

基于环流指数研究天津长序列细颗粒物大气污染气象条件演变规律

蔡子颖^{1,2,3*}, 韩素芹¹, 邱晓滨², 姚青³, 汪靖², 樊文雁³, 杨旭³, 郝团², 唐颖潇³, 张敏³ (1.中国气象局-南开大学大气环境与健康研究联合实验室 天津 300074; 2.天津市气象科学研究所,天津 300074; 3.天津市环境气象中心,天津 300074)

摘要: 基于国家气候中心气候系统监测指数集和天津环境模式细颗粒大气污染气象条件指数,建立基于环流指数的天津细颗粒物大气污染气象条件评估方法,研究 1951~2021 年天津气象和气候条件变化对 PM_{2.5} 稀释、扩散和清除影响。结果表明,与天津春季大气污染气象条件高相关的环流指数有东大西洋遥相关型指数、热带北大西洋海温指数、斯堪的纳维亚遥相关型指数;夏季大气污染气象条件与副高位置密切相关,高相关环流指数为印度副高北界位置指数和南海副高北界位置指数;秋冬季亚洲纬向环流指数和亚洲经向环流指数高低对大气污染气象条件有较好指示意义,北极涛动指数和北半球极涡强度指数反映了影响我国秋冬季冷空气强度和频次,与秋季天津大气污染气象条件指数相关系数为 0.45,与冬季天津大气污染气象条件相关系数为 0.66。基于环流指数和基于数值模式构建天津细颗粒物大气污染气象条件相关系数为 0.80,由此数据分析,1951~2021 年天津细颗粒物大气污染气象条件年际变化平均波动在 2.56%,极端峰谷值与平均值相差 7%~8%,20 世纪 80 年代最差,20 世纪 50 年最优,21 世纪 10 年代优于历史平均 1.61%。

关键词: 环流指数; 大气污染气象条件; 天津

中图分类号: X513 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-6923(2023)03-0993-09

Study on the evolution of meteorological conditions of air pollution in Tianjin based on circulation index. CAI Zi-ying^{1,2,3*}, HAN Su-qin¹, QIU Xiao-bin², YAO Qing³, WANG Jing², FAN Wen-yan³, YANG Xu³, HAO Jian², TANG Ying-xiao³, ZHANG Min³ (1.CMA-NKU Cooperative Laboratory for Atmospheric Environment-Health Research, Tianjin 300074, China; 2.Tianjin Institute of Meteorology, Tianjin 300074, China; 3.Tianjin Environmental Meteorological Center, Tianjin 300074, China). *China Environmental Science*, 2023,43(3): 993~1001

Abstract: Based on multiple climate system monitoring indices from Beijing Climate Center and the synthesis meteorological condition index for PM_{2.5} pollution over Tianjin constructed from outputs of Tianjin environmental model, the evaluation methodology for meteorological conditions of air pollution in Tianjin based on circulation indices was established to study the impacts of weather and climatic condition changes on PM_{2.5} diffusion in Tianjin from 1951 to 2021. Results show that the highly correlated circulation indices with springtime PM_{2.5} pollution meteorology in Tianjin are East Atlantic teleconnection index, tropical North Atlantic SST index and Scandinavian teleconnection index. In summer, the PM_{2.5} pollution meteorology in Tianjin is closely correlated with the location of the subtropical high, and the high correlation circulation indices are the location indices of the northern boundary of the Indian subtropical high and the northern boundary of the South China Sea subtropical high. The variations of Asian zonal and meridional circulation indices in autumn and winter are of good significance to the concurrent PM_{2.5} pollution meteorology in Tianjin. Specifically, the variations of Arctic Oscillation index and polar vortex intensity index in the Northern Hemisphere can reflect the intensity and frequency of cold air activities affecting China in autumn and winter. The temporal correlation coefficient (TCC) with the PM_{2.5} pollution meteorology in Tianjin in autumn and winter is 0.45 and 0.66, respectively. By using our proposed PM_{2.5} pollution meteorology index based on large-scale circulations, the TCC between the meteorological conditions for PM_{2.5} pollution in Tianjin and the estimated meteorological conditions by the numerical model is 0.80. Furthermore, according to the data analyses, the mean interannual variations in meteorological conditions for PM_{2.5} pollution in Tianjin from 1951 to 2021 was 2.56%. The difference between the extreme peak and valley values and the averaged values were 7%~8%, with the worst one in the 1980s and the best one in the 1950s. Moreover, the difference in the 2010s outperformed the historical average of 1.61%.

Key words: circulation index; atmospheric diffusion condition; Tianjin

大气污染排放是内因^[1-2],气象条件是外因^[3-4],污染形成、累积与天气条件密切相关^[5-8]。Mu 等^[9]研究显示 2013 年雾、霾天气逐日演变方差有超过 2/3 可由气象因子解释。张小曳等^[10]研究表明,2016 年和

收稿日期: 2022-07-15

基金项目: 天津市自然科学基金资助项目(19JCQNJC08000);国家自然科学基金资助项目(42130513)

* 责任作者, 正高级工程师, 120078030@163.com

2017 年相比 2013 年仅因气象条件有利,会导致 $\text{PM}_{2.5}$ 年均浓度在京津冀下降 9%和 5%,在长三角下降 2%和 7%。为厘清气象条件对大气环境影响,气象部门将大气污染气象条件评估纳入日常业务,利用气象手段解析大气污染防治中与气象相关的大气环境问题。分析方法有四类,一是基于环流和天气形势分析,如经纬向环流指数、海温^[11-12]和遥相关指数^[13-16];二是基于单气象要素统计,如风速、相对湿度、混合层厚度和逆温等^[17-19];三是通过综合多气象要素实现评估,如中国气象科学研究院 PLAM 指数^[20];四是数值模式模拟解析^[21-22],如中国气象科学研究院 EMI 指数^[23-24];其中环流分析可以反映大区域大背景月和年际大气污染物稀释、扩散和清除条件,主要用于长序列大气污染气象条件评估。

