

周须文,高旭旭,于长文,等,2022. 基于 Bayes 判别分析的大气污染潜势定量预报[J]. 气象,48(8):1032-1042. Zhou X W, Gao X X, Yu C W, et al, 2022. Prediction method of air pollution potential based on bayes discriminant analysis[J]. Meteor Mon, 48(8):1032-1042(in Chinese).

## 基于 Bayes 判别分析的大气污染潜势定量预报<sup>\*</sup>

周须文 高旭旭 于长文 韩世茹 许启慧

河北省气候中心,河北省气象与生态环境重点实验室,石家庄 050021

**提 要:** 依据大气污染物质量守恒方程,构建大气污染气象因子,并以空气质量指数日增量为对象,对大气污染潜势进行了定量化分级划分。采用 Q 型聚类分析方法,把秋、冬季大气环流背景分为冷空气型、混合型、暖空气型三种环流类型,并研究了区分三种大气环流类型的指标因子及其阈值。采用 Bayes 判别分析方法,分别建立了冷空气型、混合型和暖空气型大气环流背景的污染潜势五分级预测模型。对邢台 2017—2019 年秋、冬季资料建立的预测模型,各年判别正确率分别为 80.0%、71.0%、74.7%,综合正确率为 75.2%。采用 2015—2017 年秋、冬季资料对该模型进行检验,综合正确率为 63.6%。对 2019—2021 年秋、冬季大气自净能力指数和污染潜势五分级预测结果与空气质量指数(AQI)日增量实况进行对比分析,污染潜势五分级预测结果与 AQI 日增量的变化趋势有较高的一致性,相关系数在 0.67 以上,明显好于大气自净能力指数计算结果;污染潜势五分级预测对极利于扩散等级和极不利于扩散等级判别正确次数明显高于大气自净能力指数。

**关键词:** 大气分类,污染潜势,预测模型,数据挖掘技术

**中图分类号:** P456

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.7519/j.issn.1000-0526.2022.040203

## Prediction Method of Air Pollution Potential Based on Bayes Discriminant Analysis

ZHOU Xuwen GAO Xuxu YU Changwen HAN Shiru XU Qihui

Key Laboratory of Meteorology and Ecological Environment of Hebei Province, Hebei Climate Center, Shijiazhuang 050021

**Abstract:** Based on the equation of atmospheric pollutant mass conservation, the meteorological factors which affect air pollution are constructed and daily increment of air quality index (AQI) is taken as the object to quantitatively classify the air pollution potential. The atmospheric circulation background is divided into cold, mixed and warm-air circulations in autumn and winter by the Q-type cluster analysis method. Then the meteorological factor and its thresholds for distinguishing three types of atmospheric circulation are studied. Based on autumn-winter atmospheric data during 2017—2019, the five-grade prediction models of pollution potential are established, and the discriminant accuracies are 80.0%, 71.0% and 74.7% for cold, mixed and warm-air circulations respectively by the use of the Bayes discriminant analysis method. The mean accuracy of three air types reaches 75.2%. When the five-grade prediction models of pollution potential are tested with autumn-winter atmospheric data during 2015—2017, the mean accuracy of the three air types can reach 63.6%. Through comparison of atmospheric self-purification index (ASI) and the results from the five-grade prediction models of pollution potential with daily increment of AQI in autumn and winter from 2019 to 2021, the five-grade prediction models of pollution potential discriminant results are more consistent with the daily increment trend of AQI than ASI, and the correlation coefficient

<sup>\*</sup> 河北省科技计划项目(17275303D)和河北省气象局科研开发项目(19kyd01)共同资助

2021 年 9 月 28 日收稿; 2022 年 5 月 24 日收修定稿

第一作者:周须文,主要从事短期气候预测. E-mail: hbszxwgood@163.com

exceeds 0.67. The correct times of the five-grade prediction models of pollution potential for extremely favorable and extremely unfavorable pollutant diffusions are significantly more than by AQI.

**Key words:** atmospheric classification, air pollution potential, prediction model, data mining technology

## 引言

雾-霾天气一直是人们关注的焦点、研究的热点和政府治理大气污染的重点。雾-霾天气形成的条件主要有两个:一是人类活动向大气中排放的污染物,为霾的形成提供物质条件;二是静稳的气象条件。在污染源基本稳定的前提下,空气质量的优劣主要由气象条件决定。

Ding and Liu(2014)、江琪等(2017)、蔡子颖等(2017)、尚可等(2016)、于文金等(2016)、梅梅等(2019)等对气象条件与空气污染关系的研究表明:空气污染浓度与边界层内多个气象要素显著相关,70%的引起空气污染浓度日均值波动的因素是气象条件的变化。在环境气象服务中需要建立综合表达空气污染气象条件的量化指标,用于预测和评估污染气象条件的长、中、短期变化。国外,Wang and Angell(1999)通过对日平均海平面气压、地转风速、500 hPa 日平均水平风速、850 hPa 及以下逆温情况等设定判别条件定义了静稳天气指数;Tai et al (2010)基于上文静稳天气的定义,统计分析了美国在大气静稳日和非静稳日  $PM_{2.5}$  浓度的差别。该静稳天气指数给出的是大气静稳的定性判断依据,无法满足我国环境气象业务对定量描述大气静稳程度的需求。国内学者在对雾-霾天气气象条件的定量描述上开展了许多指数的研发工作,朱蓉等(2001)基于箱模式理论建立了空气污染潜势指数,并开发了城市大气污染数值预报系统(CAPPS);杨元琴等(2009)选取敏感气象要素:气温、气压、风、相对湿度、稳定度,并引入凝结函数开发了空气质量气象参数(PLAM)指数;廖碧婷等(2012)利用 K 指数、沙氏指数和 L 指数构建了垂直交换系数,对空气污染物的垂直输送能力进行了评估,并尝试对灰霾天气和无视程障碍天气进行预报;徐大海等(2016)提出了用 A 值法确定大气环境容量的方法;张恒德等(2017)根据预报经验和历史气象要素统计,挑选与大气污染有关的气象要素及其阈值,通过权重求和

初步构建了静稳天气综合指数(SWI);朱蓉等(2018)根据大气自身所具有的通风稀释和湿清除能力,定义大气自净能力指数,给出基于常规气象观测的计算方法。上述指数从不同角度体现了气象条件对空气污染的作用,但在环境气象业务应用中体现气象条件对空气污染的综合影响还有一定难度。本文结合气象业务部门现有数据环境,以大气污染物质量守恒方程为理论基础,构建物理意义明确的气象因子,并选取与大气污染密切相关的气象要素,基于数据挖掘技术建立大气污染潜势分级预测模型,实现大气污染潜势的客观化、量化、精细化预报。

