

京津冀冬季极端污染事件的时空特征及类环球遥相关异常环流的影响

孙佳铭, 黄菲*

中国海洋大学深海多圈层与地球系统前沿科学中心和物理海洋教育部重点实验室, 山东 青岛

收稿日期: 2024年6月15日; 录用日期: 2024年7月18日; 发布日期: 2024年7月25日

摘要

随着近几十年来全球变暖加剧, 北极海冰加速融化, 异常的大气环流场造成京津冀极端污染天气频发。本文基于京津冀地区PM_{2.5}浓度大于95%极端事件阈值(162.5 μg/m³)筛选的极端污染事件, 分析了2000~2022年冬季京津冀地区极端污染事件的时空分布特征。结果表明, 近23年冬季共发生了135个极端污染日。污染主要发生在京津冀东南部和中部, 空间上呈东高西低的分布; 极端污染事件发生频次在2014年之后呈现出显著的年代际减少特征, 2019年后没有极端污染事件发生。极端污染事件平均持续2.3天, 最长为10天, 主要发生在1月, 12月和2月发生的次数较少。在极端污染高发年, 西伯利亚高压减弱, 东北亚异常反气旋加强, 盛行西风减弱, 逆温增强, 污染扩散条件差, 有利于极端污染发生; 该东北亚异常反气旋主要受上游源自北大西洋的类环球遥相关波列所影响。

关键词

京津冀, 极端污染事件, 东北亚异常反气旋, 类环球遥相关波列

Spatial-Temporal Characteristics of Winter Extreme Pollution Events in Beijing-Tianjin-Hebei Region and the Effects of Quasi-Circumglobal Teleconnection Anomalous Circulation

Jiaming Sun, Fei Huang*

Frontiers Science Center for Deep Ocean Multispheres and Earth System and Key Laboratory of Physical Oceanography, Ocean University of China, Qingdao Shandong

*通讯作者。

文章引用: 孙佳铭, 黄菲. 京津冀冬季极端污染事件的时空特征及类环球遥相关异常环流的影响[J]. 气候变化研究快报, 2024, 13(4): 1022-1032. DOI: 10.12677/ccrl.2024.134118

Abstract

With global warming in recent decades, the melting of Arctic Sea ice has been accelerated, results in abnormal atmospheric circulation which has caused frequent extreme pollution weather in Beijing-Tianjin-Hebei (BTH) region. In this paper, spatial and temporal characteristics of extreme pollution events in BTH from 2000 to 2022 are studied. Extreme pollution events are selected based on the 95% PM_{2.5} concentration threshold (162.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) in BTH. The results show that a total of 135 extreme pollution days occurred in DJF (December, January and February) of the past 23 years. The pollution mainly occurs in the southeast and central BTH, and it is high in the east and low in the west. The frequency of extreme pollution events shows a significant interdecadal decrease after 2014, and no extreme pollution events happens after 2019. The average duration of extreme pollution events is 2.3 days with a maximum of 10 days. Extreme pollution events mainly occur in January, with fewer occurrences in December and February. In high pollution years, the Siberian high weakens, the anomalous anticyclone is established in Northeast Asia, the prevailing westerly wind weakens, the temperature inversion increases, result in poor pollution diffusion conditions, which are benefit to form extreme pollution. The Northeast Asian anomaly anticyclone is influenced by a quasi-circumglobal teleconnection originated from the North Atlantic.

Keywords

Beijing-Tianjin-Hebei (BTH), Extreme Pollution Events, Northeast Asian Anomaly Anticyclone, Quasi-Circumglobal Teleconnection

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

京津冀地区是我国重要的经济、政治和文化中心,随着近年来经济发展,京津冀地区长期受到重污染天气的影响,严重制约着人民生命健康与当地经济发展。并且随着近几十年来全球变暖加剧,北极海冰加速融化激发异常的大气环流场,京津冀极端污染天气频发。研究引发京津冀极端污染的气象因素,对认识污染天气的形成和消散机制,准确评估污染对健康和环境的影响,以及推动污染天气治理工作的有效开展等方面,具有重要意义。

