

DOI: 10.19741/j.issn.1673-4831.2019.0569

宋晓辉, 杜亮亮, 李剑东, 等. 邯郸采暖期环境污染特征及空气质量预报方法研究[J]. 生态与农村环境学报, 2020, 36(8): 998-1005.

SONG Xiao-hui, DU Liang-liang, LI Jian-dong, et al. Study on Characteristics of Environmental Pollution and Methods of Air Quality Prediction During Heating Period in Handan City[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2020, 36(8): 998-1005.

## 邯郸采暖期环境污染特征及空气质量预报方法研究

宋晓辉<sup>1</sup>, 杜亮亮<sup>1</sup>, 李剑东<sup>2①</sup>, 程晓丹<sup>3</sup>, 张 珺<sup>1</sup> (1. 邯郸市气象局, 河北 邯郸 056001; 2. 中国科学院大气物理研究所, 北京 100029; 3. 河北省邯郸环境监测中心, 河北 邯郸 056000)

**摘要:** 利用河北邯郸气象和环境监测资料, 分析了邯郸采暖期空气质量和环境气象条件特征; 同时利用线性回归和 BP 神经网络统计方法对采暖期空气质量进行了预报研究。结果表明,  $PM_{10}$ 、 $PM_{2.5}$ 、 $SO_2$ 、 $NO_2$ 、 $CO(95)$  ( $CO$  日均值的第 95 百分位数) 的空气质量指数 (AQI) 在冬季最高, 夏季最低,  $O_3-8(90)$  ( $O_3$  日最大 8 h 值的第 90 百分位数) 的 AQI 则相反。邯郸采暖期首要污染物以  $PM_{2.5}$  和  $PM_{10}$  为主, 除  $O_3-8(90)$  外, 其他 5 种污染物采暖期 AQI 均高于其年均值; 同时采暖期降水少, 温度低, 小风出现频率明显高于非采暖期, 而且局地逆温强, 静稳天气指数高, 是全年环境气象条件最差的时期。邯郸采暖期的环境气象条件 1 月最差, 且夜晚差于白天, 尤其是局地 5—7 时。邯郸采暖期首要污染物浓度与前一日污染物浓度、静稳指数、逆温、相对湿度和露点温度等呈正相关, 与气温、风速、能见度和混合层高度等呈负相关。BP 神经网络模型对污染物浓度的预报效果优于线性回归模型, 可尝试应用于邯郸空气质量预报工作。

**关键词:** 邯郸; 采暖期; 空气质量; 环境气象条件; BP 神经网络

**中图分类号:** X823 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-4831(2020)08-0998-08

**Study on Characteristics of Environmental Pollution and Methods of Air Quality Prediction During Heating Period in Handan City.** SONG Xiao-hui<sup>1</sup>, DU Liang-liang<sup>1</sup>, LI Jian-dong<sup>2①</sup>, CHENG Xiao-dan<sup>3</sup>, ZHANG Jun<sup>1</sup> (1. Handan Meteorological Bureau, Handan 056001, China; 2. Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China; 3. Handan Environmental Monitoring Center of Hebei Province, Handan 056000, China)

**Abstract:** This study investigated characteristics of air quality and environmental meteorological conditions during heating period in Handan City of Hebei Province using local environmental and meteorological data, and statistically forecasted mass concentrations of six pollutants with regression and back propagation (BP) neural network methods. The results show that the air quality index (AQI) of  $PM_{2.5}$ ,  $PM_{10}$ ,  $SO_2$ ,  $CO(95)$  and  $NO_2$  are highest in winter and lowest in summer, as opposed to the  $O_3-8(90)$  AQI. During heating period, local primary pollutants are  $PM_{2.5}$  and  $PM_{10}$ , and the AQI of abovementioned pollutants are higher than the annual average except for  $O_3-8(90)$ . Compared with no-heating period, during heating period precipitation amount and surface air temperature are lower, weak wind occurs more frequently, and local inversion temperature and static stability index are obviously higher. The worst environmental conditions occur in January and the worse time is early morning, especially in 5-7 am. The mass concentrations of primary pollutants are positively correlated with their individual mass concentrations, inversion temperature, dew point temperature and mixing layer height in the previous day, but negatively correlated with air temperature, wind speed, visibility and mixed layer height. The results further show that the skill on forecast of pollutant mass concentration with the BP neural network method is better than those with the linear regression method, and the BP neural network method can be applied to the air quality prediction in Handan City.

**Key words:** Handan; heating period; air quality; environmental meteorological conditions; BP neural network

随着城市规模扩大和工业化迅速发展, 大气环境日益恶化, 城市空气污染是当前全球大气环境和城市气候研究领域的热点和难点问题之一。我国长期积累的能源结构矛盾和粗放型经济增长方式

收稿日期: 2019-07-25

基金项目: 河北省科技计划 (13275416); 国家自然科学基金 (41975109)

① 通信作者 E-mail: lijid@mail.iap.ac.cn

使经济发展与自然资源的矛盾日益突出,城市空气质量问题已成为影响社会经济发展和居民生活的重要议题<sup>[1]</sup>。京津冀地区是我国北方最大的城市群和经济核心区,也是北方大气污染最严重的区域之一,京津冀空气质量指数的年均高值中心位于河北中南部,首要污染物浓度冬季高而夏季低,天津和石家庄空气质量最差的时段均为1和12月,京津冀供暖季污染物浓度明显高于其他季节<sup>[2-3]</sup>。因此,研究京津冀地区城市采暖期的环境污染特征是近年来我国大气污染研究及治理的热点。

