

江苏北部地区冬季 PM_{2.5} 污染天气形势分型研究*

史俊南^{1,2} 陆岳¹ 赵天良^{1#} 龚山陵² 张磊²

(1.南京信息工程大学气象灾害预报预警与评估协同创新中心,

中国气象局气溶胶与云降水重点实验室,江苏 南京 210044;

2.中国气象科学研究院,中国气象局大气化学重点开放实验室,北京 100081)

摘要 利用2015—2019年冬季ERA5再分析资料,采用主成分分析(PCA)与K均值聚类的客观分型方法对江苏北部冬季海平面气压场进行天气形势分型,结合同期大气污染物浓度资料、地面站点气象数据,分析江苏北部地区不同天气形势下PM_{2.5}污染特征,并通过地面气象要素与污染物浓度的相关性进一步探究天气形势对PM_{2.5}污染的影响。结果表明:江苏北部冬季海平面气压场可分为7种天气类型,其中良好的空气质量主要出现在冷锋前部型、高压底部型和高压环流型3种与冷高压密切相关的天气形势中,地面气象要素表现为低温、低湿与大风,有利于PM_{2.5}的扩散稀释,属于清洁型天气;在弱低压环流型、低压均压场型与高压均压场型中,PM_{2.5}污染水平较高,地面风速较低,相对湿度较高,有利于污染物的积聚与生成,属于污染型天气。

关键词 江苏北部 客观分型 PM_{2.5} 污染 主成分分析 K均值聚类

DOI:10.15985/j.cnki.1001-3865.2021.07.011

Study on synoptic classification for wintertime PM_{2.5} pollution in Northern Jiangsu SHI Junnan^{1,2}, LU Yue¹, ZHAO Tianliang¹, GONG Shanling², ZHANG Lei². (1. Key Laboratory for Aerosol-Cloud-Precipitation of China Meteorological Administration, Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing Jiangsu 210044; 2. Key Laboratory of Atmospheric Chemistry of CMA, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081)

Abstract: By using objective classification methods of principal component analysis and K-means clustering, the wintertime synoptic patterns of Northern Jiangsu were identified based on the sea surface pressure fields from ERA5 reanalysis data of meteorology over 2015-2019. Air pollution and meteorological data were also used to characterize PM_{2.5} pollution changes, and to further explore the influence of meteorological parameters of different synoptic patterns on PM_{2.5} pollution by calculating correlation coefficients of PM_{2.5} concentrations and meteorology. The results showed that there were mainly 7 synoptic patterns, from which the front of cold front, bottom of high pressure, high pressure circulation with low temperature, low relative humidity and high wind speed benefited air pollutant dispersion. These three synoptic patterns, belonged to clean air meteorological conditions, were related to cold high systems. In the types of low-pressure circulation, uniform low pressure, uniform high pressure, which with low wind speed, high relative humidity, were favorable for PM_{2.5} pollutant accumulations and formations. The PM_{2.5} pollution level was relatively high in these three synoptic patterns, and they belonged to the meteorological conditions.

Keywords: Northern Jiangsu; objective classification; PM_{2.5} pollution; principal component analysis; K-means clustering

大气污染不仅受当地污染源排放的影响,也与气象条件变化紧密相关。当区域污染排放源固定时,气象条件是导致空气质量变化的关键因素^[1-4]。局地气象条件主要受大尺度环流形势,即天气形势的影响和制约。因此,研究天气形势对于大气污染变化的影响具有重要的科学意义。

天气形势分型是研究大气环流对于污染物浓度

影响关系的重要手段。大气污染天气形势分型主要是针对海平面气压、不同层次上的位势高度场、风场等要素的主观^[5,133,6]或客观分型^[7-10]。主观分型受预报员的主观判断影响,具有一定的局限性;客观分型是通过物理量矩阵的计算实现样本集合的聚类分类,分型结果更为稳定、客观。许建明等^[11]采用T-mode主成分分析法(PCA)研究上海地区PM_{2.5}污

第一作者:史俊南,男,1995年生,硕士研究生,研究方向为大气物理与大气环境。*通讯作者。

*国家重点研发计划项目(No.2016YFC0203304);国家自然科学基金培育项目(No.91744209);连云港市气象局自立课题(No.LG201705)。