气象因素控制着污染的形成和消散。与京津冀极端污染天气相关的气象特征为大气层结稳定[1],大气边界层高度偏低[2],近地面风速较低[3]、相对湿度正异常[4]。边界层高度和近地面风速的降低、边界层内水气的增强以及异常的垂直运动,抑制了污染物的垂直和水平扩散,使得更多的污染物聚集在京津冀,同时边界层内水汽含量的增加也会促进二次气溶胶的形成和吸湿增长,进一步加剧当地污染[5]。

在年际尺度和天气尺度上,京津冀污染与东北亚反气旋异常密切相关。而关于东北亚异常反气旋的建立机制尚不完善。An 等人(2020)发现东北亚反气旋异常的持续时间为 8 天,其演化与上游北大西洋的 Rossby 波密切[6]。起源于地中海的 Rossby 波能量沿着副热带西风急流和极锋急流,向东亚传播,在日本海上空形成异常反气旋和京津冀地区 850 hPa 的异常反气旋切变,进而增强了对流层中低层的异常下沉运动,并导致低层大气稳定[7];因此,东北亚反气旋异常是研究京津冀污染天气的重要部分,大部

分研究分析不同的气候因素如何影响东北亚反气旋异常的建立。

随着近几十年来全球变暖加剧, 北极海冰加速融化, 造成“暖北极冷大陆”的异常天气型[8], 中纬度极端天气频发。目前, 大多数研究集中于京津冀污染的定量分析, 而对京津冀极端污染天气和大尺度环流场的关系仍认识不足; 大多数研究局限于污染个例, 缺乏长时间的污染观测; 因此, 本文拟研究在新世纪以来全球变暖以及北极快速变化造成的“暖北极冷大陆”气候背景下, 处于东亚中纬度大陆的京津冀地区极端污染事件会出现何种变化特征, 影响其变化的大尺度环流系统有何变化。

2. 数据和方法

2.1. 再分析数据

本研究用于天气分析的数据取自 ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts) 提供的 ERA5 (ECMWF Reanalysis v5) 资料[9]。ERA5 是基于 2016 年运行的 IFS (Integrated Forecasting System) Cy41r2 产生, 较 ERA-Interim 数据相比, ERA5 在模拟大气环流和其他气象要素时具有更高的准确性和可靠性; 同时 ERA5 改善了数据同化方法, 数据的分辨率都得到了显著提升, 数据的整体质量和一致性得到了提升, 能够更准确地模拟大气环流的真实状态。ERA5 数据提供了从低层到高层大气的详细垂直结构信息, 对揭示天气系统的形成机制、分析天气事件的影响因子以及评估气候变化的影响等方面都具有重要意义。

2.2. 空气污染数据

空气污染组分主要以 $PM_{2.5}$ 为主, 因此本研究使用的空气污染数据来自中国大气成分近实时追踪数据集 (Tracking Air Pollution in China, 简称 TAP)。TAP 建立了两级的机器学习模型, 用于反演逐日完整覆盖的 $PM_{2.5}$ 浓度[10] [11] [12]。目前, 资料时间为 2000 年 1 月开始、2023 年 2 月结束。TAP 建立了两级的机器学习模型来反演 $PM_{2.5}$ 浓度。机器学习模型在处理复杂的非线性关系和多变量交互作用方面具有优势, 能够更准确地估计 $PM_{2.5}$ 浓度。这有助于减少传统监测方法的局限性, 如站点分布不均或数据缺失等问题。本研究选取了 2000 年至 2022 年冬季 (12 月、1 月、2 月) 京津冀地区的 $PM_{2.5}$ 数据。本文所使用的年份均为 12 月所在的年份。

本研究将单日京津冀 $PM_{2.5}$ 浓度数据集中所有的元素做升序排列并做正态分布拟合(图 1), 图 1 表明 $PM_{2.5}$ 的平均浓度为 $91.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 标准差为 $43.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$; 求解正态分布的 95% 阈值对应的 $PM_{2.5}$ 浓度值为 $162.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 若某日的京津冀平均 $PM_{2.5}$ 浓度超过 $162.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 则该日期为极端污染日。由此筛选出 135 个极端污染日。