城市空气质量与污染物排放、地形地貌和气象条件等诸多因素有关<sup>[4-9]</sup>。气象要素是制约空气污染物稀释、扩散、迁移和转化的重要因素<sup>[7]</sup>。研究表明,北方大城市空气污染与当地风向、降水、大气稳定度等气象条件关系密切<sup>[7]</sup>;重污染天气过程多发生在静稳天气形势下,污染物主要来源为本地排放和外来输送<sup>[10-12]</sup>,而城市空气污染加重、维持、消散的过程主要取决于本地空气污染源的排放规模以及影响空气污染物汇聚与扩散的气象条件<sup>[13-16]</sup>;人为排放及不利气象条件的综合作用使得京津冀地区空气污染事件频发<sup>[17]</sup>。明确城市的空气污染特征及开展有效的空气质量预报已成为京津冀地区大气环境研究和社会经济发展的迫切需求。

当前的空气质量预报研究主要采用统计预报模式和数值预报方法,发达国家自20世纪60年代起先后建立了大气污染数值预报业务系统<sup>[18-20]</sup>。20世纪80年代起,国内直辖市和省会城市先后开展了空气污染预报方法研究,早期主要为污染潜势预报,选取表征大气扩散稀释能力的气象因子,通过组合加权计算潜势指数,对空气污染状况进行定性或半定量的判断<sup>[21-22]</sup>;随着数值模式的发展和计算机性能的提高,利用数值模式进行空气质量预报的研究越来越多,学者们采用多元线性回归和神经网络等方法,通过建立污染物浓度与气象因子间的统计预报模型,实现了污染物浓度的定量预报<sup>[23-25]</sup>。人工神经网络是具有较强非线性映射能力、自学习能力和自组织能力的技术,可通过训练获得输入和输出之间的非线性关系并解决复杂问题,近年来已成为空气质量预测领域的重要研究技术<sup>[26-28]</sup>。

近年来,京津冀特大城市(特别是北京)的污染物局地排放已得到有力控制,城市空气质量也在稳步提升<sup>[17]</sup>。然而,邯郸等具有相当人口与经济规模的区域城市空气质量问题还很严重。邯郸地处太行山脉东麓和华北平原南部,主城区常住人口近

360万,为京津冀I型大城市。邯郸属温带大陆性季风气候区,常年盛行偏西风,太行山的阻挡和背风坡气流下沉作用使得沿保定—石家庄—邯郸一线的污染物不易扩散,形成大气高污染带<sup>[14-17]</sup>。2013年以来,邯郸虽然在转型发展、结构调整方面取得了一定成效,但空气质量水平一直位于全国重点城市环境空气质量综合指数排名后10位,大气污染治理形势依然严峻。目前,邯郸这类城市的区域大气环境数值预报服务尚在起步阶段,还无法满足业务与服务需求。因此,急需探究适用于此类城市环境污染的统计预报方法,这对于京津冀地区的空气污染特征、空气质量的预报及治理具有重要的现实意义。

该研究利用邯郸环境监测数据和同期气象观测数据,对该市采暖期环境污染(包括空气质量与环境气象条件)的时间演变特征进行分析;在此基础上,采用统计方法选取影响当地空气质量的关键气象因子,重点利用BP神经网络进行邯郸采暖期空气质量的预报研究。研究结果可为京津冀区域城市大气污染和空气质量预报研究提供有价值的科学参考。

## 1 资料与方法

### 1.1 资料来源

研究所用气象资料由河北省气象信息中心提供,包括邯郸国家基本气象观测站2013—2017年的地面观测资料及同期的大气静稳指数与混合层高度等。空气质量资料由河北省邯郸环境监测中心提供,包括环保局、丛台公园、东污水处理厂和矿院4个监测站点2013—2017年的6种空气污染物数据,即SO<sub>2</sub>、NO<sub>2</sub>、PM<sub>10</sub>、PM<sub>2.5</sub>、CO(95)(CO日均值的第95百分位数)和O<sub>3</sub>-8(90)(O<sub>3</sub>日最大8h值的第90百分位数)的空气质量指数(AQI)和质量浓度(图1)。

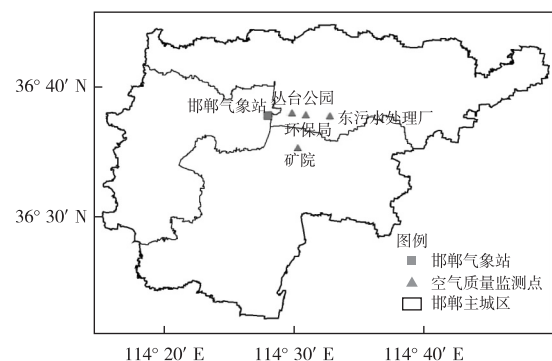


图1 邯郸市气象及空气质量监测点位置示意  
Fig. 1 Location map of meteorological and air quality monitoring sites in Handan City

2013—2016年的资料用于分析气候特征,2017年的资料用于预报研究。该研究中邯郸采暖期定义为11月15日至次年3月15日。

## 1.2 方法介绍

首先采用相关性分析筛选空气质量的预报因子,再分别利用多元线性回归和BP神经网络2种统计方法建立基于气象要素的采暖期逐日污染物浓度的预报模型,进行空气质量预报;通过与同期污染物浓度观测值及线性回归模型预报结果的比较来检验BP神经网络对邯郸市空气质量的预报效果。