天津市气象局大气污染气象条件评估工作始于 2014 年,每月定期向市政府报送相关评估报告,科学解析气象条件对空气质量影响。前期已建立了数值模式^[24]、单气象要素^[25]和综合指数^[26]的大气污染气象条件评估方法,但应用环流指数评估大气污染气象条件仍然欠缺。环流指数是表示在给定区域内大气环流强度的一种参数,其中最常用的是国家气候中心整理气候系统监测指数集。为从更大尺度天气气候系统和更长时间尺度评估天津大气污染气象条件,本文基于国家气候中心气候系统监测指数集和天津环境模式细颗粒物大气污染气象条件指数,建立基于环流指数的天津大气污染气象条件评估方法,研究 1951~2021 年天津气象和气候条件变化对 $\text{PM}_{2.5}$ 稀释、扩散和清除影响,为“十四五”期间深度环境治理提供支撑。

1 材料与方法

为建立基于环流指数大气污染气象条件评估方法,辨识 1951~2021 年气象和气候条件变化对天津 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度演变趋势影响,本文使用三部分数据。一是国家气候中心气候系统监测指数集,该数据集包含 130 项气候系统指数,其中大气环流指数 88 项,海温指数 26 项,其他指数 16 项,时间分辨率为月平均,起止时间为 1951 年 1 月~2022 年 2 月,且每月更新发布;二是基于天津环境模式构建基准排放源(MEIC2015^[27-28])细颗粒物大气污染

气象条件指数,该数据可参考文献[21],具体为采用大气化学模式,假定年际排放源固定(有月变化和日间变化),模拟天津 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度,由于年际排放源固定,认为其模拟 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度年际波动主要由气象条件引起,表征天津大气污染气象条件变化趋势;三是常规气象观测,来自天津市气象局,主要为 1960~2021 年天津 13 个地面气象站能见度和风速观测。

2 结果与讨论

2.1 不同季节基于环流指数天津细颗粒物大气污染气象条件评估模型构建

2.1.1 春季大气污染气象条件 定义 3、4 和 5 月为春季,分析 130 项气候系统指数与数值模式估算春季大气污染气象条件指数(指数越高,越不利扩散)相关性,样本数为 22 个(2000~2021 年),当相关系数超过 0.41 时,其置信区间为 0.95,具有较好统计意义,满足要求指标有 9 个,正相关指标 5 个,负相关指标 4 个。亚洲纬向环流指数,相关系数为 0.42,该指数采用 $45^{\circ}\text{N}\sim 65^{\circ}\text{N}$ 、 $60^{\circ}\text{E}\sim 150^{\circ}\text{E}$ 区域内 500hPa 高度场数据,以 30 个经度为间隔划分为 3 个区分别计算纬向指数,然后计算 3 个区的平均纬向指数,从物理意义解释,亚洲纬向环流指数高,说明该段时间大气平直环流较多,冷空气较弱,大气污染物稀释、扩散和清除条件相对较差;东大西洋遥相关型指数,相关系数为 0.46;斯堪的纳维亚遥相关型指数,相关系数为 0.42,研究^[29]表明在对流层中层(500hPa),中高纬度上存在正负交替出现的环流中心,即三极型大气遥相关模态,其中两个显著正异常中心分别出现在斯堪的纳维亚半岛和西太平洋地区上空,一个显著负异常中心出现在中西伯利亚上空,斯堪的纳维亚半岛附近的异常反气旋可通过 SCSWP 遥相关波列调控下游的西太平洋反气旋,而与西太平洋反气旋性异常环流相对应的是京津冀地区低层受异常偏南气流控制,且西太平洋地区海平面气压呈现正距平,这有利于增强中国大陆地区与西太平洋之间的纬向气压梯度,引导东南风南风吹向京津冀,可减弱南下冷空气带来的影响,从而降低京津冀一带地面风速,有利于污染物和水汽在京津冀地区堆积;西太平洋编号台风数,相关系数为 0.49;大西洋海温三极子指数,相关系数为 0.45;850hPa 西太平洋信风指数,相

关系数为-0.47;热带北大西洋海温指数,相关系数为-0.51;大西洋多年代际振荡指数,相关系数为-0.44;大西洋经向模海温指数,相关系数为-0.43,该指数为21°S~32°N、74°W~15°E 区域内,海表温度(左场)和经、纬向 10m 风场(右场)最大协方差分析结果中海表温度场(左场)的时间系数.

表 1 春季大气污染气象条件环流指标
Table 1 Circulation index of meteorological conditions of air pollution in spring

项目	说明
第一步筛选因子	亚洲纬向环流指数(0.42),东大西洋遥相关型指数(0.46),西太平洋编号台风数(0.49),大西洋海温三极子指数(0.45),斯堪的纳维亚遥相关型指数(0.42),850hPa 西太平洋信风指数(-0.47),热带北大西洋海温指数(-0.51),大西洋多年代际振荡指数(-0.44),大西洋经向模海温指数(-0.43)
最终保留因子	东大西洋遥相关型指数(0.46),热带北大西洋海温指数(-0.51), 斯堪的纳维亚遥相关型指数(0.42)
春季综合环流指数	WRQXTJ=-4.29TNASST+27.48PNA+20.41SCA+64.623, 相关系数 0.80

注:()内为相关系数.

上述 9 个指标均可以较好的表征天津春季大气污染气象条件,采用逐步回归对因子进一步筛选,逐步回归保留了斯堪纳维亚遥相关型指数(SCA),热带北大西洋海温指数(TNASST)和东大西洋遥相关型指数(PNA)三个指标,由三个环流指数计算天津春季大气污染气象条件指数与数值模式定量估算的大气污染气象条件指数(WRQXTJ)相关系数为 0.80(图 1).通过数据分析,2000 年~2021 年期间,2003、2015、2016 和 2018 年春季天津大气污染气象条件非常不利 PM_{2.5} 稀释、扩散和清除,其分析判断与基于数值模式估算基本类似,仅 2016 年,基于环流指数判断相比基于数值模式估算大气污染气象条件更差.