染时将天气形势分为 9 类,指出冷锋、高压前部弱气压场,高压后部弱气压场对上海秋冬季 PM_{2.5} 环境质量影响最为显著;ZHANG 等^[12]利用 Kirchhofer 方法对华北地区 850 hPa 高度场的天气形势进行客观分型,发现静稳的天气形势有利于污染物的积聚,同时偏西和偏南风会形成较强的污染传输,加重华东北部与北部的大气污染;DENG 等^[13]研究厦门地区黑碳时空变化时对天气形势进行半主观(主观+客观)分型,结果显示,高浓度黑碳往往与高压控制的反气旋环流有关。这些研究均揭示了天气形势与区域污染物浓度存在十分密切的关系。

江苏北部城市群——徐州、连云港、淮安、宿迁(以下简称“苏北四市”)位于长三角空气重污染区北部。苏北四市首要污染物均为 PM_{2.5},并且 PM_{2.5} 浓度季节变化表现为“冬高夏低”^[14-17]。目前,关于该地区大气污染与天气形势关系的案例研究较多,但缺乏基于大样本数据的天气形势客观分型研究。因此,本研究以苏北四市为研究对象,利用 PCA 与 K 均值聚类的客观分型方法对 2015—2019 年污染多发的冬季海平面气压场进行分型,分析不同天气形势下气象要素特征和 PM_{2.5} 浓度变化,旨在完善中国东部沿海地区气象场与污染浓度关系的研究,有助于该地区开展大气污染预测工作。

1 资料与方法

1.1 数据资料

再分析资料为欧洲中期数值预报中心(ECM-WF)2015—2019 年的 ERA5 海平面气压场数据,采集空间 20°N~50°N、100°E~130°E,空间分辨率为 0.25°×0.25°;气象资料为 2015—2019 年 Micaps 第一类地面全要素数据,数据来自中国气象数据网(<http://data.cma.cn>),选取的气象要素分别为温度、相对湿度、风速、风向,时间分辨率为 3 h;大气污染物浓度资料来自于中国空气质量历史数据网站(<http://beijingair.sinaapp.com/>) 2015—2019 年的 PM_{2.5} 逐时质量浓度数据。

1.2 分型方法

首先处理再分析资料的海平面格点数据,将每日 8:00 海平面气压场的二维数据(纬度×经度)转

换为一维数组(格点),根据时间序列构成二维矩阵(时间×格点);通过 PCA 在矩阵数据中提取 4 个主成分,累计方差贡献率达到 84.5%;对主成分数据进行 K 均值聚类,依据轮廓系数的极大值判定当聚类数为 7 时聚类效果最好,因此将海平面环流天气形势分为 7 类。

1.3 PM_{2.5} 污染等级定义

根据《环境空气质量指数(AQI)技术规范(试行)》(HJ 633—2012)^[18],将地面 PM_{2.5} 浓度划分为 6 个等级,划分标准见表 1。

2 结果与分析

2.1 天气形势分型

根据 2015—2019 年冬季(12 月至次年 2 月)每日 8:00 的海平面气压场数据(共 451 个样本),结合 PCA 与 K 均值聚类的客观分型方法将天气形势分为 7 类,不同天气形势下的海平面气压场见图 1。

类型 1 为冷锋前部型,出现概率为 5.5%。在该天气形势下,苏北四市处于冷锋前部,在内蒙古附近存在一个冷高压中心,高压中心最大值为 1 049.6 hPa,气压梯度大,苏北地区地面平均风速 2.3 m/s,风向以偏北风、偏西北风为主,相对湿度(54.9%)明显低于其他几种天气形势,平均温度最低(-1.6℃)。

类型 2 为弱高压环流型,出现概率为 17.5%。该天气形势在西伯利亚存在一个高压中心,强度弱于类型 1,苏北四市处于较弱的高压环流之下,气压梯度小,平均风速为 2.4 m/s,风向以偏东风为主,无明显冷空气过程或冷空气较弱,相对湿度(75.9%)为 7 种天气形势中最高,平均温度 4.3℃。