### 1.2.1 预报因子的筛选

考虑到前期空气污染物的累积直接影响后期的空气污染程度,因此,选取前一日6种污染物质量浓度作为预报因子;初步选取直接或间接影响大气污染、有明确物理意义的气象因子(69个),包括邢台探空站的逆温、850和925 hPa高度、气温、露点、风速、混合层高度以及气象测站的气温、气压、湿度、风、能见度、露点和静稳指数等。在2013年1月—2017年3月的采暖期共收集邯郸市区各类污染物质量浓度有效资料478条。通过相关性分析可知,除O<sub>3</sub>-8(90)外,其他5种污染物质量浓度与前一日污染物质量浓度、静稳指数、逆温、相对湿度和露点温度等呈明显正相关,与气温、风速、能见度和混合层高度等呈负相关;O<sub>3</sub>-8(90)与其前一日质量浓度、温度、露点和混合层高度呈正相关,与其他5种污染物前一日质量浓度、静稳指数、气压和相对湿度等呈负相关;选择相关系数大的因子作为预报因子,同时考虑同一种污染物中各个因子是否类别相近,例如当08:00气温和日平均气温同时入选时,则只选择相关性最佳的因子,舍去其他同类别因子,而不同时刻的相关因子则不进行剔除。按照以上原则确定12~14个采暖期各类污染物质量浓度的预报因子。

### 1.2.2 线性回归预报方法

利用SPSS软件的多元线性回归计算功能,按照经前述相关分析确定的各类污染物影响因子对预报值的影响程度,由大到小逐个引入回归方程,采用F检验,当候选变量中最大F值的P值≤0.05时,引入相关变量;在引入的变量中,最小F值的P值≥0.1时,则剔除该变量;最终无显著因子可以引入且无不显著变量需要剔除时,建立各类空气污染物质量浓度的线性回归预报模型。

### 1.2.3 BP神经网络预报方法

大气环境受多重特征因子影响,且主要特征因

子之间的关系非常复杂,有极为显著的非线性特征,BP神经网络具有良好的非线性处理能力<sup>[29-30]</sup>,是笔者重点采用的统计方法。研究利用MATLAB数学软件的神经网络计算建立6种污染物浓度的BP神经网络预报模型。首先对经过上述线性回归方法筛选出的各类污染物的最优样本进行数据归一化处理,选出训练样本和测试样本,利用训练样本建立BP神经网络模型;使用3层网络结构和S型神经元传递函数,通过选择不同训练函数和改变隐层节点数的方法,选取最优训练样本建立BP神经网络,并挑选出最优网络模型。其中,PM<sub>2.5</sub>的神经网络结构中输入层、隐含层节、输出层的节点数分别为7、10和1,PM<sub>10</sub>为7、10和1,SO<sub>2</sub>为8、10和1。

### 1.2.4 预报结果的评估方法

通过平均绝对误差( $E_{MA}$ )、平均相对误差( $E_{MR}$ )和时间相关系数( $r$ )对2种统计预报方法所得污染物浓度进行分析评估。计算公式分别为

$$E_{MA} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |P_i - M_i|, \quad (1)$$

$$E_{MR} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|P_i - M_i|}{M_i}, \quad (2)$$

$$r(P, M) = \frac{\sum (P - \bar{P})(M - \bar{M})}{\sqrt{\sum (P - \bar{P})^2 \sum (M - \bar{M})^2}}。 \quad (3)$$

式(1)~(3)中, $n$ 为样本总数; $P$ 为日预报值; $P_i$ 为第*i*日的预报值; $\bar{P}$ 为预报平均值; $M$ 为日实况值; $M_i$ 为第*i*日的实况值; $\bar{M}$ 为实况平均值。

## 2 邯郸空气质量特征

2013—2016年邯郸主城区6种污染物AQI的时间变化特征见图2。由图2可见,PM<sub>10</sub>、SO<sub>2</sub>和PM<sub>2.5</sub>的AQI月变化趋势基本一致,均呈单谷型分布,1—5月逐渐下降,夏季为低谷,9月逐渐上升;O<sub>3</sub>-8(90)呈单峰型分布,1—5月逐渐上升,之后逐渐下降;NO<sub>2</sub>的月变化相对平缓,冬半年略高;CO(95)的月变化更为平稳。除O<sub>3</sub>-8(90)污染物之外,其他5类污染物AQI表现为冬半年高于夏半年。

从6种污染物AQI的四季变化(图2)可知,SO<sub>2</sub>冬季最高,春季次之,夏季最低;PM<sub>2.5</sub>和NO<sub>2</sub>冬季最高,秋季次之,夏季最低;PM<sub>10</sub>冬季最高,春季次之,夏季最低;CO(95)四季均较其他5种污染物略低,冬季略高;O<sub>3</sub>-8(90)夏季最高,春季次之,冬季最低。仅O<sub>3</sub>-8(90)的采暖期AQI均值低于年均值,

其他 5 种污染物采暖期 AQI 均值都高于年均值。这表明采暖期是邯郸空气质量最差的时段, 需要进一步结合当前的环境气象条件特征分析采暖期空气质量的影响因子。

### 3 邯郸采暖期环境气象条件特征

很多研究已表明水平风速较小时空气流通能力差, 不利于空气污染物水平扩散; 低层相对湿度高有利于 SO<sub>2</sub> 的吸湿增长; 逆温层抑制了空气垂直交换, 造成水汽和气溶胶在近地面层聚集; 静稳天气指数高说明环境气象条件不利于空气污染物扩散。对邯郸站 2013—2016 年间风、降水量、相对湿度和静稳天气指数等气象条件的分析可知, 邯郸环境气象扩散条件夏半年优于冬半年, 春季水平扩散能力最强, 冬季(尤其是采暖期)最差。