## 1 资料与方法

选用 2015—2021 年秋、冬季(10 月 1 日至翌年 3 月 31 日)邢台地面、高空气象资料和空气质量指数资料。地面气象资料包括逐日 4 个标准时次的资料(气温、气压、风速)及日资料(平均气温、平均气压、相对湿度、平均风速和降水量);高空气象资料为逐日 4 个标准时次的 1 000、925、850、700、600 和 500 hPa 的气温、位势高度、风速。其中地面气象资料及 08 时、20 时(北京时,下同)的高空气象资料由河北省气象信息中心提供;02 时的高空资料由前一日 20 时和当日 08 时的相应资料计算平均获得,14 时的高空资料由当日 08 时和 20 时的相应资料计算平均获得。地面及 1 000、925 和 850 hPa 的日平均垂直速度,为距离邢台站最近格点(37.5°N、115.0°E)再分析资料(源自 NCEP/NCAR, <https://psl.noaa.gov/data/gridded/data.ncep.reanalysis.html>)。逐日的空气质量指数(AQI)资料来源于河北省生态环境监测中心空气质量实时发布平台。

本研究主要应用统计分析方法中的聚类分析(施能,2009)和 Bayes 判别分析(Friedman et al, 1997)方法。

## 2 大气背景场的分类

杨旭等(2017)对京津冀地区冬半年空气污染天

气进行了分型研究,表明不同天气类型下影响污染物扩散、输送、生成和转化的气象条件有所差异。周须文等(2020)对京津冀地区冬半年雾-霾消散大气进行了分类,表明在不同类型大气下,对雾-霾消散的影响因子及其贡献也不相同。因此有必要先对大气背景场进行分类研究。

## 2.1 大气背景场的聚类分析

对流层是大气圈最靠近地面的一层,受太阳辐射与大气环流的影响,对流层中下层的气流运动对天气现象的发生及大气污染物的扩散、输送和转化影响最大。对流层大气的气流运动状态可由各气压层气团热力性质变化来表征,因此选取对流层中下层标准气压层(500、600、700、850、925、1000 hPa)08 时的 24 h 变温和代表整个气柱冷暖气团变化的地面 24 h 变压作为研究大气背景场因子。

对邢台 2017—2019 年秋、冬季逐日大气 362 个个例进行 Q 型聚类,分析自动生成的不同数量的分类个例特征,认为把大气背景场分三类的个例特征具有明确的天气学意义。图 1 是大气分三类中个例 24 h 变温因子( $\Delta T_{24h}$ )合成,可以清楚看出三类大气特征具有明显差异:第一类对流层中下层(500 hPa 以下)均是明显的负变温;第二类均是正变温;第二类在边界层内(850 hPa 以下)为正变温,边界层以上(850~500 hPa)为负变温。表明第一类大气对流层中下层冷气团移入为主,称为冷空气型;

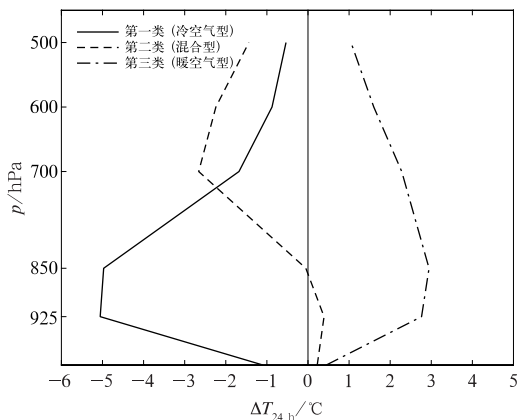


图 1 2017—2019 年秋、冬季邢台个例合成的三种大气环流类型的气压-变温图  
Fig. 1 Vertical distributions of temperature change and pressure for three atmospheric types in Xingtai during autumn and winter from 2017 to 2019

第二类大气在边界层内以正变温为主,边界层以上以负变温为主,对流层中下层呈上冷下暖的分布特征,称为混合型;第三类大气对流层中下层均为正变温,说明多为暖气团移入,称为暖空气型。这三类清楚地表明了边界层上部自由大气的运动状态。

## 2.2 大气背景场分类的指标气象因子及阈值

### 2.2.1 大气分类的指标气象因子分析

为了比较各气压层 24 h 变温因子在三类大气中的分布差异,对三类大气中 24 h 变温 $\leq 0$ 的个例数占该类总个例数的百分比进行统计。根据三类大气的天气学意义,冷空气型大气中,24 h 变温 $\leq 0$ 的个例数占比越大越好;暖空气型大气中,24 h 变温 $\leq 0$ 的个例数占比越小越好。由图 2 可见,冷空气型大气中 850 hPa 的 24 h 变温 $\leq 0$ 的个例数占比最大,为 81.6%;暖空气型大气中 850 hPa 的 24 h 变温 $\leq 0$ 的个例数占比最少,只有 2.5%;表明 850 hPa 的 24 h 变温因子在冷空气型和暖空气型大气中重叠个例最少。混合型大气中 850 hPa 的 24 h 变温 $\leq 0$ 的个例数占比为 50%,说明该因子中位数为 0,其值大多在 0 附近。从各类型大气因子平均值(图 1)看到:在 850 hPa 层上,混合型大气因子平均值接近 0,而冷空气型和暖空气型因子平均值与混合型大气因子平均值相差都较大,显然 850 hPa 的 24 h 变温因子较其他气压层的因子对三类大气更具代表性。因此采用 850 hPa 的 24 h 变温因子作为大气背景分类的指标气象因子。

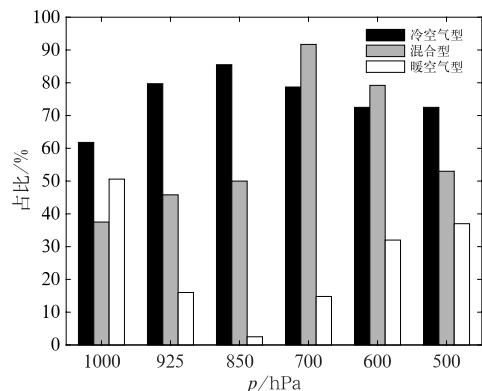


图 2 2017—2019 年秋、冬季邢台三种大气环流类型 24 h 变温 $\leq 0$ 的个例占比  
Fig. 2 The case proportions of  $\Delta T_{24h} \leq 0$  for three atmospheric types in Xingtai during autumn and winter from 2017 to 2019

### 2.2.2 指标因子阈值的确定

统计 850 hPa 的 24 h 变温因子在各类大气中的频数及概率分布(图 3),三类大气环流背景下的 24 h 变温因子发生频次均呈现单峰形态,并且冷空气型、混合型和暖空气型因子自左至右呈错峰分布,峰值位置具有明显的差异。它们的概率分布都具有正态分布特征,相邻两类之间呈双峰结构,采用双峰法选择阈值,即双峰之间的最低谷处就是两类分割的阈值,根据这一原理可以计算相近两类大气的分割阈值。计算结果显示,冷空气型与混合型大气分割阈值为 $-2.84^{\circ}\text{C}$ ,混合型与暖空气型大气分割阈值为 $1.36^{\circ}\text{C}$ 。根据上述阈值对邢台 2017—2019 年秋、冬季逐日大气进行区分,区分三类大气环流类型的正确百分率分别为:69%(冷空气型)、61%(混合型)、78%(暖空气型)。表明选取的指标因子及其阈值对大气背景具有较好的分类效果。

## 3 大气污染潜势气象因子的选取

### 3.1 大气污染潜势气象因子构建的理论基础

根据大气污染物质量守恒方程(龚强等,1999):