2.1.2 夏季大气污染气象条件 气候系统指数与数值模式估算夏季(6~8 月)大气污染气象条件指数相关系数超过 0.41 为 3 个,均为正相关指标.印度副高北界位置指数(ISHNBPI),相关系数为 0.64;南海副高北界位置指数(SCSSHBPI),相关系数为 0.66;大西洋经向模海温指数(AMSST),相关系数为 0.49. 三个指标两个与副高位置相关,与认知夏季华北地区气象对大气污染气象条件影响一致,副高位置决

定华北夏季降水和天气过程,也决定了该区域夏季大气污染气象条件.基于环流指数与数值模式估算夏季大气污染气象条件相关系数为 0.86,通过数据分析,2019 年和 2021 年夏季大气污染物稀释、扩散和清除条件均非常有利,与数值模式估算一致.

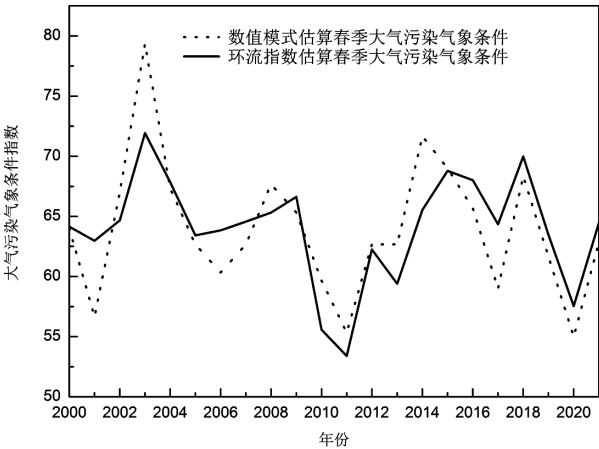


图 1 基于环流指数和数值模式估算的春季大气污染气象条件对比
Fig.1 Comparison of meteorological conditions of air pollution in spring based on circulation index and numerical model

表 2 夏季大气污染气象条件环流指标
Table 2 Circulation index of meteorological conditions of air pollution in summer

项目	说明
筛选因子	印度副高北界位置指数(0.64),南海副高北界位置指数(0.66),大西洋经向模海温指数(0.49)
夏季综合环流指数	WRQXTJ=0.81ISHNBPI+0.86SCSSHBPI+0.43AMSST+6.38, 相关系数 0.86

2.1.3 秋季大气污染气象条件 秋季(9~11 月)大气污染气象条件指数与气候系统指数相关系数超

过 0.41 为 5 个,其中正相关指标 4 个,负相关指标 1 个.亚洲纬向环流指数,相关系数为 0.53,当亚洲纬向环流指数较高时,天津大气污染物稀释、扩散和清除条件较差,不利于大气污染物扩散;欧亚纬向环流指数,相关系数为 0.46;北极涛动指数^[30],相关系数为 0.45,北极涛动是一个气候概念,是北半球中纬度和高纬度气压此消彼长的“跷跷板”现象,通常北极极地中心被低气压控制,极地上空常年存在一个巨大的冷性涡旋,并被周围的高气压所包围着,这种“南高北低”的态势称为北极涛动正相位.在这种情况下,冷空气都被限制在极地范围,对应华北地区秋冬季气温偏高,但当北极涛动正位相逐步减弱,开始向负位相发展时,“南高北低”逐渐转为“南低北高”,高气压逐渐控制北极极地中心,之前一直限制在极地范围的冷空气被排挤南下,向南伸展,导致寒流出现,我国华北地区大气污染物稀释、扩散和清除条件

改善,因此北极涛动指数与大气污染气象条件有很好的正相关,其数值越高,意味着秋季冷空气活动偏弱;西太平洋遥相关型指数,相关系数为 0.48;负相关指标 1 个,北太平洋遥相关型指数,其相关系数为 -0.52.

上述 5 个指标均可以较好表征天津秋季大气污染气象条件,采用逐步回归对因子进一步筛选,保留了亚洲纬向环流指数(AZCIX)和北太平洋遥相关型指数(NP)两个指标,回归方程相关系数为 0.72.考虑物理意义,将意义明确的北极涛动指数^[31](AO)强行加入方程,形成新的方程,基于环流指数与数值模式估算大气污染气象条件相关系数为 0.75.通过数据分析,2000~2021 年期间,2011 和 2004 年秋季气象条件非常不利细颗粒物稀释、扩散和清除,尤其是 2004 年,通过环流指标评估和数值模式评估均显示了其秋季大气污染物稀释、扩散和清除条件的极端不利性.

表 3 秋季大气污染气象条件环流指标
Table 3 Circulation index of meteorological conditions of air pollution in autumn

项目	说明
第一步筛选因子	亚洲纬向环流指数(0.53),欧亚纬向环流指数(0.46),北极涛动指数(0.45),西太平洋遥相关型指数(0.48),北太平洋遥相关型指数(-0.52)
最终保留因子	亚洲纬向环流指数(0.53),北极涛动指数(0.45),北太平洋遥相关型指数(-0.52)
秋季综合环流指数	$WRQXTJ=1.56AZCIX+0.237AO-7.897NP+46.239$,相关系数 0.75