表 1 为 2013—2016 年采暖期、非采暖期及全年的平均气温、降水量、相对湿度、风速和小风(日平均风速 ≤ 2.0 m · s<sup>-1</sup>) 日数占比分布情况。邯郸采暖期平均气温为 2.72 °C, 低于全年均值(15.04 °C) 和非采暖期均值(21.15 °C); 采暖期平均降水量为 32.3 mm, 仅占全年平均降水量的 5.6%, 明显低于非采暖期降水量(540.1 mm); 采暖期平均相对湿度为 57.67%, 小于非采暖期(62.93%) 和全年均值(61.17%); 采暖期平均风速为 1.97 m · s<sup>-1</sup>, 与非采暖期(2.08 m · s<sup>-1</sup>) 和全年均值(2.05 m · s<sup>-1</sup>) 较为接近; 在研究时段内, 采暖期的小风日数总计为 357 d, 非采暖期为 516 d, 总计 873 d, 占比分别为 73.6%、52.9% 和 59.8%。

表 2 为 2013—2016 年邯郸平均逆温和静稳天气指数。从第 1 层逆温(邢台高空站 08:00 探测资料)来看, 采暖期第 1 层逆温的平均底高为 380.6 m, 低于非采暖期(469.0 m) 和全年均值(434.7 m); 平均顶高为 624.7 m, 较非采暖期(688.3 m) 和

全年均值(663.9 m)略低; 平均逆温层厚度为 244.1 m, 高于非采暖期(217.0 m) 和全年均值(227.9 m); 采暖期第 1 层逆温的平均逆温差最大(4.1 °C), 平均逆温强度最强[2.7 °C · (100 m)<sup>-1</sup>]; 采暖期的平均静稳天气指数为 10.8, 高于非采暖期平均(9.0) 和全年均值(9.6)。

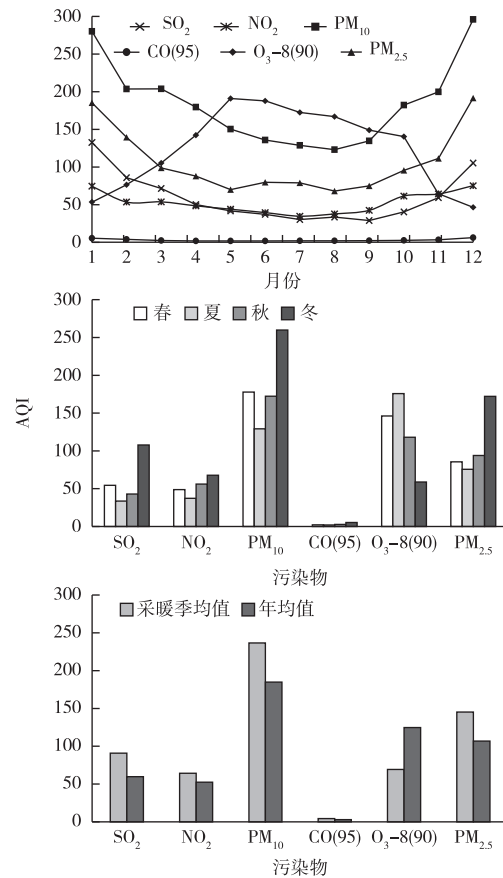


图 2 2013—2016 年邯郸 6 种污染物空气质量指数 (AQI) 的月变化、季节变化、年均值及采暖期均值变化

Fig. 2 Monthly, seasonal, annual, and heating-period mean AQI of six pollutants in Handan City during 2013–2016

表 1 2013—2016 年邯郸采暖期、非采暖期和全年环境气象条件的比较

Table 1 Meteorological conditions during heating, non-heating and annual periods in Handan City during 2013–2016

时间	平均气温/ °C	平均降水量/ mm	平均相对湿度/ %	平均风速/ (m · s <sup>-1</sup> )	小风 <sup>1)</sup> 日数占比/ %
采暖期	2.72	32.3	57.7	1.97	73.6
非采暖期	21.15	540.1	62.9	2.08	52.9
全年	15.04	572.4	61.2	2.05	59.8

1) 风速 ≤ 2.0 m · s<sup>-1</sup>。

邯郸采暖期气象条件的逐月变化见图 3。月平均气温由低到高依次为 1、12、2、11 和 3 月; 平均本站气压由低到高依次为 3、11、2、12 和 1 月; 平均相

对湿度由低到高依次为 3、2、1、12 和 11 月; 平均风速 1、11 和 12 月均为 1.9 m · s<sup>-1</sup>, 2 月略高, 3 月最大。从采暖期气象要素的日变化情况来看, 平均气

温自 0 时开始逐渐下降,7 时最低,之后逐渐上升,15 时达最高,后逐渐下降;平均相对湿度自 0 时缓慢上升,7 时最高,之后下降,15 时达最低,随后逐渐

上升;平均风速 0—8 时维持在低值,之后上升,14—15 时达峰值,随后逐渐下降。

表 2 2013—2016 年邯郸采暖期、非采暖期、全年平均逆温和静稳天气指数

Table 2 Mean inversion temperature and static steady weather index during heating, non-heating and annual periods in Handan City during 2013—2016