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -v \cdot \nabla_2 C - \omega \frac{\partial C}{\partial p} + \nabla_3 (K \nabla_3 C) + Q + H \quad (1)$$

式中: $C$  为大气中的污染物浓度, $v$  为水平风速, $\omega$  为垂直速度, $p$  为气压, $K$  为湍流扩散系数, $Q$  为污染物的排放量, $H$  为湿沉降量, $\nabla_2$  代表水平二维向量算子, $\nabla_3$  代表空间三维向量算子。

从式(1)可见,某地污染浓度变化取决于平流扩散、对流扩散、湍流扩散、污染物排放和湿沉降五大项。假设污染物排放量没有变化,污染浓度变化主要由其余四项决定。大气低层污染物的扩散和清除主要发生在混合层内,那么大气对污染物的平流扩散能力可用混合层的大气通风量表示:

$$V_E = \int_0^h u(z) dz \quad (2)$$

式中: $V_E$  为大气通风量, $u(z)$  为混合层内  $z$  高度的风速, $h$  为混合层高度。

对流扩散是大气垂直运动的结果,因此对流扩散能力由大气边界层内的垂直速度  $\omega$  来表示。

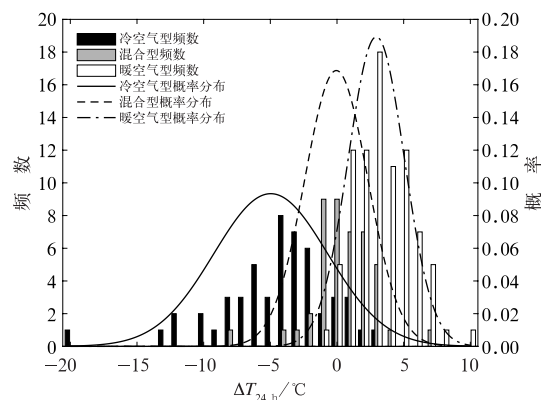


图3 2017—2019 年秋、冬季邢台  
24 h 变温因子在三种大气环流类型  
中的频数和概率分布

Fig. 3 Frequency and probability distribution  
of  $\Delta T_{24h}$  factor for three atmospheric types  
in Xingtai during autumn and  
winter from 2017 to 2019

湍流扩散是大气中不规则、无组织的时空尺度跨度很大的气团运动,分为机械湍流和热力湍流。机械湍流激发的扩散能力可用风速的垂直切变率来表示:

$$V_R = \frac{u_2 - u_1}{z_2 - z_1} \quad (3)$$

式中: $V_R$  表示风速的垂直切变率, $z_2$ 、 $z_1$  表示两个气压层的高度, $u_2$ 、 $u_1$  表示两个气压层的风速。

热力湍流主要是在垂直方向产生温度梯度而造成的。国际原子能机构在 1980 年推出了温度梯度法,即用两层大气间铅直方向的温度梯度来表示垂直方向上的湍流状态,判据可表示为:

$$T_R = \frac{\Delta T}{\Delta z} \quad (4)$$

式中: $T_R$  表示铅直方向温度梯度, $\Delta T$  表示两个气压层的温度差, $\Delta z$  表示两个气压层的厚度。

湿沉降是指降水对大气中污染物冲刷使得大气中污染物浓度降低。湿沉降能力( $V_w$ )可表示为:

$$V_w = W_r r \quad (5)$$

式中: $W_r$  表示雨洗常数,取  $6 \times 10^5$ ;  $r$  为降水率。

### 3.2 气象因子的计算方法

#### (1) 混合层高度

大气边界层的上限高度即为混合层高度,因天气条件而异,白天与夜晚不同,城乡也有明显差别。

在中纬度城市,通常晴天的白天混合层高度可达到 1000~1500 m(850 hPa),夜晚只有 200 m 左右。由于受观测资料所限,把 850 hPa 以下的大气认为是大气边界层,由于大气边界层内不同高度的气象因子对污染物迁移扩散作用不同,根据气象部门现有的气象资料,把混合层高度按标准气压层(850 hPa、925 hPa)分为两段(地面至 925 hPa、925~850 hPa)分别进行计算。

根据天气学原理,两等压面之间的厚度计算公式为:

$$h = RT_m \ln \left( \frac{p_1}{p_0} \right) / 9.8 \quad (6)$$

式中:比气体常数  $R=2.87$ ,  $T_m=0.5(T_1+T_0)$ (等压面  $p_1$  和  $p_0$  的气温平均值);地面至 925 hPa 的厚度记为  $h_1$ ,925~850 hPa 的厚度记为  $h_2$ ;混合层高度:  $h=h_1+h_2$ 。

(2)平流扩散因子——大气通风量

地面至 925 hPa 的通风量:  $V_{E1}=0.5(u_{地面}+u_{925})h_1$

925~850 hPa 的通风量:  $V_{E2}=0.5(u_{925}+u_{850}) \times h_2$

(3)对流扩散因子——垂直速度

选取了地面( $\omega_{地}$ )和边界层内标准气压层的垂直速度( $\omega_{1000}$ ,  $\omega_{925}$ ,  $\omega_{850}$ )。

(4)机械湍流因子——风速垂直切变

地面至 925 hPa 的风切变:  $V_{R1}=(u_{925}-u_{地面})/h_1$

925~850 hPa 的风切变:  $V_{R2}=(u_{850}-u_{925})/h_2$

(5)热力湍流因子——垂直温度梯度

地面至 925 hPa 的温度梯度:  $T_{R1}=(T_{925}-T_{地面})/h_1$

925~850 hPa 的温度梯度:  $T_{R2}=(T_{850}-T_{925})/h_2$

(6)湿沉降因子

湿沉降因子代表的是降水对大气中污染物的冲刷能力,因此选取 24 h 降水量作为湿沉降因子。

3.3 大气污染潜势气象因子的选取

根据实际气象资料情况,选取地面和边界层内标准气压层的日平均垂直速度作为对流扩散因子;选取 24 h 降水量作为湿沉降因子,因子对应符号见表 1。平流扩散因子选取大气边界层内 2 个高度层 4 个时次的大气通风量,共 8 个因子;湍流扩散因子选取大气边界层内 2 个高度层 4 个时次的风速垂直切变、垂直温度梯度,共 16 个因子。因子对应符号见表 2。另外,根据杨元琴等(2009)、张恒德等(2017)的研究成果,选取了地面敏感气象要素:日平均气温、日平均气压、日平均相对湿度、日平均风速、24 h 变压、24 h 变温,因子对应符号见表 3。

表 1 对流扩散因子、湿沉降因子的名称、符号对照

| Table 1 Reference table of atmospheric factor symbols for convection diffusion and wet depositions |              |                 |                |                |          |
|--|--------------|-----------------|----------------|----------------|----------|
| 名称   | 地面垂直速度       | 1 000 hPa 垂直速度  | 925 hPa 垂直速度   | 850 hPa 垂直速度   | 24 h 降水量 |
| 符号   | $\omega_{地}$ | $\omega_{1000}$ | $\omega_{925}$ | $\omega_{850}$ | $R_{24}$ |