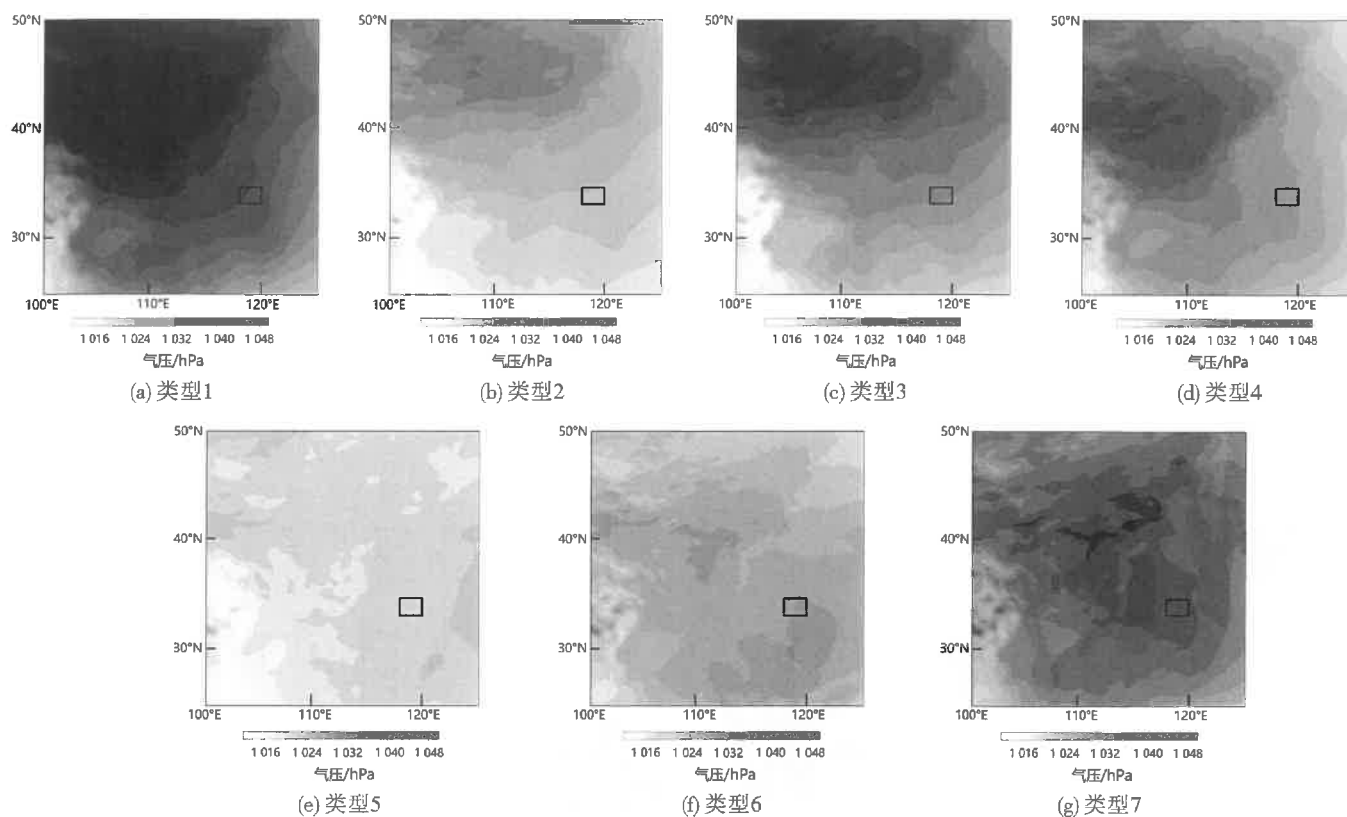
类型 3 为高压底部型,出现概率为 13.7%。该天气形势在西伯利亚地区存在一个冷高压中心,强度介于类型 1 与类型 2 之间,苏北四市处于较强的气压梯度之下,地面风速最大,平均风速 2.6 m/s,主导风向为北东北风,相对湿度 73.0%,平均温度 1.2℃。

类型 4 为高压前部型,出现概率为 14.0%。在该天气形势下,苏北四市处于内蒙古高压弱环流的东侧,气压梯度较弱,地面主导风向以偏西北风为主,相对湿度(60.1%)较低,仅高于类型 1。

表 1 PM_{2.5} 污染等级划分标准

Table 1 Standard for classification of PM_{2.5} pollution levels

项目	I	II	III	IV	V	VI
空气质量	优	良	轻度污染	中度污染	重度污染	严重污染
日均质量浓度/($\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$)	≤ 35	$>35 \sim 75$	$>75 \sim 115$	$>115 \sim 150$	$>150 \sim 250$	>250