时间	逆温层底高/ m	逆温层顶高/ m	逆温层厚度/ m	逆温差/ ℃	逆温强度/ [℃ · (100 m) <sup>-1</sup> ]	静稳天气 指数
采暖期	380.6	624.7	244.1	4.1	2.7	10.8
非采暖期	469.0	688.3	217.0	3.0	1.9	9.0
全年	434.7	663.9	227.9	3.4	2.2	9.6

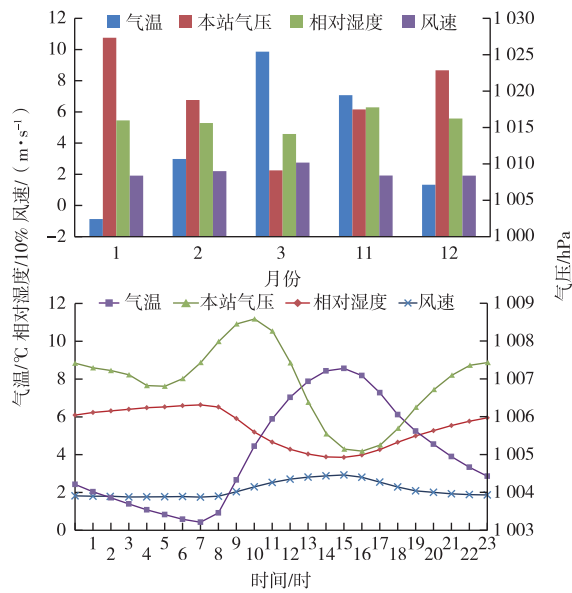


图 3 2013—2016 年邯郸采暖期环境气象条件月变化和日变化

Fig. 3 Monthly and diurnal variation of environmental meteorological conditions during heating period in Handan City during 2013—2016

上述分析表明,邯郸采暖期降水少,温度低,湿度和风速小,而且小风出现频率明显高于非采暖期。采暖期局地逆温强,静稳天气指数高,为邯郸全年环境气象条件最差的时期。在采暖期内,1 月环境气象条件最差,12 月次之,且环境气象条件白天好于夜间,尤以 5—7 时最差。

### 4 空气质量的 BP 神经网络统计预报

#### 4.1 统计预报结果

邯郸采暖期的首要空气污染物为 PM<sub>10</sub>、PM<sub>2.5</sub> 和 SO<sub>2</sub><sup>[13]</sup>。基于 2 种统计预报方法获得 2017 年 1 月 1 日—3 月 15 日这 3 种污染物质量浓度预报值与实测值的时间序列(图 4)。

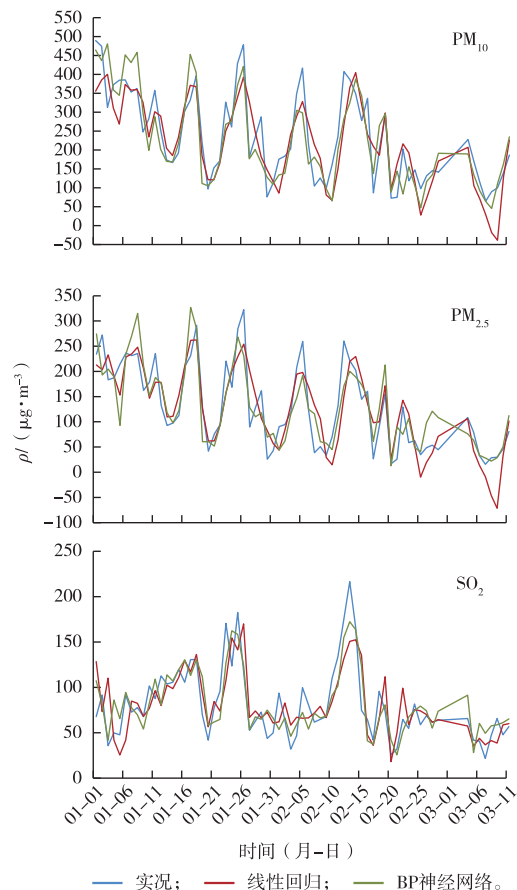


图 4 2017 年采暖期污染物质量浓度的逐日观测值与预报值对比

Fig. 4 Daily variation of observed mass concentrations of PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>, SO<sub>2</sub> and the counterparts predicted by linear regression and BP neural network models in 2017

对 2 种方法的 PM<sub>10</sub> 预报值与观测值进行对比,3 条曲线的变化趋势大体相同。1 月 1—10 日和 2 月 9—14 日,2 种方法的预报值波动滞后于观测值;1 月 1—8 日 BP 模型预报值较实况值偏高,线性回归预报值则偏低;1 月 11—26 日预报值的波动与观测值一致,其中 1 月 9—16 日 BP 模型的预报值略

低于线性回归预报值,但均较接近观测值;1月18—27日BP模型预报值及波动更接近观测值;1月30日—2月14日2种方法的预报值波动滞后于观测值;2月15日—3月11日BP模型预报值的拟合效果优于线性回归。在67个有效数据中,43个BP模型预报值更接近实况,占比为64%;线性回归和BP模型预报值的平均绝对误差分别为64.69和51.96  $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ ,与观测时间序列的相关系数分别为0.78和0.87。

2种方法的PM<sub>2.5</sub>预报值与观测值对比,3条曲线的变化趋势虽基本相同,但BP模型预报值的波动更接近观测值,真实性好于线性预报模型。在67个有效数据中,41个BP模型预报值较线性预报值更接近实况,占比为61%;线性回归和BP模型预报值的平均绝对误差分别为45.05和37.81  $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ ,与观测时间序列的相关系数分别为0.81和0.89。