表 2 平流扩散因子、湍流扩散因子的名称、符号对照

| Table 2 Reference table of atmospheric factor symbols for advection and turbulent diffusion |             |            |            |            |            |
|---|-------------|------------|------------|------------|------------|
| 因子名称  | 高度层         | 时次         |            |            |            |
|   |             | 02 时       | 08 时       | 14 时       | 20 时       |
| 大气通风量   | 地面至 925 hPa | $V_{E102}$ | $V_{E108}$ | $V_{E114}$ | $V_{E120}$ |
|   | 925~850 hPa | $V_{E202}$ | $V_{E208}$ | $V_{E214}$ | $V_{E220}$ |
| 垂直温度梯度  | 地面至 925 hPa | $T_{R102}$ | $T_{R108}$ | $T_{R114}$ | $T_{R120}$ |
|   | 925~850 hPa | $T_{R202}$ | $T_{R208}$ | $T_{R214}$ | $T_{R220}$ |
| 风速垂直切变  | 地面至 925 hPa | $V_{R102}$ | $V_{R108}$ | $V_{R114}$ | $V_{R120}$ |
|   | 925~850 hPa | $V_{R202}$ | $V_{R208}$ | $V_{R214}$ | $V_{R220}$ |

表 3 地面气象因子的名称、符号对照

| Table 3 Reference table of atmospheric factor symbols for factor symbols in surface |                 |                 |       |       |         |       |
|---|-----------------|-----------------|-------|-------|---------|-------|
| 名称  | 24 h 变压         | 24 h 变温         | 日平均气温 | 日平均气压 | 日平均相对湿度 | 日平均风速 |
| 符号  | $\Delta p_{24}$ | $\Delta T_{24}$ | $T$   | $p$   | $rh$    | $fs$  |

## 4 大气污染潜势分级预测模型建立

### 4.1 大气污染潜势分级

大气污染潜势直接影响空气质量的变化,因此大气污染潜势的分级可依据 AQI 日增量来划分。对 2015—2019 年秋、冬季邢台 AQI 日增量统计分析(图 4):AQI 日增量出现频率呈正态分布,AQI 日增量平均值为 0.46,标准差为 65,表明大气污染潜势五级划分比较合理;参考全国气象防灾减灾标准化技术委员会(2018),把 AQI 日增量-80、-30、30、80 作为分界值(表 4)。划分的 AQI 日增量五分级与 AQI 日增量的相关性为 0.95,说明 AQI 日增量五分级能较好代表 AQI 日变化状况。

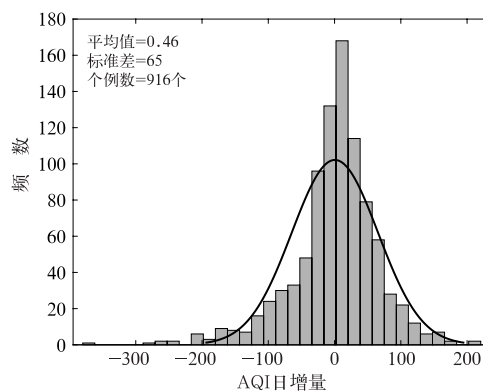


图 4 2015—2019 年秋、冬季  
邢台 AQI 日增量分布

Fig. 4 Frequency distribution of AQI daily increment in Xingtai during autumn and winter from 2015 to 2019

表 4 污染潜势五级等级标准和描述

Table 4 Five grades of air pollution potential

| 等级 | AQI 日增量        | 描述                      |
|----|----------------|-------------------------|
| 1  | $\leq -80$     | 气象条件非常有利于空气污染物稀释、扩散和清除  |
| 2  | $-80 \sim -30$ | 气象条件有利于空气污染物稀释、扩散和清除    |
| 3  | $-30 \sim 30$  | 气象条件对空气污染物稀释、扩散和清除无明显影响 |
| 4  | $30 \sim 80$   | 气象条件不利于空气污染物稀释、扩散和清除    |
| 5  | $80 \geq$      | 气象条件非常不利于空气污染物稀释、扩散和清除  |

### 4.2 建立大气污染潜势五分级预测模型

创建预测模型采用的是 2017—2019 年秋、冬季邢台的资料。首先对建模资料进行处理:(1)根据大气背景分类指标因子及其阈值对研究的个例进行识别分类,建立冷空气型、混合型和暖空气型三类大气影响因子数据库。(2)对各类型大气个例的 AQI 日增量按表 4 的污染潜势五分级标准进行划分,构建带有标号的模型创建训练数据集。

由于选取的变量因子较多,在应用 Bayes 判别方法建立判别函数过程中,通过逐步选择法对自变量因子进行筛选,剔出了最低容差水平在 0.001 以下的变量,最后保留了对模型判别贡献较大的变量因子。通过对数据集训练确定了五分级判别函数的变量因子系数(表 5~表 7)。对比表 5~表 7 发现,不同大气背景的五分级判别函数,参与的变量因子及其权重都有所不同,说明大气中污染物的聚集和消散是复杂多变的,不同大气背景下其变化机制存

在较大差异,分类建立预测模型是必要的。

把大气污染潜势 1~5 级判别函数的预测概率依次记为: $P_1$ 、 $P_2$ 、 $P_3$ 、 $P_4$ 、 $P_5$ ,以冷空气型为例,给出了大气污染潜势五分级预测模型:

$$P_1 = -64.292 + 1.57X_1 - 0.611X_2 + 0.547X_3 + 5.886X_4 + 0.064X_5 + 0.027X_6 - 0.085X_7 - 0.055X_9 - 0.031X_{10} + 0.09X_{11} + 11.545X_{12} + 24.352X_{13} - 48.602X_{14} - 9.236X_{15} - 11.778X_{16} - 18.647X_{17} + 113.96X_{18} + 74.001X_{19} - 211.39X_{20} + 169.279X_{22} + 47.454X_{23} - 184.127X_{24} - 64.508X_{25} + 292.146X_{26} - 276.66X_{27} + 79.364X_{28}$$

$$P_2 = -59.405 + 1.44X_1 - 0.75X_2 + 0.56X_3 + 6.435X_4 + 0.057X_5 + 0.019X_6 - 0.076X_7 - 0.05X_9 - 0.02X_{10} + 0.08X_{11} + 11.322X_{12} + 26.816X_{13} - 50.867X_{14} - 10.223X_{15} - 8.168X_{16} - 20.104X_{17} + 102.322X_{18} + 57.35X_{19} - 190.612X_{20} + 154.69X_{22} + 32.032X_{23} - 163.631X_{24} - 52.518X_{25} + 260.469X_{26} - 231.071X_{27} + 58.711X_{28}$$