注:图中黑色方框为苏北四市所在区域。

图1 2015—2019年研究区冬季海平面气压场天气形势分型

Fig.1 Synoptic patterns of sea level pressure in study area during winter from 2015 to 2019

类型5为低压均压场型,出现概率为13.3%。在该天气形势下,华北华中均受低压均压场控制,苏北四市气压(1 019~1 022 hPa)低于其他形势场,地面平均风速(2.1 m/s)较前几种分型小,风向以偏东风为主,相对湿度(74.4%)仅次于类型2,平均温度(6.1℃)为所有天气形势中最高。

类型6为高压均压场型,出现概率为19.7%。在该天气形势下,江浙地区存在小范围的弱高压中心,地面风速小,平均风速1.7 m/s,主导风向为偏南风以及偏东风,相对湿度平均值为66.8%。

类型7为高压环流型,出现概率为16.2%。在该天气形势下,中国北部大部分城市在冷高压控制之下,苏北四市位于高压区域的底端,地面风速最小,均值为1.6 m/s,无明显的主导风向,平均相对湿度61.0%,平均温度1.3℃。

2.2 天气形势与PM_{2.5}污染关系

图2为7种天气形势下苏北四市PM_{2.5}日均质量浓度的统计箱线图。在不同天气形势下苏北四市污染物浓度变化特征基本相似,总体看来,在类型2、5、6下PM_{2.5}日均浓度平均值相对较高,其中连云港、宿迁在类型6下PM_{2.5}日均质量浓度平均值最高,分别为75.1、98.1 μg/m³;徐州、淮安在类型5下

PM_{2.5}日均质量浓度平均值最高,分别为119.9、91.4 μg/m³。在类型1、3、7下,PM_{2.5}日均浓度平均值都相对较低,除徐州在类型3、7下外,其他城市在这3种天气形势下的PM_{2.5}日均质量浓度平均值均未超过75 μg/m³。

表2为各天气形势下不同PM_{2.5}污染等级出现的频率。总体看来,在类型2、5、6下,苏北四市发生轻度及以上污染的频率最高,除了临海的连云港外,其他3个城市发生轻度及以上污染的频率都达到55%以上;在类型1、3中,苏北四市发生轻度及以上污染的频率都要低于其他几种天气形势,除了整体污染水平相对较高的徐州,其他3个城市发生轻度及以上污染的频率均不超过40%。

为进一步说明天气形势对PM_{2.5}的影响,计算了苏北四市不同天气形势下污染物浓度与全部样本均值的距平。距平为正,说明该天气形势有利于PM_{2.5}浓度增加,污染加重;距平为负,表明该天气形势下有利于PM_{2.5}浓度减小,污染减轻。由表3可知,在类型2、5、6下,苏北四市PM_{2.5}日均质量浓度距平都为正,其中类型5、6最为明显,其中距平最大值出现在徐州类型5下,为21.1 μg/m³。在类型1、3、7下,苏北四市PM_{2.5}日均质量浓度距平都为负。