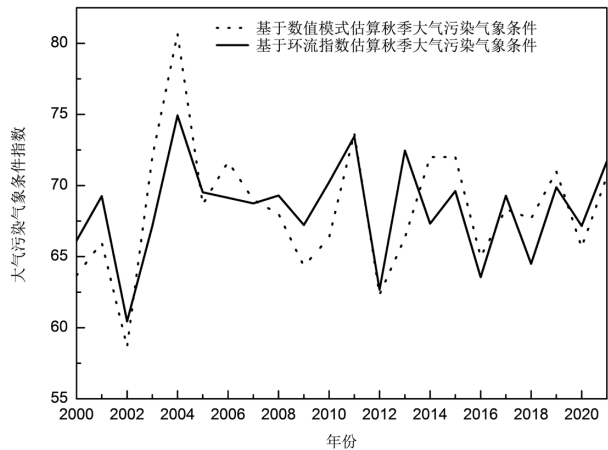


图 2 基于环流指数和数值模式估算的秋季大气污染气象条件对比

Fig.2 Comparison of meteorological conditions of air pollution in autumn based on circulation index and numerical model

2.1.4 冬季大气污染气象条件 冬季(12~2 月)气候系统指数与数值模式估算大气污染气象条件指

数相关系数超过 0.41 为 8 个,其中正相关指标 6 个,负相关指标 2 个.北半球极涡强度指数,相关系数为 0.66,极地是地球的冷极,地球的南北极上空,由于受到热力因素的影响,会形成一个势力强大的冷性低压,而且这个低压系统是围绕地极旋转的,因此叫做极地涡旋,极地上空一旦被较为持久的反气旋或者暖脊控制入侵,当暖气流侵入冷空气的大巢时,北极变暖,这里原有的大气环流受到扰动,冷空气被迫移动,极涡就可能发生分裂,极涡(冷空气)被挤压南下,极涡分裂后,通常有两个主要移动方向,一个方向影响北美大陆,另一个方向影响欧亚大陆.强极涡年(北半球极涡强度指数较高),冷空气被锢囚在北极,我国冬季气温较常年偏高,大气污染物稀释、扩散和清除条件偏差.东大西洋-西俄罗斯遥相关型指数,相关系数为 0.52,其影响与东北亚异常反气旋有关,该反气旋分为欧亚型和东大西洋-西俄罗斯型,当该指数较高时,一方面偏南风异常不利于冷空气

南下,另一方面偏南风异常有利于暖湿空气与污染物向华北地区输送^[32].东亚槽位置指数,相关系数为 0.47,东亚冬季风偏弱时,东亚大槽东移北撤至白令海一带,东亚副热带西风急流位置偏北,东北亚地区对流层中低层被异常高压区所控制,大气污染物稀释、扩散和清除条件偏差^[33].北大西洋-欧洲区极涡强度指数,相关系数为 0.42;东大西洋遥相关型指数,相关系数为 0.42,该指标在夏季大气污染气象条件分析时,也显示了高相关;欧亚纬向环流指数,其相关系数为 0.41,该指标为秋冬季分析共同指标;负相关指标 2 个,亚洲经向环流指数,相关系数为 -0.50,亚洲经向环流指数与亚洲纬向环流指数相对应,经向环流指数越高,说明冷空气活动越频繁;南海副高北界位置指数,其相关系数为 -0.46,该指标在夏季大气污染气象条件分析中也有应用,但指标

趋势相反.

上述 8 个指标均可较好表征天津冬季大气污染气象条件,采用逐步回归对因子进一步筛选,保留北半球极涡强度指数^[34](NHPVI),显示出该指标对冬季大气污染气象条件评估的重要性,考虑物理意义明确性,将物理意义明确的亚洲经向环流指数(AMCI)以及有东亚槽位置指数(EATI)加入回归方程,基于环流指数与数值模式估算大气污染气象条件相关系数为 0.71,环流指数分析 2000~2021 年期间 2000~2002、2006、2016 和 2019 年冬季大气污染气象条件非常不利,2012~2013 年基于环流指数和基于数值模式分析略有差异,其原因主要是上述两年北半球极涡强度指数并没有显著增高,为平均状态,北大西洋-欧洲区极涡强度指数和欧亚纬向环流指数偏高.

表 4 冬季大气污染气象条件环流指标

Table 4 Circulation index of meteorological conditions of air pollution in winter

项目	说明
第一步筛选因子	北半球极涡强度指数(0.66),东大西洋-西俄罗斯遥相关型指数(0.52),东亚槽位置指数(0.47),北大西洋-欧洲区极涡强度指数(0.42),东大西洋遥相关型指数(0.42),欧亚纬向环流指数(0.41),亚洲经向环流指数(-0.50),南海副高北界位置指数(-0.46)
最终保留因子	北半球极涡强度指数(0.66),东亚槽位置指数(0.47),亚洲经向环流指数(-0.50)
春季综合环流指数	$WRQXTJ=0.00533NHPVI-2.597AMCI+0.058EA+1.536$,相关系数 0.71

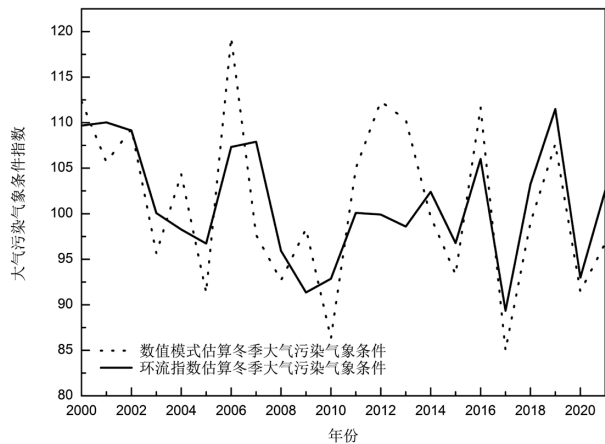


图 3 基于环流指数和数值模式估算的冬季大气污染气象条件对比

Fig.3 Comparison of meteorological conditions of air pollution in winter based on circulation index and numerical model

2.1.5 年际大气污染气象条件 大气污染气象条件年评估方法有两种,一是直接分析气候系统

指数与数值模式大气污染气象条件指数相关性,相关系数超过 0.41 指标为 27 个,正相关指标 13 个,负相关指标 14 个,相关系数变化范围包括 0.42~0.51,-0.60~-0.41,筛选其中相关系数最大的 8 个指标(表 5).基于逐步回归完成因子筛选,估算数据与数值模式数据相关系数为 0.79.基于数值模式估算 2000~2021 年期间有 5 个大气污染气象条件非常差的年份,分别为 2003~2004、2007、2014~2015,基于该环流指数辨识具有同样判断为 4 个,该方法具有一定适用性,但筛选后,环流指数影响物理意义并不清晰.二是选择春、夏、秋、冬各建立方程,分开计算后统计年值,其与数值模式估算大气污染气象条件相关系数为 0.80,变化趋势基本与模式一致,可用于大气污染气象条件趋势评估,百分百识别 2000~2021 年期间有 4 个最有利大气污染物稀释、扩散和清除年份,最差的 5 个年份,除 2013 年外均准确识别.