表 5 冷空气型大气污染潜势五分级判别函数系数

Table 5 Five grades discriminant function of pollution potential for cold air type

| 变量因子符号          | 变量编号     | 1 级      | 2 级      | 3 级      | 4 级      | 5 级      |
|-----------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| $\Delta p_{24}$ | $X_1$    | 1.570    | 1.438    | 1.232    | 1.587    | 2.219    |
| $\Delta T_{24}$ | $X_2$    | -0.611   | -0.750   | -0.475   | -0.225   | 1.136    |
| $rh$            | $X_3$    | 0.547    | 0.558    | 0.533    | 0.580    | 0.391    |
| $fs$            | $X_4$    | 5.886    | 6.435    | 5.618    | 5.475    | 3.353    |
| $V_{E102}$      | $X_5$    | 0.064    | 0.057    | 0.045    | 0.064    | 0.078    |
| $V_{E108}$      | $X_6$    | 0.027    | 0.019    | 0.02     | 0.026    | 0        |
| $V_{E114}$      | $X_7$    | -0.085   | -0.076   | -0.064   | -0.090   | -0.099   |
| $V_{E202}$      | $X_9$    | -0.055   | -0.05    | -0.039   | -0.055   | -0.067   |
| $V_{E208}$      | $X_{10}$ | -0.031   | -0.023   | -0.023   | -0.030   | -0.007   |
| $V_{E214}$      | $X_{11}$ | 0.090    | 0.08     | 0.068    | 0.095    | 0.101    |
| $T_{R102}$      | $X_{12}$ | 11.545   | 11.322   | 4.901    | 8.999    | 39.136   |
| $T_{R108}$      | $X_{13}$ | 24.352   | 26.816   | 29.293   | 31.485   | 10.229   |
| $T_{R114}$      | $X_{14}$ | -48.602  | -50.867  | -44.598  | -51.804  | -63.095  |
| $T_{R202}$      | $X_{15}$ | -9.236   | -10.223  | -12.488  | -10.711  | -19.838  |
| $T_{R208}$      | $X_{16}$ | -11.778  | -8.168   | -5.910   | -4.901   | -24.892  |
| $T_{R214}$      | $X_{17}$ | -18.647  | -20.104  | -15.585  | -18.594  | 3.473    |
| $V_{R102}$      | $X_{18}$ | 113.96   | 102.322  | 80.267   | 106.541  | 122.395  |
| $V_{R108}$      | $X_{19}$ | 74.001   | 57.353   | 53.149   | 76.409   | 28.08    |
| $V_{R114}$      | $X_{20}$ | -211.39  | -190.612 | -157.361 | -224.287 | -239.453 |
| $V_{R202}$      | $X_{22}$ | 169.279  | 154.690  | 125.881  | 176.865  | 188.553  |
| $V_{R208}$      | $X_{23}$ | 47.454   | 32.032   | 33.865   | 40.092   | -10.007  |
| $V_{R214}$      | $X_{24}$ | -184.127 | -163.631 | -137.354 | -195.532 | -210.011 |
| $\omega_{地}$    | $X_{25}$ | -64.508  | -52.518  | -57.870  | -72.354  | 7.676    |
| $\omega_{1000}$ | $X_{26}$ | 292.146  | 260.469  | 230.189  | 249.041  | 246.443  |
| $\omega_{925}$  | $X_{27}$ | -276.660 | -231.071 | -164.605 | -170.643 | -277.510 |
| $\omega_{850}$  | $X_{28}$ | 79.364   | 58.711   | 27.415   | 36.046   | 85.526   |
| 常数              |          | -64.292  | -59.405  | -51.758  | -64.256  | -65.768  |

表 6 同表 5, 但为混合型

Table 6 Same as Table 5, but for mixed air type

| 变量因子符号          | 变量编号     | 1 级      | 2 级     | 3 级     | 4 级     | 5 级     |
|-----------------|----------|----------|---------|---------|---------|---------|
| $\Delta T_{24}$ | $X_2$    | 0.430    | 0.437   | 0.597   | 0.741   | 1.031   |
| $rh$            | $X_3$    | 0.524    | 0.553   | 0.541   | 0.541   | 0.560   |
| $fs$            | $X_4$    | 6.590    | 6.340   | 6.208   | 6.898   | 5.058   |
| $V_{E108}$      | $X_6$    | 0.009    | 0.008   | 0.009   | 0.009   | 0.009   |
| $V_{E120}$      | $X_8$    | 0.011    | 0.010   | 0.011   | 0.011   | 0.010   |
| $V_{E202}$      | $X_9$    | 0.007    | 0.008   | 0.008   | 0.007   | 0.006   |
| $V_{E214}$      | $X_{11}$ | -0.018   | -0.015  | -0.018  | -0.017  | -0.016  |
| $T_{R102}$      | $X_{12}$ | -21.745  | -23.460 | -25.537 | -26.613 | -34.488 |
| $T_{R108}$      | $X_{13}$ | 14.641   | 16.468  | 19.199  | 21.001  | 29.377  |
| $T_{R202}$      | $X_{15}$ | -21.097  | -21.214 | -22.573 | -20.780 | -18.405 |
| $T_{R208}$      | $X_{16}$ | 2.160    | 4.081   | 4.182   | 4.517   | -0.342  |
| $T_{R214}$      | $X_{17}$ | 6.112    | 1.528   | 3.217   | 4.492   | 7.484   |
| $V_{R102}$      | $X_{18}$ | -12.879  | -18.565 | -19.349 | -19.921 | -17.612 |
| $V_{R108}$      | $X_{19}$ | -11.530  | -12.555 | -11.737 | -11.113 | -12.573 |
| $V_{R114}$      | $X_{20}$ | 49.365   | 42.562  | 51.237  | 51.201  | 49.045  |
| $V_{R208}$      | $X_{23}$ | -9.540   | -11.03  | -9.000  | -8.223  | -5.428  |
| $V_{R214}$      | $X_{24}$ | 57.610   | 51.459  | 56.604  | 54.727  | 50.149  |
| $\omega_{地}$    | $X_{25}$ | -39.443  | -52.560 | -44.059 | -52.265 | -40.142 |
| $\omega_{1000}$ | $X_{26}$ | 169.159  | 156.023 | 115.224 | 141.775 | 75.431  |
| $\omega_{925}$  | $X_{27}$ | -100.697 | -89.713 | -59.584 | -78.901 | -12.873 |
| 常数              |          | -45.264  | -49.302 | -44.399 | -45.588 | -46.956 |