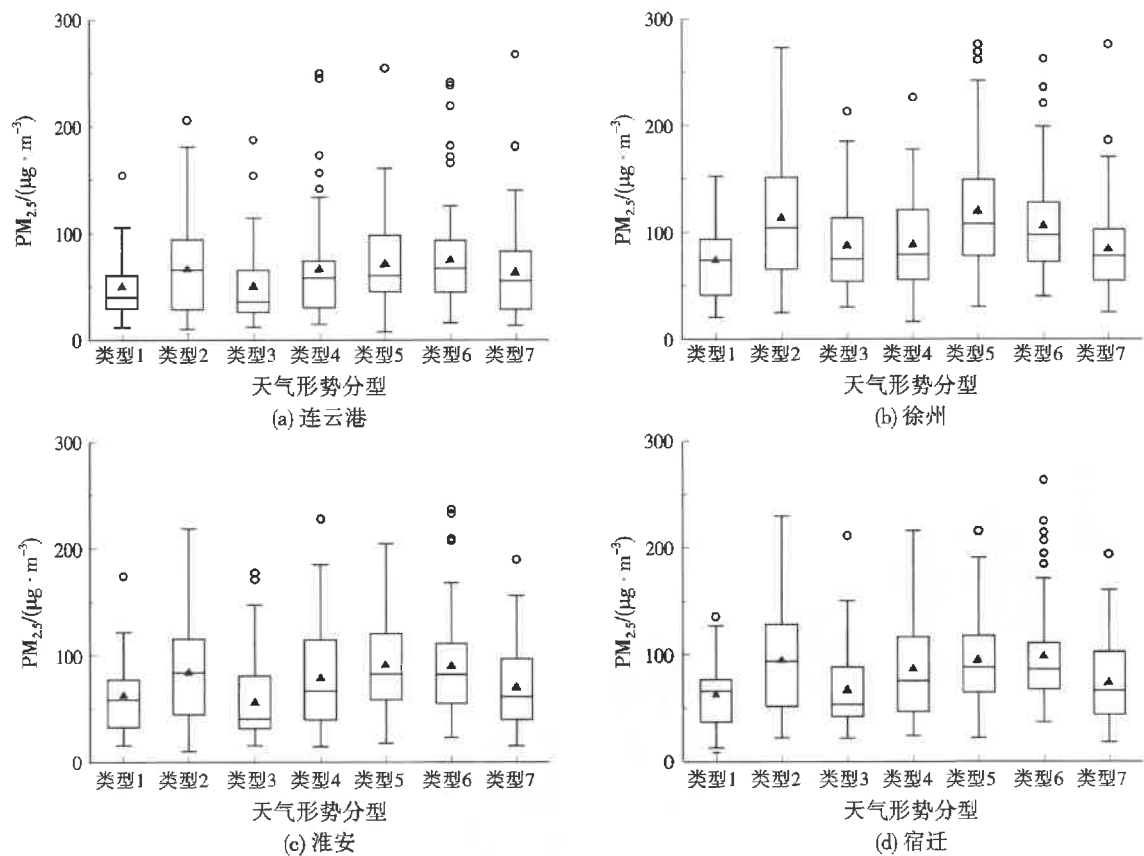


图2 苏北四市7种天气形势下PM_{2.5}日均质量浓度分布特征

Fig.2 Distribution characteristics of PM_{2.5} daily mean mass concentration in seven synoptic patterns for four cities of Northern Jiangsu

表2 7种天气形势下PM_{2.5}污染等级出现频率
Table 2 The frequency of different PM_{2.5} pollution levels in seven synoptic patterns %

天气类型	连云港						徐州					
	I	II	III	IV	V	VI	I	II	III	IV	V	VI
类型1	48.0	36.0	12.0	0	4.0	0	16.0	40.0	36.0	4.0	4.0	0
类型2	32.1	28.2	30.8	3.8	5.1	0	2.6	26.9	30.8	14.1	21.8	3.8
类型3	49.2	34.4	13.1	0	3.3	0	4.9	47.5	23.0	13.1	11.5	0
类型4	27.9	49.2	8.2	8.2	6.6	0	11.5	32.8	26.2	19.7	9.8	0
类型5	15.0	46.7	26.7	8.3	1.7	1.7	3.3	20.0	30.0	23.3	18.3	5.0
类型6	13.6	42.0	31.8	5.7	6.8	0	0	28.4	35.2	21.6	13.6	1.1
类型7	34.7	34.7	22.2	5.6	1.4	1.4	11.1	33.3	36.1	12.5	5.6	1.4

天气类型	淮安						宿迁					
	I	II	III	IV	V	VI	I	II	III	IV	V	VI
类型1	28.0	44.0	16.0	8.0	4.0	0	24.0	48.0	20.0	8.0	0	0
类型2	16.7	26.9	30.8	16.7	9.0	0	10.3	34.6	24.4	19.2	11.5	0
类型3	32.8	41.0	18.0	4.9	3.3	0	18.0	49.2	23.0	8.2	1.6	0
类型4	18.0	36.1	19.7	18.0	8.2	0	14.8	36.1	23.0	16.4	9.8	0
类型5	8.3	35.0	28.3	16.7	11.7	0	11.7	26.7	35.0	13.3	13.3	0
类型6	3.4	37.5	36.4	11.4	11.4	0	0	37.5	39.8	9.1	12.5	1.1
类型7	18.1	47.2	18.1	12.5	4.2	0	13.9	45.8	26.4	11.1	2.8	0