2.3. 经验正交函数分解

经验正交函数 (Empirical orthogonal function, 简称 EOF) 分解是一种常见的气候统计方法, 主要用于分析高维数据中的结构特征。EOF 分解在气象学、海洋学、地球物理学等领域有广泛的应用, 用于揭示复杂系统中的主要模态和时空变化特征[13]。方法的基本思想是将原始数据场分解为一系列正交的空间模态和时间系数。这些空间模态代表了主要空间结构, 而时间系数则描述了空间结构随时间的变化。EOF 分解的具体步骤如下:

(1) 准备数据: 将原始数据整理成矩阵形式, 其中每一列代表一个空间点 (如气象观测站或网格点), 每一行代表一个时间点。

(2) 计算协方差矩阵或相关矩阵: 根据原始数据计算协方差矩阵或相关矩阵, 这些矩阵反映了不同空间点之间的相关性。

(3) 求解特征值和特征向量: 对协方差矩阵或相关矩阵进行特征值分解, 得到一系列特征值和对应的特征向量。这些特征向量就是 EOF 分解中的空间模态, 而特征值的大小反映了各模态的重要性。

(4) 计算时间系数: 将原始数据投影到各个空间模态上, 得到对应的时间系数。这些时间系数描述了各空间模态随时间的变化情况。

EOF 分解的结果通常以空间模态图和时间系数图的形式呈现。空间模态图展示了数据场的主要空间结构, 而时间系数图则反映了这些结构随时间的变化趋势。通过 EOF 分解, 可以更深入地了解气象系统的空间分布和时间变化特征。

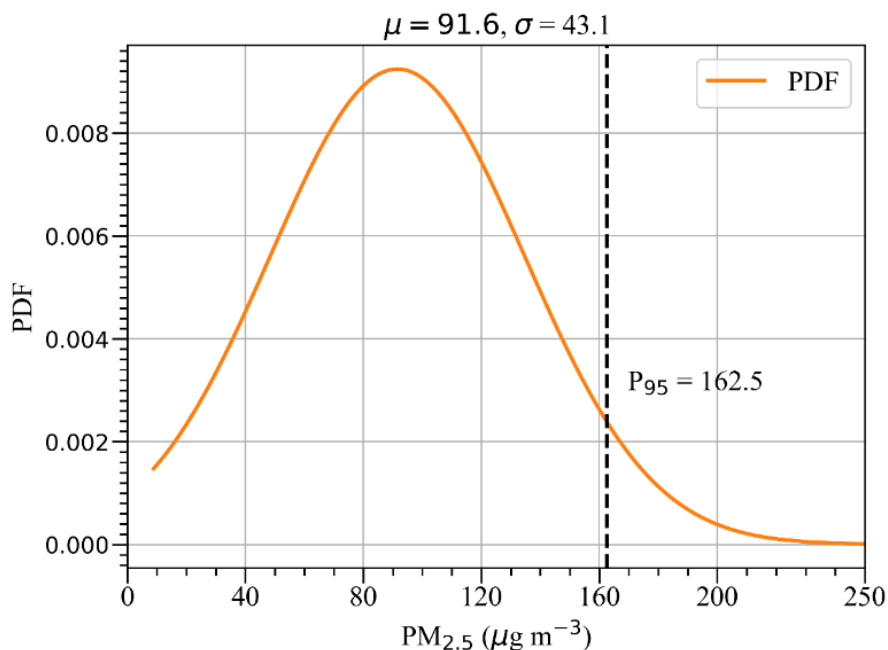


Figure 1. The normal distribution of daily mean $PM_{2.5}$ concentration (unit: $\mu\text{g}/\text{m}^3$), the dashed line is $PM_{2.5}$ concentration at 95% percentile

图 1. 逐日区域平均 $PM_{2.5}$ 浓度(单位: $\mu\text{g}/\text{m}^3$)的正态分布曲线, 虚线为 95% 百分位阈值对应的 $PM_{2.5}$ 浓度