表 7 同表 5, 但为暖空气型

Table 7 Same as Table 5, but for warm air type

| 变量因子符号          | 变量编号     | 1 级                    | 2 级     | 3 级      | 4 级                  | 5 级      |
|-----------------|----------|------------------------|---------|----------|----------------------|----------|
| $\Delta P_{24}$ | $X_1$    | 0.327                  | 0.195   | -0.085   | 0.017                | -0.143   |
| $\Delta T_{24}$ | $X_2$    | 1.137                  | 1.042   | 0.782    | 0.950                | 0.858    |
| $rh$            | $X_3$    | 0.523                  | 0.455   | 0.417    | 0.446                | 0.464    |
| $fs$            | $X_4$    | 8.290                  | 5.067   | 7.353    | 6.943                | 5.637    |
| $V_{E102}$      | $X_5$    | 0.020                  | 0.019   | 0.019    | 0.020                | 0.019    |
| $V_{E108}$      | $X_6$    | $-4.58 \times 10^{-5}$ | 0.000   | 0.001    | $7.6 \times 10^{-5}$ | 0.001    |
| $V_{E114}$      | $X_7$    | -0.001                 | 0.002   | 0.001    | 0.001                | 0.001    |
| $V_{E202}$      | $X_9$    | -0.012                 | -0.012  | -0.015   | -0.015               | -0.013   |
| $T_{R102}$      | $X_{12}$ | -22.681                | -36.564 | -37.418  | -36.836              | -39.574  |
| $T_{R108}$      | $X_{13}$ | 16.088                 | 22.316  | 27.232   | 27.510               | 27.107   |
| $T_{R114}$      | $X_{14}$ | 5.775                  | 8.620   | -0.573   | 0.381                | 4.061    |
| $T_{R202}$      | $X_{15}$ | -16.996                | -8.058  | -23.245  | -18.938              | -12.290  |
| $T_{R208}$      | $X_{16}$ | 21.002                 | 3.993   | 15.150   | 12.843               | 8.783    |
| $V_{R102}$      | $X_{18}$ | 32.977                 | 25.345  | 29.852   | 30.648               | 27.804   |
| $V_{R114}$      | $X_{20}$ | -17.03                 | -3.309  | -5.120   | -7.058               | -9.156   |
| $V_{R120}$      | $X_{21}$ | 10.537                 | 3.989   | 5.475    | 6.079                | 8.2      |
| $V_{R202}$      | $X_{22}$ | 49.650                 | 44.713  | 41.259   | 45.031               | 40.797   |
| $V_{R208}$      | $X_{23}$ | -11.828                | -5.754  | -6.013   | -7.824               | -7.019   |
| $V_{R214}$      | $X_{24}$ | -0.540                 | 2.078   | 7.375    | 6.913                | 7.505    |
| $\omega_{地}$    | $X_{25}$ | 6.326                  | -32.471 | -6.804   | -16.775              | -11.999  |
| $\omega_{1000}$ | $X_{26}$ | 41.698                 | 105.327 | 123.208  | 104.036              | 140.788  |
| $\omega_{925}$  | $X_{27}$ | 38.826                 | 19.556  | -181.341 | -110.130             | -157.027 |
| $\omega_{850}$  | $X_{28}$ | -33.859                | -56.697 | 114.497  | 66.265               | 78.047   |
| 常数              |          | -52.297                | -44.061 | -41.398  | -39.853              | -43.337  |

$$P_3 = -51.758 + 1.232X_1 - 0.475X_2 + 0.533X_3 + 5.618X_4 + 0.045X_5 + 0.02X_6 - 0.064X_7 - 0.039X_9 - 0.023X_{10} + 0.068X_{11} + 4.901X_{12} + 29.293X_{13} - 44.598X_{14} - 12.488X_{15} - 5.91X_{16} - 15.585X_{17} + 80.267X_{18} + 53.149X_{19} - 157.361X_{20} + 125.881X_{22} + 33.865X_{23} - 137.354X_{24} - 57.87X_{25} + 230.189X_{26} - 164.605X_{27} + 27.415X_{28}$$

$$P_4 = -64.256 + 1.587X_1 - 0.225X_2 + 0.58X_3 + 5.475X_4 + 0.064X_5 + 0.03X_6 - 0.09X_7 - 0.055X_9 - 0.03X_{10} + 0.095X_{11} + 8.999X_{12} + 31.485X_{13} - 51.804X_{14} - 10.711X_{15} - 4.901X_{16} - 18.594X_{17} + 106.541X_{18} + 76.41X_{19} - 224.287X_{20} + 176.865X_{22} + 40.092X_{23} - 195.532X_{24} - 72.354X_{25} + 249.041X_{26} - 170.643X_{27} + 36.046X_{28}$$

$$P_5 = -65.768 + 2.219X_1 + 1.136X_2 + 0.391X_3 + 3.353X_4 + 0.078X_5 - 0.099X_7 - 0.067X_9 - 0.007X_{10} + 0.101X_{11} + 39.136X_{12} + 10.229X_{13} - 63.095X_{14} - 19.838X_{15} - 24.892X_{16} + 3.473X_{17} + 122.395X_{18} + 28.08X_{19} - 239.453X_{20} + 188.553X_{22} - 10.007X_{23} - 210.011X_{24} + 7.676X_{25} + 246.443X_{26} - 277.51X_{27} + 85.526X_{28}$$

上述判别函数通过自身验证得到的大气污染潜

势五级判别正确率为 75.2%, 其中冷空气型预测模型判别正确率为 80.0%, 混合型为 71.0%, 暖空气型为 74.7%。

## 5 大气污染潜势五分级预测模型检验

### 5.1 模型独立检验

模型独立检验法是对判别分析得到的判别函数效果评判最客观有效的方法。把 2015—2016 年秋、冬季邢台逐日气象资料代入预测模型中, 比较各级判别函数值( $P_1, P_2, P_3, P_4, P_5$ )的大小, 根据 Bayes 判别准则, 函数值最大代表所对应级别出现概率最大, 即是预测级别。把污染潜势预测级别与实际 AQI 日增量级别进行对比, 预测级别与 AQI 日增量级别相一致的记为正确, 预测正确日数占实际出现日数的百分比即为预测正确率。表 8 为 2015—2016 年秋、冬季邢台污染潜势五分级预测正确率, 看到三类大气的预测模型虽然对各等级的污染潜势预测正确率存在差别, 但对各等级正确率的分布形态基本一致。都对大气处于正常状态的三级预测最好, 正确率在 80% 以上; 其次是非常利于大气污染



物扩散的一级和非常不利于扩散的五级,它们的各级正确率分别为 64.8%和 59.1%。该预测模型对 2015—2016 年秋、冬季邢台污染潜势五分级预测综

合正确率为 63.6%,能较好预测大气对污染物的聚集、扩散能力。

表 8 2015—2016 年秋、冬季邢台污染潜势五分级预测正确率(单位:%)

Table 8 Five grades prediction accuracy of air pollution potential during autumn and winter from 2015 to 2016 (unit: %)

|       | 1 级  | 2 级  | 3 级  | 4 级  | 5 级   | 综合正确率 |
|-------|------|------|------|------|-------|-------|
| 冷空气型  | 69.6 | 58.8 | 81.6 | 33.3 | 100.0 | 70.6  |
| 混合型   | 54.5 | 33.3 | 83.9 | 29.4 | 75.0  | 56.1  |
| 暖空气型  | 66.7 | 50.0 | 80.5 | 68.5 | 52.9  | 64.5  |
| 各级正确率 | 64.8 | 45.2 | 82.2 | 57.1 | 59.1  | 63.6  |

## 5.2 与大气自净能力指数预测对比分析

### 5.2.1 大气自净能力指数及其等级划分

大气自净能力指数(ASI)是对雾-霾天气气象条件定量描述指数,它反映的是大气运动对污染物的通风稀释作用和降水对污染物的湿清除作用。根据朱蓉等(2018)提出的 ASI 计算方法,计算邢台 2019—2021 年秋、冬季的 ASI。

为了便于与预测模型判别结果对比,同样将 ASI 划分为五级进行评价。ASI 五级划分依据具体为:(1)ASI 按  $2.5 \text{ t} \cdot \text{d}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$  和  $4.1 \text{ t} \cdot \text{d}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$  两个限值,分为优、良和一般三个评价等级(全国气候与气候变化标准化技术委员会,2020)。(2)根据朱蓉等(2018)对 ASI 的研究,当 ASI 低于  $1.4 \text{ t} \cdot \text{d}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$  时,京津冀地区容易出现 AQI 达到 200 的空气质量重污染等级;(3)结合 ASI 与 AQI 日增量的统计分析,当 ASI 低于  $0.4 \text{ t} \cdot \text{d}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$

