta Sci Circumstant*, 30(11): 2164-2173 (in Chinese)
- 潘锦秀, 朱彬, 晏平仲等. 2016. 京津冀区域重污染天气过程数值预报评估新方法. 环境科学学报, 36(8): 2752-2760. Pan J X, Zhu B, Yan P Z, et al. 2016. An evaluation method for the operational NAQPMS numerical forecast of heavy pollution in Beijing-Tianjin-Hebei area. *Acta Sci Circumstant*, 36(8): 2752-2760 (in Chinese)
- 宋连春, 高荣, 李莹等. 2013. 1961—2012年中国冬半年霾日数的变化特征及气候成因分析. *气候变化研究进展*, 9(5): 313-318. Song L C, Gao R, Li Y, et al. 2013. Analysis of China's haze days in winter half year and climatic background during 1961-2012. *Adv Climate Change Res*, 9(5): 313-318 (in Chinese)
- 王珊, 修天阳, 孙扬等. 2014. 1960—2012年西安地区雾霾日数与气象因素变化规律分析. 环境科学学报, 34(1): 19-26. Wang S, Xiu T Y, Sun Y, et al. 2014. The changes of mist and haze days and meteorological element during 1960-2012 in Xi'an. *Acta Sci Circumstant*, 34(1): 19-26 (in Chinese)
- 吴兑, 廖碧婷, 吴蒙等. 2014. 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, 34(1): 1-11. Wu D, Liao B T, Wu M, et al. 2014. The long-term trend of haze and fog days and the surface layer transport conditions under haze weather in North China. *Acta Sci Circumstant*, 34(1): 1-11 (in Chinese)
- 伍复胜, 管东生. 2011. 珠江三角洲灰霾污染物特征分析及对策. *环境科学与技术*, 34(4): 115-119. Wu F S, Guan D S. 2011. Pollutants analysis of haze and environmental management in Pearl River Delta. *Environ Sci Technol*, 34(4): 115-119 (in Chinese)
- 吴萍, 丁一汇, 柳艳菊等. 2016. 中国中东部冬季霾日的形成与东亚冬季风和大气湿度的关系. 气象学报, 74(3): 352-366. Wu P, Ding Y H, Liu Y J, et al. 2016. Influence of the East Asian winter monsoon and atmospheric humidity on the wintertime haze frequency over central-eastern China. *Acta Meteor Sinica*, 74(3): 352-366 (in Chinese)
- 杨军, 王蕾, 刘端阳等. 2010. 一次深厚浓雾过程的边界层特征和生消物理机制. 气象学报, 68(6): 998-1006. Yang J, Wang L, Liu D Y, et al. 2010. The boundary layer structure and the evolution mechanisms of a deep dense fog event. *Acta Meteor Sinica*, 68(6): 998-1006 (in Chinese)
- 张小曳, 孙俊英, 王亚强等. 2013. 我国雾-霾成因及其治理的思考. 科学通报, 58(13): 1178-1187. Zhang X Y, Sun J Y, Wang Y Q, et al. 2013. Factors contributing to haze and fog in China. *Chinese Sci Bull*, 58(13): 1178-1187 (in Chinese)
- 周小刚, 王强, 邓北胜等. 2004. 北京市一次大雾过程边界层结构的模拟研究. 气象学报, 62(4): 468-475. Zhou X G, Wang Q, Deng B S, et al. 2004. Numerical simulation on the boundary layer structure during a heavy fog process over Beijing metropolitan area. *Acta Meteor Sinica*, 62(4): 468-475 (in Chinese)
- Jia B X, Wang Y X, Huang S, et al. 2018. Variations of Siberian High position under climate change: Impacts on winter pollution over north China. *Atmos Environ*, 189: 227-234
- Kalnay E, Kanamitsu M, Kistler R, et al. 1996. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. *Bull Amer Meteor Soc*, 77(3): 437-472
- Yu H, Wu D, Wu D, et al. 2010. Size distributions of elemental carbon and its contribution to light extinction in urban and rural locations in the Pearl River Delta region, China. *Atmos Chem Phys*, 10(11): 5107-5119