表 5 年度大气污染气象条件环流指标
Table 5 Circulation index of meteorological conditions of air pollution

项目	说明				
第一步筛选因子	东太平洋副高脊线位置指数(-0.46),北太平洋副高脊线位置指数(-0.49),北太平洋副高北界位置指数(-0.50),东大西洋-西俄罗斯遥相关型指数(0.49),850hPa 西太平洋信风指数(-0.47),类 ENSO 指数(0.51),南方涛动指数(-0.50),热带太平洋射出长波辐射指数(-0.60)				
最终保留因子	北太平洋副高北界位置指数(-0.50),热带太平洋射出长波辐射指数(-0.60)				
春季综合环流指数	WRQXTJ=15.789TPOLWRI-3.365PSHRPI+146.464,相关系数 0.79				
阈值指标	非常有利	有利	一般	不利	非常不利
	<70	70~72	72~73	73~74.5	>74.5

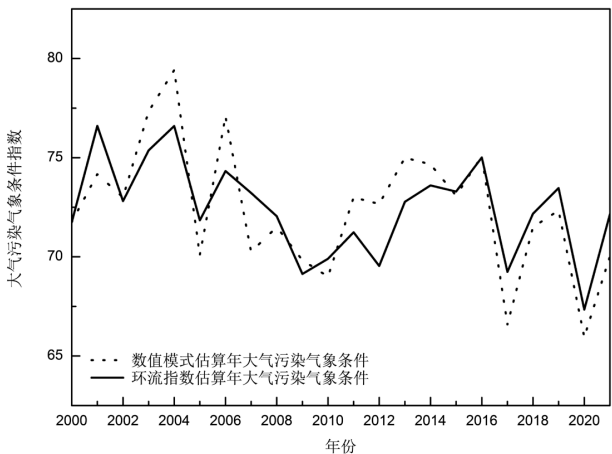


图 4 2000~2021 年基于环流指数天津年大气污染气象条件变化趋势

Fig.4 Comparison of meteorological conditions of air pollution based on circulation index and numerical model

2.2 1951~2021 年天津大气污染气象条件趋势分析

建立基于环流指数天津大气污染气象条件评估方法,其目标有两个,一是在业务评估中,希望多方法综合评估天津大气污染气象条件,从可行性和便捷性出发,国家气候中心每月定期发布气候系统监测指数集,由该数据为基础构建相关方程进行大气污染气象条件评估,在业务操作上具有较高可行性;二是延长提升现有大气污染气象条件评估能力,能够在更长时间尺度上分析大气污染气象条件变化,气候系统监测指数集从 1951 年开始,基于此可以重构 1951~2021 年大气污染气象条件,从更长时间去分析大气污染气象条件周期变化,此外环流分析是天气学和气候学常用的方法,有很强的机理性,这也是建立基于环流指数大气污染气象条件评估方法重要原因。

表 6 不同年代际天津大气污染气象条件距 1951~2021 年距平变化百分比(%)

Table 6 Percentage of anomaly variation of meteorological conditions of air pollution from 1951 to 2021(%)

年代	春季	夏季	秋季	冬季	年均值
1950s	-4.16	0.68	-3.79	-0.46	-1.80
1960s	-1.40	0.81	-2.37	-0.54	-0.73
1970s	0.10	-0.79	1.43	4.06	1.54
1980s	2.71	0.14	-0.62	3.11	2.07
1990s	0.09	-2.63	2.59	3.34	1.12
2000s	3.43	3.11	0.84	-2.82	0.18
2010s	-0.45	0.54	1.01	-5.25	-1.61
2020s	-3.72	-9.02	2.69	-7.43	-4.75

注:负值表示相比较1951~2021年平均大气污染气象条件更有利于污染扩散的程度。

基于气候系统监测指数集构建 1951~2021 年天津细颗粒物大气污染气象条件,图 5 显示 2010~2019 年期间,天津大气污染气象条件相较历史平均略有利扩散,幅度 1.61%,其中春季偏好 0.45%,夏季偏差 0.54%,秋季偏差-1.0%,冬季偏好 5.25%(表 6)。各年代际中,20 世纪 80 年代细颗粒物大气污染气象条件最差,其次是 20 世纪 70 年代,20 世纪 90 年代,最好的是 20 世纪 50 年代,其次是 21 世纪 10 年代(仅从气象和气候周期分析,实际受到城市化等因素影响,在大尺度气候和气象背景影响大气污染气象条件同时,21 世纪地面风速相比上世纪有明显下降),大气污染气象条件 1951~2021 年平均年波动幅度 2.56%,以每 10 年中最不利扩散的年份为研究对象,1952 年、1963 年、1974 年、1988 年、1999 年、2007 年和 2016 年为各年代际细颗粒物大气污染气象条件最差的年份,其大部分相差 10~11 年,大气污染气象条件变化具有一定的周期性波动。对应分析气象部门同期能见度观测,也显示出 1988 年、2007 年、2016 年相比相邻年份,能见度数值也偏低,如 1988 年比 1999 年能见度低 0.5km,2007 年比 2008 年能见度低 0.4km,2016 年比 2017 年能见度低 2.23km(图 6)。