时,AQI 日增量在 80 以上,ASI 的分级阈值和等级描述见表 9。ASI 划分的五分级与 ASI 的相关系数为  $-0.915$ (表 10),通过了  $\alpha=0.01$  显著性水平检验,表明该五分级能较好地代表大气的自净能力指数。

### 5.2.2 大气自净能力指数和污染潜势五分级预测对比

对 2019—2021 年秋、冬季邢台逐日 AQI 日增量、ASI 和污染潜势五分级等预测进行了双变量相关分析(表 10),可以看到:AQI 日增量五分级与 AQI 日增量相关系数为 0.947,表明 AQI 日增量五分级能较好地代表大气对物的稀释扩散能力。ASI 五分级与 AQI 日增量、AQI 日增量五分级的相关性均高于 ASI,说明 ASI 五分级在对大气扩散能力的描述上优于 ASI;污染潜势五分级预测与 AQI 日增量、AQI 日增量五分级的相关性分别为 0.676 和 0.679,明显高于 ASI 和 ASI 五分级。显然污染潜势五分级模型预测结果优于 ASI。

图 5 为 2019 年 12 月 1 日至 2020 年 2 月 29 日邢台逐日 AQI 日增量等级实况和 ASI 等级、污染潜势等级预测结果,无论是正常生产时段还是疫情封闭时段(2020 年 1 月 24 日至 2 月 29 日),AQI 日增量等级变化没有明显差异,说明 AQI 日增量主要受大气条件的影响,污染物排放量对其影响不大;模型判别的污染潜势等级与 AQI 日增量等级的变化趋势具有较高的一致性,明显好于 ASI 等级;模型对

表 9 ASI 评价等级

Table 9 Evaluation grads of ASI

| ASI/( $\text{t} \cdot \text{d}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$ ) | 等级 | 描述     |
|---|----|--------|
| $ASI > 4.1$   | 1  | 极利于扩散  |
| $2.5 < ASI \leq 4.1$  | 2  | 利于扩散   |
| $1.4 < ASI \leq 2.5$  | 3  | 不明显    |
| $0.4 < ASI \leq 1.4$  | 4  | 不利于扩散  |
| $ASI \leq 0.4$  | 5  | 极不利于扩散 |

表 10 2019—2021 年秋、冬季邢台不同预测结果的相关性分析

Table 10 The correlation coefficients in different forecasts in Xingtai during autumn and winter from 2019 to 2021

|            | AQI 日增量  | AQI 日增量五分级 | ASI      | ASI 五分级 |
|------------|----------|------------|----------|---------|
| AQI 日增量五分级 | 0.947    |            |          |         |
| ASI        | $-0.436$ | $-0.383$   |          |         |
| ASI 五分级    | 0.469    | 0.422      | $-0.915$ |         |
| 污染潜势五分级    | 0.676    | 0.679      | $-0.396$ | 0.398   |

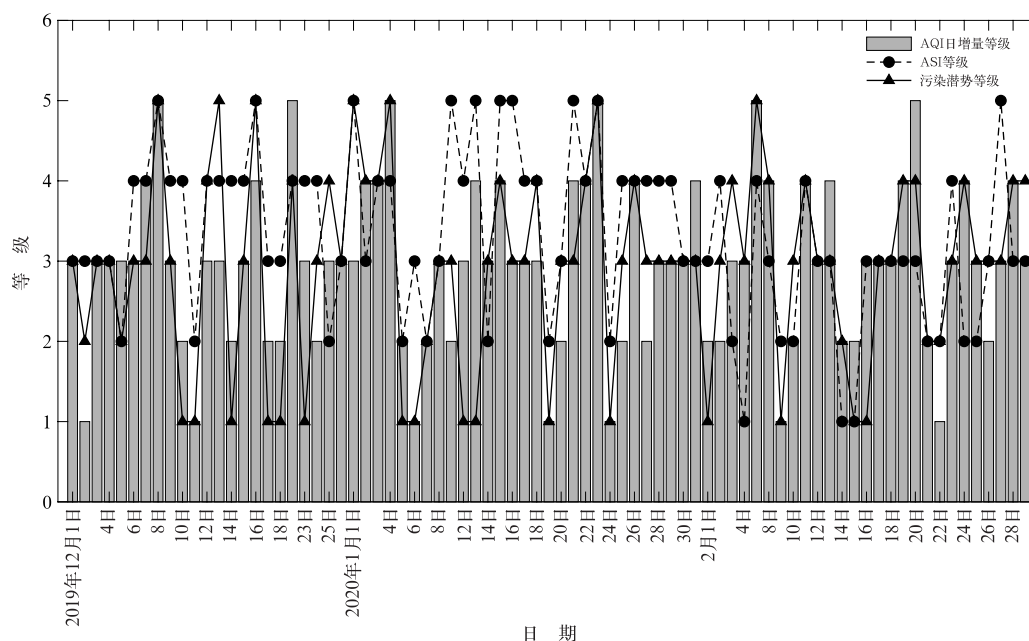


图5 2019年12月1日至2020年2月29日邢台AQI日增量、ASI、污染潜势预测的等级时间序列

Fig. 5 Time series of AQI daily increment, ASI and model prediction grads in Xingtai from 1 December 2019 to 29 February 2020

极利于扩散的一级和极不利于扩散的五级判别正确次数明显高于ASI;模型判别的污染潜势等级与AQI日增量等级实况基本上是相同或相差一级,而ASI等级与AQI日增量等级相差两级以上的较多。显然,模型对大气污染潜势的五级判别能力好于ASI。

## 6 结论与讨论

介绍了应用数据挖掘技术研究大气污染潜势分级预报方法,对邢台建立的大气污染潜势五分级预测模型进行了检验分析,得到结论如下:

(1)通过对大气环流背景的分类研究,发现大气背景场可分为具有明确物理意义的三种大气环流类型(冷空气型、混合型、暖空气型),850 hPa的24 h变温是区分三类大气环流的最佳指标因子;采用双峰法选择的指标因子阈值能较好地区分三类大气环流,对冷空气型、混合型、暖空气型大气区分正确率分别为69%、61%和78%。

(2)应用数据挖掘技术客观选取变量因子及其权重,结果表明:大气中污染物的聚集和消散都是复杂的过程,有众多因子参与,不同大气背景各因子的贡献有较大差异。

(3)建立的大气污染潜势五分级预测模型能较

好地对AQI日增量进行五级判别,综合判别正确率为63.6%,其中冷空气型预测模型综合判别正确率最高,为70.6%。

(4)大气污染潜势五分级预测模型的判别结果与实际大气AQI日增量等级的变化趋势具有较高的一致性,相关系数在0.67以上;明显好于ASI对污染潜势五分级的预测结果。

数据挖掘大多数是大而全、多而精,数据越多模型越可能精确,变量越多,数据之间的关系越明确。由于受到现有气象资料的限制,对气象因子的选用和计算都较粗,随着观测技术的进步,还需要在选取因子及其计算方面不断改进,使建立的预测模型准确率不断提高。