距平最小值出现在徐州类型1下,为-25.3 μg/m³。类型4下PM_{2.5}日均浓度变化总体不明显。

综合7种天气形势下苏北四市PM_{2.5}浓度、污染等级出现频率及PM_{2.5}浓度距平,类型1、3、7可认为是该地区清洁型天气;类型2、5、6可认为是污

染型天气。

2.3 不同天气形势下PM_{2.5}浓度与气象要素的关系
不同的天气形势会影响局地气象要素时空分布,从而影响PM_{2.5}浓度变化^[19-20]。表4为7种天气形势下苏北四市PM_{2.5}日均质量浓度、气象要素

表 3 7 种天气形势下苏北四市 PM_{2.5} 日均质量浓度距平
Table 3 The anomalies of PM_{2.5} mass concentration
in seven synoptic patterns for four cities
of Northern Jiangsu $\mu\text{g}/\text{m}^3$

天气类型	连云港	徐州	淮安	宿迁
类型 1	-15.6	-25.3	-15.9	-22.8
类型 2	1.0	14.2	5.8	8.8
类型 3	-14.8	-11.5	-22.0	-18.1
类型 4	1.3	-10.2	1.0	1.5
类型 5	6.4	21.1	12.5	9.2
类型 6	10.1	7.2	11.8	13.6
类型 7	-1.8	-14.6	-7.8	-11.9

日均值及两者的相关系数。污染型天气类型 2、5、6 下区域 PM_{2.5} 日均质量浓度分别为 89.2、94.1、92.4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，而清洁型天气类型 1、3、7 下区域 PM_{2.5} 日均质量浓度分别为 61.9、65.2、72.7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。除类型 1 外，其他天气形势下风速与 PM_{2.5} 浓度有显著的负相关性，较大风速有利于地面污染物的扩散稀释，因

此大风是苏北四市污染物浓度降低的主要气象因素。由于受冷高压控制，类型 1、3、7 的温度较其他几种天气形势低，且 3 种天气形势下的气压与 PM_{2.5} 浓度呈显著的负相关性，说明冷空气过程会对苏北四市的污染物有一定的清除作用，这与 WANG 等^[21]在研究天气形势对中国东部大气污染分布的影响中得出的结论一致。在污染型天气类型 2、5、6 下，均压场与弱环流形势下的水平扩散条件较差，同时相对湿度往往较高(75.9%、74.4%、66.8%)，有利于污染物的吸湿增长及二次颗粒物的形成，从而使得污染物浓度升高；地面平均温度 $\geq 4.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，较高的温度也促进了光化学反应的发生，加快了气粒转化，因此导致 PM_{2.5} 浓度增大。戴竹君等^[5]¹⁴⁰通过主观分型方法研究江苏冬季霾时也得出均压场是促进重度霾发生的天气形势之一。

表 4 7 种天气类型下的 PM_{2.5} 日均质量浓度、气象要素日均值及两者的相关系数¹⁾
Table 4 Averaged value of daily mean PM_{2.5} mass concentration and meteorological parameters,
and their correlation coefficient in the seven synoptic patterns

天气类型	PM _{2.5} /($\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$)	风速		气压		相对湿度		温度	
		均值/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	相关系数	均值/hPa	相关系数	均值/%	相关系数	均值/ $^{\circ}\text{C}$	相关系数
类型 1	61.9	2.3	-0.20	1 037.5	-0.79 * *	54.9	0.52 * *	-1.6	0.65 * *
类型 2	89.2	2.4	-0.48 * *	1 023.8	-0.23 *	75.9	0.12	4.3	-0.03
类型 3	65.2	2.6	-0.55 * *	1 030.6	-0.47 * *	73.0	0.29 *	1.2	0.46 * *
类型 4	80.2	2.2	-0.43 * *	1 028.4	-0.21	60.1	0.50 * *	2.0	0.07
类型 5	94.1	2.1	-0.36 * *	1 020.1	-0.06	74.4	0.14	6.1	-0.04
类型 6	92.4	1.7	-0.36 * *	1 026.7	-0.20	66.8	0.42 * *	4.0	0.01
类型 7	72.7	1.6	-0.44 * *	1 033.3	-0.45 * *	61.0	0.49 * *	1.3	0.44 * *
所有类型	81.8	2.1	-0.41 * *	1 027.8	-0.36 * *	67.7	0.34 * *	2.9	0.28 * *