2020~2021 年天津空气质量大幅度改善,其中气象条件贡献不可忽略,其相较历史平均大气污染气象条件优 4.75%。从气候周期变化角度,未来大气污染气象条件仍将有波动性变化,在大气污染气象条件较差年份,

其稀释、扩散和清除能力比平均要下降到 7%左右,相比 2020~2021 年,大气污染气象条件要差 11~12%,要实现天津 $PM_{2.5}$ 质量浓度 38 微克/立方米目标,并将其稳定,仍然需要持续有效的大气污染防治措施。

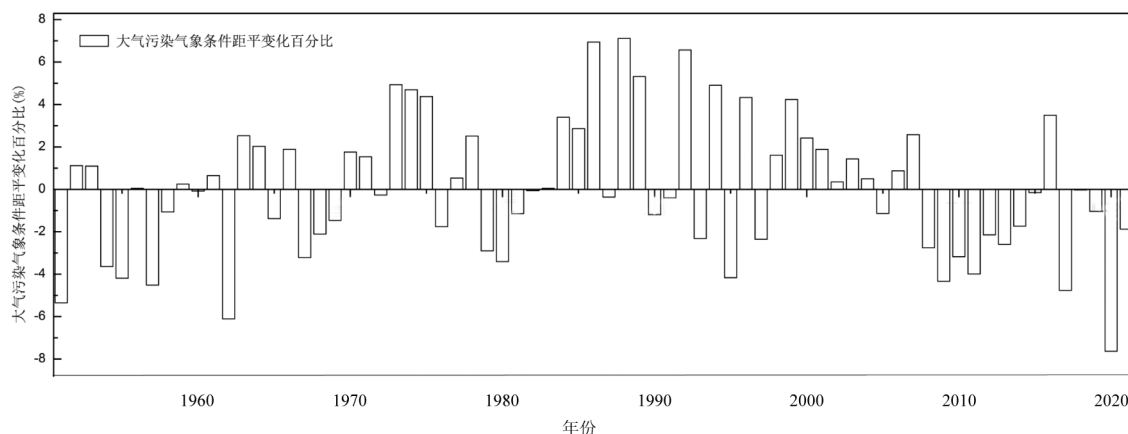


图 5 基于环流指数估算天津大气扩散条件距平变化百分比(负值变好,正值变差)

Fig.5 Estimation of variation percentage of atmospheric diffusion condition anomaly in Tianjin based on circulation index

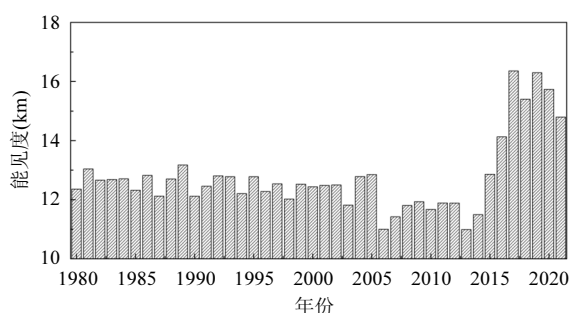


图 6 天津地区能见度变化趋势

Fig.6 Variation of visibility in Tianjin from 1980 to 2021

2.3 影响的其他因素分析讨论

基于环流指数估算大气污染气象条件,主要考虑大尺度气象和气候周期变化导致大气扩散、传输条件变化对细颗粒污染影响,除气候和气象条件影响,一些人为因素也会对大气污染气象条件产生趋势性变化影响,如近年持续城市化建设,导致近地面风速下降。1960~2021 年天津平均风速由 3.3m/s 下降到 2.2m/s,每 10 年下降 0.25m/s,城市地区风速下降更为明显,由 2.9m/s 下降到 1.5m/s,每 10 年下降 0.31m/s。此外,本文以 2015 年清单为基础,定义使用大气化学模式模拟 $PM_{2.5}$ 质量浓度为标准细颗粒物大气污染气象条件,这样可以有效的分离气象条件和排放对 $PM_{2.5}$ 影响,更准确反应天津细颗粒物大气污染气象条件,但数值模式模拟本身有一定的确定性,尤其是

不同气溶胶排放对气象条件有不同强度反馈作用。上述影响是基于环流指数估算大气污染气象条件时没有考虑的,也是其不足之处,但基于环流指数大气污染气象条件评估方法的构建也基本实现了本文研究两个主要目标,作为未来合理评估十四五阶段气象条件对空气质量影响的一种工具方法(持续城市化导致的风速下降已经明显变缓,在短周期内,其影响要远小于气象波动影响),基于长序列细颗粒物大气污染气象条件年际变化分析预测可能的气象和气候周期波动对空气质量影响(该研究本身就需要剔除城市化等人为因素影响)。

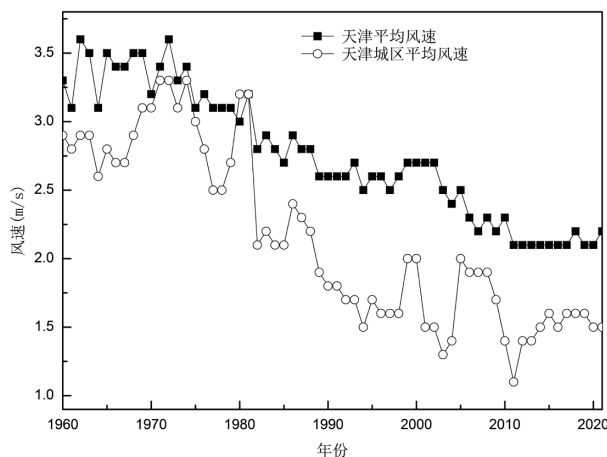


图 7 1960~2021 年天津地区平均风速的变化趋势

Fig.7 Variation of wind speed in Tianjin from 1960 to 2021

3 结论

3.1 环流指数是在给定区域内表征大气环流强度的一种参数,与大气污染气象条件密切相关.春季天津细颗粒物大气污染气象条件高相关环流指数有东大西洋遥相关型指数、热带北大西洋海温指数、斯堪的纳维亚遥相关型指数;夏季天津大气污染气象条件与副高位置密切相关,高相关环流指数为印度副高北界位置指数和南海副高北界位置指数;秋冬季亚洲纬向环流指数和亚洲经向环流指数对天津大气污染气象条件有较好指示意义,此外秋季北极涛动指数、北太平洋遥相关型指数也与大气污染气象条件显示了较好的相关性,冬季北半球极涡强度指数反映了影响我国冷空气的强度和频次,与大气污染气象条件相关系数高达 0.66.