## 参考文献

- 蔡子颖,姚青,韩素芹,等,2017. 21世纪以来天津细颗粒物气象扩散能力趋势分析[J]. 中国环境科学,37(6):2040-2046. Cai Z Y, Yao Q, Han S Q, et al, 2017. The trends of fine particulate meteorological diffusivity in Tianjin from 21th[J]. China Environ Sci, 37(6):2040-2046(in Chinese).
- 龚强,白乐生,杨宏斌,1999. 空气污染潜势指数预报方法[J]. 气象与环境学报,15(3):46-47. Gong Q, Bai L S, Yang H B, 1999. Prediction method of air pollution potential index[J]. J Meteor Environ, 15(3):46-47(in Chinese).
- 江琪,王飞,张恒德,等,2017. 北京市PM<sub>2.5</sub>和反应性气体浓度的变

- 化特征及其与气象条件的关系[J]. 中国环境科学, 37(3): 829-837. Jiang Q, Wang F, Zhang H D, et al, 2017. Analysis of temporal variation characteristics and meteorological conditions of reactive gas and PM<sub>2.5</sub> in Beijing[J]. China Environ Sci, 37(3): 829-837(in Chinese).
- 廖碧婷, 吴兑, 陈静, 等, 2012. 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, 28(3): 417-424. Liao B T, Wu D, Chen J, et al, 2012. A study of the variation trends of haze and application of the vertical exchange coefficient [J]. J Trop Meteor, 28(3): 417-424(in Chinese).
- 梅梅, 朱蓉, 孙朝阳, 2019. 京津冀及周边“2+26”城市秋冬季大气重污染气象条件及其气候特征研究[J]. 气候变化研究进展, 15(3): 270-281. Mei M, Zhu R, Sun C Y, 2019. Study on meteorological conditions for heavy air pollution and its climatic characteristics in “2+26” cities around Beijing-Tianjin-Hebei Region in autumn and winter[J]. Climate Change Res, 15(3): 270-281(in Chinese).
- 全国气候与气候变化标准化技术委员会, 2020. 气候资源评价 气候宜居城镇: QX/T 570-2020[S]. 北京: 气象出版社. Committee 540 on Climate and Climate Change of Standardization Administration of China, 2020. Climate resource assessment-Climate livable cities: QX/T 570-2020[S]. Beijing: China Meteorological Press(in Chinese).
- 全国气象防灾减灾标准化技术委员会, 2018. 空气污染扩散气象条件等级: QX/T 413-2018[S]. 北京: 气象出版社. Committee 345 on meteorological disaster prevention and mitigation of Standardization Administration of China, 2018. Grades of air pollution diffusion meteorological conditions: QX/T 413-2018[S]. Beijing: China Meteorological Press(in Chinese).
- 尚可, 杨晓亮, 张叶, 等, 2016. 河北省边界层气象要素与 PM<sub>2.5</sub> 关系的统计特征[J]. 环境科学研究, 29(3): 323-333. Shang K, Yang X L, Zhang Y, et al, 2016. Statistical analysis of the relationship between meteorological factors and PM<sub>2.5</sub> in the boundary layer over Hebei Province[J]. Res Environ Sci, 29(3): 323-333(in Chinese).
- 施能, 2009. 气象统计预报[M]. 北京: 气象出版社: 206-219. Shi N, 2009. Meteorological Statistical Forecast[M]. Beijing: China Meteorological Press: 206-219(in Chinese).
- 徐大海, 王郁, 朱蓉, 2016. 大气环境容量系数 A 值频率曲线拟合及其应用[J]. 中国环境科学, 36(10): 2913-2922. Xu D H, Wang Y, Zhu R, 2016. The atmospheric environmental capacity coefficient cumulative frequency curve fitting and its application[J]. China Environ Sci, 36(10): 2913-2922(in Chinese).
- 杨旭, 张小玲, 康延臻, 等, 2017. 京津冀地区冬半年空气污染天气分型研究[J]. 中国环境科学, 37(9): 3201-3209. Yang X, Zhang X L, Kang Y Z, et al, 2017. Circulation weather type classification for air pollution over the Beijing-Tianjin-Hebei Region during winter[J]. China Environ Sci, 37(9): 3201-3209(in Chinese).
- 杨元琴, 王继志, 侯青, 等, 2009. 北京夏季空气质量的气象指数预报[J]. 应用气象学报, 20(6): 649-655. Yang Y Q, Wang J Z, Hou Q, et al, 2009. A PLAM index forecast method for air quality of Beijing in summer[J]. J Appl Meteor Sci, 20(6): 649-655(in Chinese).
- 于文金, 吴雁, 黄亦露, 等, 2016. 河北省雾霾波动变化特征及成因研究[J]. 大气科学学报, 39(4): 554-561. Yu W J, Wu Y, Huang Y L, et al, 2016. The variation and genesis of haze in Hebei Province[J]. Trans Atmos Sci, 39(4): 554-561(in Chinese).
- 张恒德, 张碧辉, 吕梦瑶, 等, 2017. 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, 43(8): 998-1004. Zhang H D, Zhang B H, Lyu M Y, et al, 2017. Development and application of stable weather index of Beijing in environmental meteorology[J]. Meteor Mon, 43(8): 998-1004(in Chinese).
- 周须文, 韩世茹, 井元元, 等, 2020. 京津冀雾霾消散因子及其阈值研究[J]. 气象学报, 78(1): 154-162. Zhou X W, Han S R, Jing Y Y, et al, 2020. A study on haze dissipation factors and their thresholds over Beijing-Tianjin-Hebei Area [J]. Acta Meteor Sin, 78(1): 154-162(in Chinese).
- 朱蓉, 徐大海, 孟燕君, 等, 2001. 城市空气污染数值预报系统 CAPPS 及其应用[J]. 应用气象学报, 12(3): 267-278. Zhu R, Xu D H, Meng Y J, et al, 2001. City air pollution numerical prediction system and its application[J]. Quart J Appl Meteor, 12(3): 267-278(in Chinese).
- 朱蓉, 张存杰, 梅梅, 2018. 大气自净能力指数的气候特征与应用研究[J]. 中国环境科学, 38(10): 3601-3610. Zhu R, Zhang C J, Mei M, 2018. The climate characteristics of atmospheric self-cleaning ability index and its application in China[J]. China Environ Sci, 38(10): 3601-3610(in Chinese).
- 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[J]. Sci China Earth Sci, 57(1): 36-46.
- Friedman N, Geiger D, Goldszmidt M, 1997. Bayesian network classifier[J]. Mach Learn, 29(1): 131-163.
- Tai A P K, Mickley L J, Jacob D J, 2010. Correlations between fine particulate matter (PM<sub>2.5</sub>) and meteorological variables in the United States: implications for the sensitivity of PM<sub>2.5</sub> to climate change[J]. Atmos Environ, 44(32): 3976-3984.
- Wang J X L, Angell J K, 1999. Air stagnation climatology for the United States (1948—1998) [R]. Silver Spring, MD: National Oceanic and Atmospheric Administration.

(本文责编: 何晓欢)