2种方法的SO<sub>2</sub>预报值与观测值对比,3条曲线的变化趋势基本相同,BP模型的预报值波动更接近观测值,真实性好于线性预报模型。在67个有效数据中,35个BP模型预报值与观测值的差值小于线性回归模型预报值与观测值的差值,占比为52%。线性回归和BP模型预报值的平均绝对误差分别为23.84和20.28  $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ ,与观测时间序列的相关系数分别为0.83和0.86。

#### 4.2 统计预报结果的对比检验

表3为2种方法预报的6种污染物质量浓度的平均绝对误差、相对误差以及2种方法预报值与同期观测值的相关系数。6种污染物浓度线性回归预报值的平均相对误差为0.11~0.43。其中,NO<sub>2</sub>的平均相对误差最小,SO<sub>2</sub>次之,PM<sub>2.5</sub>平均相对误差最大,为0.43。线性回归预报值与实况值的相关系数为0.72~0.83。

BP神经网络模型预报的6种污染物质量浓度的平均相对误差为0.09~0.36;其中NO<sub>2</sub>的平均相对误差最小,PM<sub>10</sub>和SO<sub>2</sub>次之,O<sub>3</sub>-8(90)平均相对误差最大。BP神经网络模型预报值与实况值的相关系数为0.72~0.89。这说明BP神经网络对6种污染物浓度的预报误差均低于线性回归。2种方法预报值与实况值的相关系数相比,除O<sub>3</sub>-8(90)基本一致外,BP神经网络模型污染物浓度预报值与实况值的相关系数均高于线性回归模型,说明BP神经网络的预报效果优于线性回归模型。

BP神经网络对各类污染物质量浓度的预报误差明显低于线性回归模型。与线性回归模型相比,BP神经网络对于PM<sub>10</sub>预报值的平均绝对误差和相

对误差分别减少19.8%和27.8%;PM<sub>2.5</sub>预报值的平均绝对误差和相对误差分别减少16.1%和25.6%;SO<sub>2</sub>预报值的平均绝对误差和相对误差分别减少14.9%和18.8%。

表3 BP神经网络和线性回归模型的预报误差及其与实况值的相关系数

Table 3 Prediction error and correlation coefficients between observed pollutant mass concentrations and the counterparts predicted by linear regression and BP neural network models

污染物	绝对误差/ ( $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ )		相对误差		相关系数	
	BP神经网络	线性回归	BP神经网络	线性回归	BP神经网络	线性回归
SO <sub>2</sub>	20.28	23.84	0.26	0.32	0.86	0.83
NO <sub>2</sub>	12.55	13.40	0.09	0.11	0.80	0.76
PM <sub>10</sub>	51.96	64.69	0.26	0.36	0.87	0.78
PM <sub>2.5</sub>	37.81	45.05	0.32	0.43	0.89	0.81
CO(95)	660.00	760.00	0.31	0.39	0.83	0.77
O <sub>3</sub> -8(90)	12.86	13.95	0.36	0.39	0.72	0.72

以上分析表明,BP神经网络模型能够很好地描述污染物质量浓度与其影响因子之间的非线性关系,预报精度高于线性回归模型。在邯郸采暖期空气质量预报中,BP神经网络的预报效果较线性回归模型明显提高,应用于空气质量预报是可行且有效的。

## 5 结论

该研究分析了邯郸环境污染特征(空气质量和环境气象条件),重点采用BP神经网络模型对邯郸采暖期6种空气污染物质量浓度进行了预报研究,并利用同期观测值及线性回归模型对预报结果进行了检验。

(1)邯郸空气污染物PM<sub>10</sub>、PM<sub>2.5</sub>、SO<sub>2</sub>、NO<sub>2</sub>和CO(95)的AQI均呈单谷型分布,冬季最高,夏季最低,AQI均值表现为冬半年高于夏半年,O<sub>3</sub>-8(90)的AQI变化趋势则相反;除O<sub>3</sub>-8(90)外,其他5种污染物的采暖期AQI均高于年均值,空气污染最重,首要污染物以PM<sub>2.5</sub>和PM<sub>10</sub>为主。

(2)邯郸采暖期降水少,温度低,湿度和风速小,而且小风出现频率明显高于非采暖期,局地逆温强,静稳天气指数高,为全年环境气象条件最差的时期。在邯郸采暖期内,1月环境气象条件最差,12月次之,且环境气象条件白天好于夜间,尤以5—7时最差。

(3)邯郸采暖期主要污染物质量浓度与前一日

污染物浓度、静稳天气指数、逆温、相对湿度和露点温度等呈正相关,与气温、风速、能见度和混合层高度等呈负相关。BP 神经网络对 6 种污染物的预报值与实况值的相关系数均高于线性回归模型,平均相对误差和平均绝对误差均较线性回归模型明显降低,且采暖期主要污染物  $PM_{10}$ 、 $PM_{2.5}$  和  $SO_2$  的预报误差更低,预报效果明显优于线性回归模型。

由于数据来源的限制,该研究采用的邯郸空气质量资料时长较短,所以结论有一定的局限性。后续工作需要采用更长时间序列的空气质量 and 环境气象资料来优化统计预报模型,同时结合环境数值预报结果,进一步提高邯郸市的空气质量预报精度和时效。