3. 京津冀 $PM_{2.5}$ 浓度的时空分布特征

3.1. 极端污染日和极端污染过程

图 2 将 135 个极端污染日标记在图中, 每个色块代表一次极端污染过程, 色块颜色代表了极端污染过程的总时长(天), 共计得到 65 次极端污染过程。从每年极端污染过程发生日期分布看, 极端污染过程主要发生在 1 月, 其次是 12 月和 2 月。大部分极端污染过程的总时长为 1 至 3 天, 超过 4 天的极端污染过程很少, 记录中仅出现一次为期 10 天的极端污染过程, 发生在 2009 年 1 月 28 日至 2009 年 2 月 6 日。大部分超过总时长 3 天的极端污染过程发生在 1 月。在 2010 年之前, 冬季发生连续极端污染过程的次数较多, 共计 37 次, 其中总时长超过 3 天的极端污染过程共为 6 次; 而 2010 年后, 随着减排措施的增强, 极端污染过程数量较 2010 年之前减少, 共计 28 次。同时总时长超过 3 天的极端污染过程较 2010 年之前减少。在 2010 年后, 政府和企业也采取了一系列的减排措施, 包括加强大气污染治理、提高工业排放标准、推广清洁能源等, 以减少对大气环境的污染。因此, 可认为极端污染过程在 2010 年之前较强, 在 2010 年后减弱。

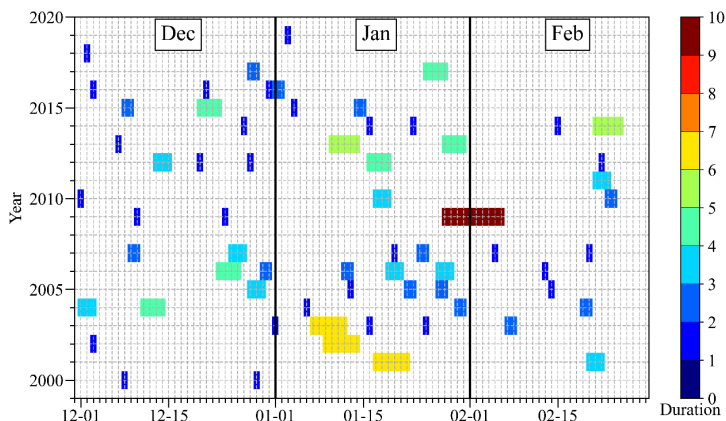


Figure 2. Temporal distribution of extreme pollution days
图 2. 极端污染事件的时间分布图

图 3 记录了每年冬季发生极端污染的天数(图 3(a))和对应的极端污染过程的数量(图 3(b))。根据图 3(a), 每年冬季极端污染日的平均天数为 5.8 天, 每年冬季的极端污染过程个数为 2.8 个。极端污染日天数曲线的回归系数为-0.40, 说明极端污染日的天数呈逐年下降的趋势。每年的极端污染日天数在 5 至 11 天之间振荡, 在 2004 年冬季至 2006 年冬季的极端污染日天数持平, 为 11 天; 2006 年冬季后每年极端污染日天数下降为 5 天; 自 2007 年冬季至 2011 年冬季, 每年的极端污染日天数范围在 4 天至 7 天。在 2012 年冬季的极端污染日最多, 为 14 天。自 2012 年冬季后, 极端污染日天数整体趋势逐年递减。自 2019 年冬季开始, 每年冬季均未出现极端污染日。