注¹⁾：* 表示在 0.05 水平上显著相关；* * 表示在 0.01 水平上显著相关。

3 结 论

用 PCA 与 K 均值聚类的客观分型方法将 2015—2019 年苏北四市冬季海平面气压场天气形势分为 7 种类型，分别为冷锋前部型、弱高压环流型、高压底部型、高压前部型、低压均压场型、高压均压场型和高压环流型。其中，高压均压场型出现概率最高(19.7%)，而冷锋前部型出现概率最低(5.5%)。

在 7 种天气形势中，良好的空气质量主要出现在冷锋前部型、高压底部型和高压环流型 3 类与冷高压密切相关的天气形势，属于清洁型天气，地面气象要素表现为低温、低湿和大风，有利于 PM_{2.5} 的扩散。而在弱低压环流型、低压均压场型和高压均压场型中，PM_{2.5} 污染水平较高，属于污染型天气，地面气象要素表现为风速较低，相对湿度较高，有利于污

染物的积聚与生成。

参考文献：

[1] HE J J, GONG S L, YU Y, et al. Air pollution characteristics and their relation to meteorological conditions during 2014–2015 in major Chinese cities [J]. Environmental Pollution, 2017, 223: 484–496.

[2] WU J R, BEI N F, HU B, et al. Is water vapor a key player of wintertime haze in North China Plain? [J] Atmospheric Chemistry and Physics, 2019, 19(13): 8721–8739.

[3] 姚青, 刘敬乐, 蔡子颖, 等. 天津大气稳定性和逆温特征对 PM_{2.5} 污染的影响 [J]. 中国环境科学, 2018, 38(8): 2865–2872.

[4] 成莹菲, 侯雪伟, 朱彬, 等. 稳定天气形势下京津冀和长三角地区重度污染过程气象成因解析 [J]. 环境科学学报, 2020, 40(5): 1575–1586.

[5] 戴竹君, 刘端阳, 王宏斌, 等. 江苏秋冬季重度霾的分型研究 [J]. 气象学报, 2016, 74(1).