3.2 基于环流指数构建年际大气污染气象条件评估方法,与基于数值模式估算大气污染气象条件相关系数为 0.80,在较好和较差年份辨识方面具有较好一致性.

3.3 基于环流指数构建 1951~2021 年天津细颗粒物大气污染气象条件,20 世纪 80 年代最差,20 世纪 50 年最优,21 世纪 10 年代优于历史平均 1.61%.长序列数据分析,细颗粒物大气污染气象年际变化平均波动在 2.56%,极端峰谷值可以与平均值相差 7~8%,峰值年和谷值年变化有一定的周期,1952 年、1963 年、1974 年、1988 年、1999 年、2007 年和 2016 年为各年代际大气污染气象条件最差的年份,其大部分相差 10~11 年.

参考文献:

- [1] 张 强,耿冠楠.中国清洁空气行动对 $PM_{2.5}$ 污染的影响 [J]. 中国科学:地球科学, 2020,50(4):439-440.
Zhang Q, Gen G L. Impact of clean air action on $PM_{2.5}$ pollution in China [J]. Science China Earth Sciences, 2020,50(4):439-440.
- [2] 蔡子颖,姚 青,韩素芹,等.天津地区霾天气特征研究 [J]. 中国环境科学, 2019,39(1):50-60.
Cai Z Y, Yao Q, Han S Q, et al. Research on characteristics of haze weather in Tianjin [J]. China Environment Science, 2019,39(1):50-60.
- [3] 肖 彝,贾洪伟,徐佳佳,等.上海北侧面区域海陆风对污染物扩散的影响 [J]. 中国环境科学, 2022,42(4):1552-1561.
Xiao B, Jia H W, Xu J J, et al. Effects of land and sea breeze on pollutant diffusion in northern Shanghai [J]. China Environmental Science. 2022,42(4):1552-1561.
- [4] 亓浩雪,王晓琦,程水源.人为排放及气象因素对空气质量影响的定量分析——以疫情期间邢台市为例 [J]. 中国环境科学, 2022,42(8):3512-3521.
- [5] Qi H Y, Wang X Q, Chen S Y. Quantitative analysis of the impact of anthropogenic emissions and meteorological factors on air quality: Cases during the epidemic in Xingtai City [J]. China Environmental Science, 2022,42(8):3512-3521.
- [6] 朱 蓉,张存杰,梅 梅.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, 2018,38(10):3601-3610.
Zhu R, Zhang C J, Mei M. The climate characteristics of atmospheric self-cleaning ability index and its application in China [J]. China Environmental Science. 2018,38(10):3601-3610.
- [7] 蔡子颖,杨 旭,韩素芹,等.基于天气背景天津大气污染输送特征分析 [J]. 环境科学, 2020,41(11):4855-4863.
Cai Z Y, Yang X, Han S Q, et al. Transport characteristics of air pollution in Tianjin based on weather background [J]. Environmental Science, 2020,41(11):4855-4863.
- [8] 杨 旭,蔡子颖,韩素芹,等.基于无人机探空和数值模拟天津一次重污染过程分析 [J]. 环境科学, 2021,42(1):9-18.
Yang X, Cai Z Y, Han S Q, et al. Heavy pollution episode in Tianjin Based on UAV meteorological sounding and numerical model [J]. Environmental Science, 2021,42(1):9-18.
- [9] 蔡子颖,韩素芹,邱晓滨,等.基于 WRF/Chem 模式天津地区重污染天气成因分析 [J]. 高原气象, 2019,38(5):1108-1119.
Cai Z Y, Han S Q, Qiu X B, et al. Research on causes of severely polluted weather in Tianjin based on WRF/Chem [J]. Plateau Meteorology, 2019,38(5):1108-1119.
- [10] Mu M, Zhang R H. Addressing the issue of fog and haze: A promising perspective from meteorological science and technology [J]. Science China Earth Sciences, 2014,57(1):1-2.
- [11] 张小曳,徐祥德,丁一汇,等.2013~2017 年气象条件变化对中国重点地区 $PM_{2.5}$ 质量浓度下降的影响 [J]. 中国科学:地球科学, 2020, 50(4):483-500.
- [12] Wang J, Liu Y. and Ding Y. Interdecadal relationship between the wintertime haze frequency over Beijing and mega-ENSO. Atmospheric Science Letters, 2020,21(12):e1007.
- [13] Yin Z C, Wang H J and Chen H P. Understanding severe winter haze events in the North China Plain in 2014: roles of climate anomalies. Atmospheric Chemistry and Physics, 2017,17(3):1641-1651.
- [14] Wang J, Zhao Q H, Zhu Z W, et al. Interannual variation in the number and severity of autumnal haze days in the Beijing-Tianjin-Hebei region and associated atmospheric circulation anomalies [J]. Dynamics of Atmospheres and Oceans, 2018,84:1-9.
- [15] Wang J, Zhu Z W, Qi L, et al. Two pathways of how remote SST anomalies drive the interannual variability of autumnal haze days in the Beijing-Tianjin-Hebei region, China [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2019,19(3):1521-1535.
- [16] Chen S, Guo J, Song L, Cohen, et al. Intra-seasonal differences in the atmospheric systems contributing to interannual variations of autumn haze pollution in the North China Plain [J]. Theoretical and Applied Climatology, 141(1):389-403.
- [17] Li J, Hao X, Liao H, et al. Winter particulate pollution severity in North China driven by atmospheric teleconnections [J]. Nature Geoscience, 2022,15(5):349-355.