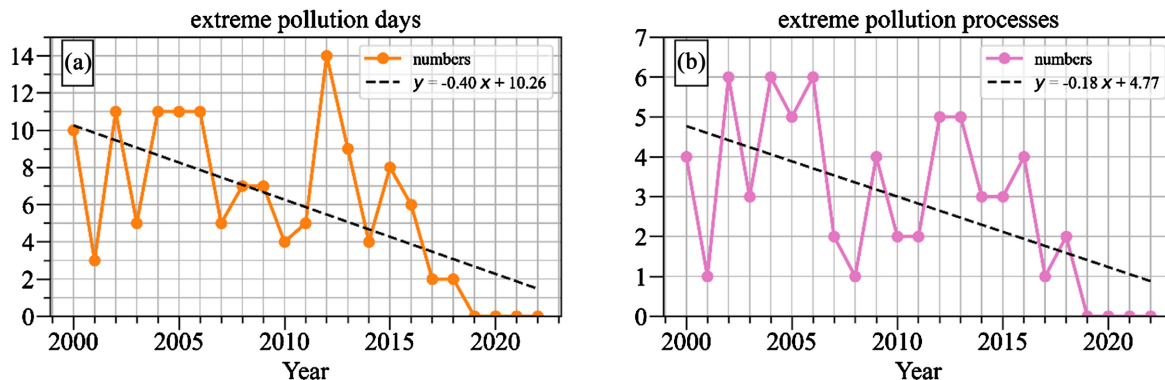


Figure 3. (a) Total number of 135 extreme pollution days every year from 2000 to 2022 DJF, (b) total number of 65 extreme pollution processes every year from 2000 to 2022 DJF

图 3. 2000 年至 2022 年冬季(12 月、1 月、2 月) 135 个极端污染日逐年数量, (b) 2000 年至 2022 年冬季(12 月、1 月、2 月) 65 个极端污染过程逐年数量

根据图 3(b), 每年发生极端污染过程的数量曲线的回归系数为-0.18。由此得出极端污染过程的个数也在逐年下降。整体上看每年的极端污染过程个数范围在 1 至 6 个, 其中 2002 年、2004 年和 2006 年发生极端污染过程的个数最多, 均为每年 6 个。2006 年冬季后每年极端污染过程的数量下降为 2009 年冬季的每年 1 个极端污染过程。而自 2009 年冬季至 2013 年冬季, 每年极端污染过程数量由 1 个增长为 5 个; 在 2013 年冬季后, 每年发生极端污染过程的数量下降, 但仍在每年 1 至 4 个之间振荡。自 2019 年后, 每年均没有发生极端污染过程。

3.2. 京津冀 PM_{2.5} 浓度的时空主模态特征

基于京津冀 PM_{2.5} 浓度进行 EOF 分解, 并将结果画在图 4。由图 4(a), 京津冀 PM_{2.5} 浓度第一模态的方差贡献率达 93.5%, 表明冬季京津冀 PM_{2.5} 浓度在年际尺度上的时空变化特征主要由第一主模态的时空分布主导。由图 4(b), 京津冀平均 PM_{2.5} 浓度位于 180 至 200 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 之间, PM_{2.5} 浓度在京津冀北部较低, 为 80 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 左右。因此空间上 PM_{2.5} 浓度较高的区域位于京津冀东南部, 而西北部的污染较弱, EOF 分解结果(图 4(a))和冬季气候平均的 PM_{2.5} 的空间分布(图 4(b))基本一致, 呈东南高西北低的空间分布特征。