[6] DAI Z L, JU D Y, KUN Y, et al. Meteorological variables and

- synoptic patterns associated with air pollutions in Eastern China during 2013-2018[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2020, 17(7): 2528.
- [7] CHEN Y A, FUNG C H J, CHEN D H, et al. Source and exposure apportionments of ambient PM_{2.5} under different synoptic patterns in the Pearl River Delta region[J]. Chemosphere, 2019, 236: 124266.
- [8] LIU Y Z, WANG B, ZHU Q Z, et al. Dominant synoptic patterns and their relationships with PM_{2.5} pollution in winter over the Beijing-Tianjin-Hebei and Yangtze River Delta regions in China[J]. Journal of Meteorological Research, 2019, 33(4): 765-776.
- [9] 李培荣, 肖天贵. 成都地区秋冬季污染天气形势下 PM_{2.5} 的扩散与传输[J]. 中国环境科学, 2020, 40(1): 63-75.
- [10] 常炉予, 许建明, 瞿元昊, 等. 上海臭氧污染的大气环流客观分型研究[J]. 环境科学学报, 2019, 39(1): 169-179.
- [11] 许建明, 常炉予, 马井会, 等. 上海秋冬季 PM_{2.5} 污染天气形势的客观分型研究[J]. 环境科学学报, 2016, 36(12): 4303-4314.
- [12] ZHANG Y, DING A J, MAO H T, et al. Impact of synoptic weather patterns and inter-decadal climate variability on air quality in the North China Plain during 1980-2013[J]. Atmospheric Environment, 2015, 124: 119-128.
- [13] DENG J J, ZHAO W, WU L B, et al. Black carbon in Xiamen, China: temporal variations, transport pathways and impacts of synoptic circulation[J]. Chemosphere, 2019, 241: 125133.
- [14] 陈煜升, 张宇静, 赵天良, 等. 近 5 年徐州市大气污染变化及相关气象作用[J]. 环境科学与技术, 2019, 42(增刊 1): 152-158.
- [15] 吴序鹏, 刘端阳, 谢真珍, 等. 江苏淮安地区大气污染变化特征及其与气象条件的关系[J]. 气象与环境科学, 2018, 41(1): 31-38.
- [16] 姚海涛, 唐迪, 董钰春, 等. 江苏省宿迁市气象条件对空气污染的影响[J]. 江苏农业科学, 2015, 43(12): 399-405.
- [17] 陈程, 杨伟波. 连云港市 PM_{2.5} 污染特征及影响因素分析研究[J]. 环境科学与管理, 2014, 39(2): 120-122.
- [18] HJ 633—2012, 环境空气质量指数(AQI)技术规定(试行)[S].
- [19] BEI N F, LI X P, TIE X X, et al. Impact of synoptic patterns and meteorological elements on the wintertime haze in the Beijing-Tianjin-Hebei region, China from 2013 to 2017[J]. Science of the Total Environment, 2019, 704: 135210.
- [20] 翁佳烽, 梁小媛, 谭浩波, 等. 基于 K-means 聚类分析法的肇庆市干季 PM_{2.5} 污染天气形势分型研究[J]. 环境科学学报, 2020, 40(2): 373-387.
- [21] WANG J Q, QU W J, LI C, et al. Spatial distribution of wintertime air pollution in major cities over eastern China: relationship with the evolution of trough, ridge and synoptic system over East Asia[J]. Atmospheric Research, 2018, 212: 186-201.
- (上接第 846 页)
- [2] 许静, 王永桂, 杨寅群. 中国突发性水污染风险评估与预警系统研究进展[J]. 环境污染与防治, 2019, 41(4): 474-478.
- [3] 陈茂福, 吴静, 律严励, 等. 城市污水的三维荧光指纹特征[J]. 光学学报, 2008, 28(3): 578-582.
- [4] 吕清, 顾俊强, 徐诗琴, 等. 水文预警溯源技术在地表水水质监测的应用[J]. 中国环境监测, 2015, 31(2).
- [5] 于会彬, 高红杰, 宋永会, 等. 城镇化河流 DOM 组成结构及与水质相关性研究[J]. 环境科学学报, 2016, 36(2): 435-441.
- [6] 牛城, 张运林, 朱广伟, 等. 天目湖流域 DOM 和 CDOM 光学特性的对比[J]. 环境科学研究, 2014, 27(9): 998-1007.
- [7] ASSAAD A, PONTVIANNE S, PONS M N. Assessment of organic pollution of an industrial river by synchronous fluorescence and UV-VIS spectroscopy: the Fensch River (NE France)[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2017, 189: 229-240.
- [8] 王凤娟, 董景岗. 天津大沽排污河及大沽沙航道水体中 CDOM 光谱分析[J]. 天津科技大学学报, 2017, 32(2): 42-48.
- [9] 张欢, 崔康平, 张强, 等. 派河水体中 DOM 的光谱分析及其来源解析[J]. 环境科学研究, 2019, 32(2): 227-234.
- [10] DURRENMATT D J, GUJER W. Identification of industrial wastewater by clustering wastewater treatment plant influent ultraviolet visible spectra[J]. Water Science & Technology, 2011, 63(6): 1153-1159.
- [11] 刘国肖. 紫外-可见全光谱分析仪在水质监测领域的研究进展与应用[J]. 价值工程, 2019, 38(31): 166-167.
- [12] 谢广群, 周浩, 刘飞. 全光谱技术在水质在线监测领域的应用[J]. 环境与发展, 2017, 29(8): 121-123.
- [13] 国家环境保护总局《水和废水监测分析方法》编委会. 水和废水监测分析方法[M]. 4 版. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [14] 朱文飞, 李晓洁, 刘长风, 等. 沈阳市黑臭水体表层水 DOM 紫外光谱特征分析[J]. 环境工程学报, 2019, 13(3): 569-576.
- [15] ZHU Y Z, SONG Y H, YU H B, et al. Characterization of dissolved organic matter in Dongjianghu Lake by UV-VISible absorption spectroscopy with multivariate analysis[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2017, 189: 443-452.
- [16] 白小梅, 李悦昭, 姚志鹏, 等. 三维荧光指纹谱在水体污染溯源中的应用进展[J]. 环境科学与技术, 2020, 43(1): 172-180.
- [17] 郭婧, 荆红卫, 李金香, 等. 北运河系地表水近 10 年来水质变化及影响因素分析[J]. 环境科学, 2012, 33(5): 1511-1518.
- [18] 荆红卫, 张志刚, 郭婧. 北京北运河水系水质污染特征及污染源分析[J]. 中国环境科学, 2013, 33(2): 319-327.