- [17] Wang H J, Chen H P. Understanding the recent trend of haze pollution in eastern China: roles of climate change [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics Discussions*, 2016,16(6):1-18.
- [18] Chen H, Wang H. Haze days in north China and the associated atmospheric circulations based on daily visibility data from 1960 to 2012 [J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2015,120(12): 1-10.
- [19] 张雅斌,林琳,吴其重,等.“13·12”西安重污染气象条件及影响因素 [J]. *应用气象学报*, 2016,27(1):35-46.
Zhang Y B, Lin L, Wu Q Z. et al. Meteorological conditions and impact factors of a heavy air pollution process at Xi'an in december [J]. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2013,27(1):35-46.
- [20] Yang Y Q, Wang J Z, Gong S L, et al. PLAM - a meteorological pollution index for air quality and its applications in fog-haze forecasts in North China [J]. *Atmospheric Chemistry & Physics*, 2016, 15(6):9077-9106.
- [21] 蔡子颖,姚青,韩素芹,等.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*, 2017,37(6):10-15.
Cai Z Y, Yao Q, Han S Q, et al. The trends of fine particulate meteorological diffusivity in Tianjin form 21th [J]. *China Environmental Science*, 2017,37(6):10-15.
- [22] 蔡子颖,郝团,韩素芹,等.2000-2020 年天津 PM_{2.5} 质量浓度演变及驱动因子分析 [J]. *环境科学*, 2022,43(3):1129-1139.
Cai Z Y, Hao J, Han S Q, et al. Analysis of change and driving factors of PM_{2.5} mass concentration in Tianjin from 2000 to 2020 [J]. *Environmental Science*, 2022,43(3):1129-1139.
- [23] 张宸赫,王东东,赵天良,等.基于 WRF-Chem 和 EMI 指数的新冠肺炎疫情期间沈阳市大气污染物浓度变化原因分析 [J]. *环境科学学报*, 2021,41(9):3709-3716.
Zhang C H, Hao D D, Zhao T L, et al. Causes of variation of air pollutant concentration in Shenyang during the COVID-19 epidemic based on WRF-Chem and EMI-index [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2021,41(9):3709-3716.
- [24] 焦亚音,孟凯,杜惠云,等.气象条件对颗粒物污染定量贡献的时空特征分析:以京津冀中南部重点城市为例 [J]. *中国环境科学*, 2021, 41(11):4982-4989.
Meng Y Y, Meng K, Du H Y, et al. Analysis on spatial-temporal characteristics of the quantitative contributions of meteorological conditions to the particle pollution :a case study of key cities of central and southern BTH region [J]. *China Environmental Science*, 2021, 41(11):4982-4989.
- [25] 蔡子颖,韩素芹,张敏,等.天津地区污染天气分析中垂直扩散指标构建及运用 [J]. *环境科学*, 2018,39(6):2548-2556.
Cai Z Y, Han S Q, Zhan M, et al. Construction and application of vertical diffusion index for analyzing weather during pollution events in Tianjin [J]. *Environmental Science*, 2018,39(6):2548-2556.
- [26] 张敏,蔡子颖,韩素芹,等.天津静稳指数建立及在环境气象预报和评估中的应用 [J]. *环境科学学报*, 2020,40(12):4453-4460.
Zhang M, Cai Z Y, Han S Q, et al. Establishment of stable weather index of Tianjin and its application in environmental weather forecast and assessment [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2020,40(12):4453-4460.
- [27] Tong D, J Cheng, Y Liu, et al. Dynamic projection of anthropogenic emissions in China: methodology and 2015-2050 emission pathways under a range of socio-economic, climate policy, and pollution control scenarios [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2020,20:5729-5757.
- [28] Zheng B, Zhang Q, Geng G, et al. Changes in China's anthropogenic emissions and air quality during the COVID-19 pandemic in 2020 [J]. *Earth System Science Data*, 2021,13:2895-2907.
- [29] 汪靖.气候异常影响京津冀秋季霾日频数年际变率的机理研究 [D]. 南京:南京信息工程大学, 2020.
Wang J. Impacts of climate anomalies on the interannual variability of frequency of autumnal haze days in the Beijing-Tianjin-Hebei region and associated physical mechanisms [D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science and Technology, 2020.
- [30] 路淑华.北极涛动对我国霾污染影响的分析与模拟研究 [D]. 北京:中国气象科学研究院, 2020.
Lu S H. Analysis and simulation of the impact of arctic oscillation on haze pollution in china [D]. Beijing: Chinese Academy of Meteorological Sciences, 2020.
- [31] Lu S, He J, Gong S, et al. Influence of Arctic Oscillation abnormalities on spatio-temporal haze distributions in China [J]. *Atmospheric Environment*, 2020,223:117282.
- [32] Chen S, Guo J, Song L, et al. Temporal disparity of the atmospheric systems contributing to interannual variation of wintertime haze pollution in the North China Plain [J]. *International Journal of Climatology*, 2020,40(1):128-144.
- [33] Ding Y, Liu Y, Liang S, et al. Interdecadal variability of the East Asian winter monsoon and its possible links to global climate change [J]. *Journal of Meteorological Research*, 2014,8(5):693-713.
- [34] Zhang G, Gao Y, Cai W J. et al. Seesaw haze pollution in North China modulated by the sub-seasonal variability of atmospheric circulation [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2019,19(1):565-576.

作者简介: 蔡子颖(1984-),男,江苏扬州人,正高级工程师,硕士,主要从事环境气象预报和评估.发表论文 80 余篇.