#### 参考文献:

- [1] 张小曳,孙俊英,王亚强,等.2013 我国雾霾成因及其治理的思考[J].科学通报,58(13):1178-1187.[ZHANG X Y, SUN J Y, WANG Y Q, *et al.* Factors Contributing to Haze and Fog in China [J]. Chinese Science Bulletin, 2013, 58(13): 1178-1187.]
- [2] 孟晓艳,张霞,侯玉婧,等.2013—2017 年京津冀区域  $PM_{2.5}$  浓度变化特征[J].中国环境监测,2018,34(5):5-11.
- [3] 周兆媛,张时煌,高庆先,等.京津冀地区气象要素对空气质量的影响及未来变化趋势分析[J].资源科学,2014,36(1):191-199.[ZHOU Zhao-yuan, ZHANG Shi-huang, GAO Qing-xian, *et al.* The Impact of Meteorological Factors on Air Quality in the Beijing-Tianjin-Hebei Region and Trend Analysis [J]. Resources Science, 2014, 36(1): 191-199.]
- [4] 贾梦唯,赵天良,张祥志,等.南京主要大气污染物季节变化及相关气象分析[J].中国环境科学,2016,36(9):2567-2577.[JIA Meng-wei, ZHAO Tian-liang, ZHANG Xiang-zhi, *et al.* Seasonal Variations in Major Air Pollutants in Nanjing and Their Meteorological Correlation Analyses [J]. China Environmental Science, 2016, 36(9): 2567-2577.]
- [5] 康恒元,刘玉莲,李涛.黑龙江省重点城市 AQI 指数特征及其与气象要素之关系[J].自然资源学报,2017,32(4):692-703.[KANG Heng-yuan, LIU Yu-lian, LI Tao. Characteristics of Air Quality Index and Its Relationship With Meteorological Factors in Key Cities of Heilongjiang Province [J]. Journal of Natural Resources, 2017, 32(4): 692-703.]
- [6] AN Z S, HUANG R J, ZHANG R Y, *et al.* Severe Haze in Northern China: A Synergy of Anthropogenic Emissions and Atmospheric Processes [J]. PNAS, 2019, 116(18): 8657-8666.
- [7] 李小飞,张明军,王圣杰,等.中国空气污染指数变化特征及影响因素分析[J].环境科学,2012,33(6):1936-1943.[LI Xiao-fei, ZHANG Ming-jun, WANG Sheng-jie, *et al.* Variation Characteristics and Influencing Factors of Air Pollution Index in China [J]. Chinese Journal of Environmental Science, 2012, 33(6): 1936-1943.]
- [8] 吴国雄,李占清,符涛斌,等.气溶胶与东亚季风相互影响的研究进展[J].中国科学:地球科学,2015,45:1609-1627.[WU G X, LI Z Q, FU Z B, *et al.* Advances in Studying Interactions Between Aerosols and Monsoon in China [J]. Science China: Earth Sciences, 2015, 45: 1609-1627.]
- [9] 王祎岷,王真祥.上海市  $PM_{2.5}$  浓度变化特征及其气象因子分析[J].干旱区地理,2018,41(5):1088-1096.[WANG Yi-di, WANG Zhen-xiang. Characteristics of  $PM_{2.5}$  Concentration Variability and Its Meteorological Factors in Shanghai [J]. Arid Land Geography, 2018, 41(5): 1088-1096.]
- [10] 陈静,铃伟妙,韩军彩,等.石家庄市秋冬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.[CHEN Jing, QIAN Wei-miao, HAN Jun-cai, *et al.* Pollution Characteristic Under Typical Weather Background in Autumn Over Shijiazhuang [J]. Journal of Meteorology and Environment, 2015, 31(4): 42-50.]
- [11] 汪宇,王志春,嵇萍,等.珠三角区域空气质量空间分布类型和天气背景[J].环境工程,2017,35(12):77-81.[WANG Yu, WANG Zhi-chun, JI Ping, *et al.* Spatial Distribution Types and Weather Background of Air Quality in the Pearl River Delta Area [J]. Environmental Engineering, 2017, 35(12): 77-81.]
- [12] 刘娜,段晚锁,王自发,等.北京地区一次空气重污染过程的目标观测分析[J].气候与环境研究,2018,23(5):619-632.[LIU Na, DUAN Wan-suo, WANG Zi-fa, *et al.* A Study on Target Observation of a Heavy Air Pollution Event in Beijing [J]. Climatic and Environmental Research, 2018, 23(5): 619-632.]
- [13] 高正旭,王晓玲,向华,等.武汉市 2014—2017 年大气污染物分布特征及其潜在来源分析[J].环境科学学报,2018,38(11):4440-4453.[GAO Z X, WANG X L, XIANG H, *et al.* Variation Characteristics and Potential Sources of Air Pollutants During 2014-2017 in Wuhan [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2018, 38(11): 4440-4453.]
- [14] 宋晓辉,田秀霞,张珺,等.邯郸一次重污染天气过程分析[J].环境科学与技术,2016,39(增刊2):19-22.[SONG Xiao-hui, TIAN Xiu-xia, ZHANG Jun, *et al.* Analysis About a Process of Heavy Pollution Weather in Handan [J]. Environmental Science & Technology, 2016, 39(Suppl. 2): 19-22.]
- [15] 杜昊鹏,房小怡,孟伟,等.气象因子对北京一次重污染天气过程影响研究[J].环境科学与技术,2016,39(8):123-128, 153.[DU Wu-peng, FANG Xiao-yi, MENG Wei, *et al.* Impact Analysis of Meteorological Factors on Atmospheric Environment in a Typical Serious Pollution Process in Beijing [J]. Environmental Science and Technology, 2016, 39(8): 123-128, 153.]
- [16] ZHANG Z Y, GONG D Y, MAO R, *et al.* Cause and Predictability for the Severe Haze Pollution in Downtown Beijing in November-December 2015 [J]. Science of the Total Environment, 2017, 592: 627-638.
- [17] 缪育聪,郑亦佳,王姝,等.京津冀地区霾成因机制研究进展与展望[J].气候与环境研究,2015,20(3):356-368.[MIAO Yu-cong, ZHENG Yi-jia, WANG Shu, *et al.* Recent Advances in, and Future Prospects of, Research on Haze Formation Over Beijing-Tianjin-Hebei, China [J]. Climatic and Environmental Research, 2015, 20(3): 356-368.]
- [18] DRAXLER R R, HESS G D. An Overview of the HYPLIT\_4 Modelling System for Trajectories, Dispersion and Deposition [J]. Australian Meteorological Magazine, 1998, 47(4): 295-308.

- [19] 房小怡, 蒋维楣, 吴润, 等. 城市空气质量数值预报模式系统及其应用[J]. 环境科学学报, 2004, 24(1): 111-115. [FANG Xiao-yi, JIANG Wei-mei, WU Jian, *et al.* Study on the Development of Numerical Model System to Predict Urban Air Quality[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2004, 24(1): 111-115.]
- [20] 王宏, 郑秋萍, 陈彬彬, 等. 福建省环境气象学科发展研究报告[J]. 海峡科学, 2017(8): 17-22.
- [21] 龚强, 白乐生, 杨洪斌. 空气污染潜势指数预报方法[J]. 气象与环境学报, 1999, 15(3): 46-47. [GONG Qiang, BAI Le-sheng, YANG Hong-bin. Forecast Method of Air Pollution Potential Index[J]. Journal of Meteorology and Environment, 1999, 15(3): 46-47.]
- [22] 徐大海, 朱蓉. 大气平流扩散的箱格预报模型与污染潜势指数预报[J]. 应用气象学报, 2000, 11(1): 1-12. [XU Da-hai, ZHU Rong. Atmospheric Advective and Dispersion Nonstatic Box-Model for Prediction of the Potential Index of Airborne Pollutant[J]. Quarterly Journal of Applied Meteorology, 2000, 11(1): 1-12.]
- [23] 陈宁, 毛善君, 李德龙, 等. 多基站协同训练神经网络的 PM<sub>2.5</sub> 预测模型[J]. 测绘科学, 2018, 43(7): 87-93. [CHEN Ning, MAO Shan-jun, LI De-long, *et al.* PM<sub>2.5</sub> Prediction Model Based on Multi-Station Co-Training Neural Network[J]. Science of Surveying and Mapping, 2018, 43(7): 87-93.]
- [24] QI Y L, LI Q, KARIMIAN H, *et al.* A Hybrid Model for Spatio-Temporal Forecasting of PM<sub>2.5</sub> Based on Graph Convolutional Neural Network and Long Short-Term Memory[J]. Science of the Total Environment, 2019, 664: 1-10.
- [25] 孙宝磊, 孙磊, 张朝能, 等. 基于 BP 神经网络的大气污染物浓度预测[J]. 环境科学学报, 2017, 37(5): 1864-1871. [SUN Bao-lei, SUN Hao, ZHANG Chao-neng, *et al.* Forecast of Air Pollutant Concentrations by BP Neural Network[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2017, 37(5): 1864-1871.]
- [26] 白鹤鸣, 沈润平, 师华定, 等. 基于 BP 神经网络的空气污染指数预测模型研究[J]. 环境科学与技术, 2013, 36(3): 186-189. [BAI He-ming, SHEN, SHI Hua-ding, *et al.* Forecasting Model of Air Pollution Index Based on BP Neural Network[J]. Environmental Science and Technology, 2013, 36(3): 186-189.]
- [27] 胡非, 洪钟祥, 雷孝恩. 大气边界层和大气环境研究进展[J]. 大气科学, 2003, 27(4): 712-728. [HU Fei, HONG Zhong-xiang, LEI Xiao-en. Recent Progress of Atmospheric Boundary Layer Physics and Atmospheric Environment Research in IAP[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2003, 27(4): 712-728.]
- [28] 王自发, 谢付莹, 王喜全, 等. 嵌套网格空气质量预报模式系统的发展与应用[J]. 大气科学, 2006, 30(5): 778-790. [WANG Zi-fa, XIE Fu-ying, WANG Xi-quan, *et al.* Development and Application of Nested Air Quality Prediction Modeling System[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2006, 30(5): 778-790.]
- [29] 康志明, 桂海林, 花丛, 等. 国家级环境气象业务现状及发展趋势[J]. 气象科技进展, 2016, 6(2): 64-69. [KANG Zhi-ming, GUI Hai-lin, HUA Cong, *et al.* China's National Environmental Meteorological Services and Their Developmental Trend[J]. Advances in Meteorological Science and Technology, 2016, 6(2): 64-69.]
- [30] 张恒德, 张庭玉, 李涛, 等. 基于 BP 神经网络的污染物浓度多模式集成预报[J]. 中国环境科学, 2018, 38(4): 1243-1256. [ZHANG Heng-de, ZHANG Ting-yu, LI Tao, *et al.* Forecast of Air Quality Pollutants' Concentrations Based on BP Neural Network Multi-Model Ensemble Method[J]. China Environmental Science, 2018, 38(4): 1243-1256.]

作者简介: 宋晓辉(1968—), 女, 河北永年人, 高级工程师, 主要研究方向为农业与环境气象预报预警。E-mail: sxh.hd@163.com

(责任编辑: 许素)