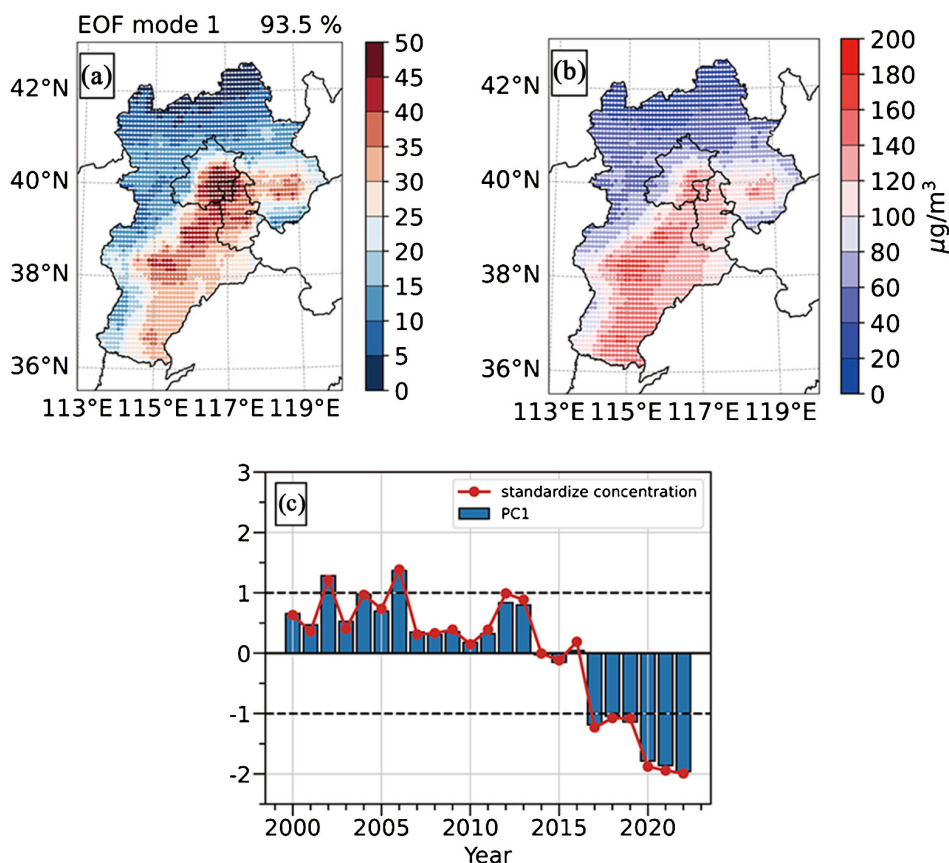


Figure 4. (a) EOF first spatial mode (EOF mode 1) of PM_{2.5} concentration (units: $\mu\text{g}/\text{m}^3$, shading) from 2000 to 2022 DJF, (b) Mean PM_{2.5} concentration (units: $\mu\text{g}/\text{m}^3$, shading) from 2000 to 2022 DJF, (c) Bar plot of first principal component (PC1) of PM_{2.5} concentration (units: $\mu\text{g}/\text{m}^3$) and standardize PM_{2.5} concentration interannual variability (curve) from 2000 to 2022 DJF

图 4. (a) 2000 年至 2022 年冬季(12 月、1 月、2 月) PM_{2.5} 浓度(单位: $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 填色)的第一空间模态(EOF mode 1); (b) 2000 年至 2022 年冬季(12 月、1 月、2 月)平均 PM_{2.5} 浓度(单位: $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 填色)的空间分布; (c) 2000 年至 2022 年冬季(12 月、1 月、2 月) PM_{2.5} 浓度(单位: $\mu\text{g}/\text{m}^3$)的第一主成分(PC1)柱状图和标准化 PM_{2.5} 浓度年际变率(曲线)

根据图 4(c), 从 EOF 分解的第一主成分(PC1; 柱状图)的分布可以发现, 京津冀地区 PM_{2.5} 浓度主要呈现出年际振荡减小的变化, 特别是在 2014 年以后京津冀整个区域 PM_{2.5} 浓度表现为明显的异常减小趋势, 反映了京津冀污染出现明显的年代际改善情况。将每年的京津冀平均 PM_{2.5} 浓度极端污染天数求和并标准化, 得到极端污染事件天数的年际变率(红色曲线)。相关分析表明, 该曲线与 PC1 的相关系数达 0.92, 远远超过了 99% 的显著性检验阈值, 说明京津冀地区污染的第一主模态时空特征主要由 PM_{2.5} 浓度所贡献。将年际变率高于 1 倍标准差的年份定义为高污染年, 即 2002 年, 2004 年和 2006 年。

4. 相关的大尺度天气异常环流特征

4.1. 高污染年冬季的大尺度环流特征

将高污染年冬季(2002年、2004年和2006年)与冬季气候态(2000年至2022年)做合成分析, 并进行显著性检验, 用于分析高污染年中气候因素对京津冀PM_{2.5}浓度的贡献。

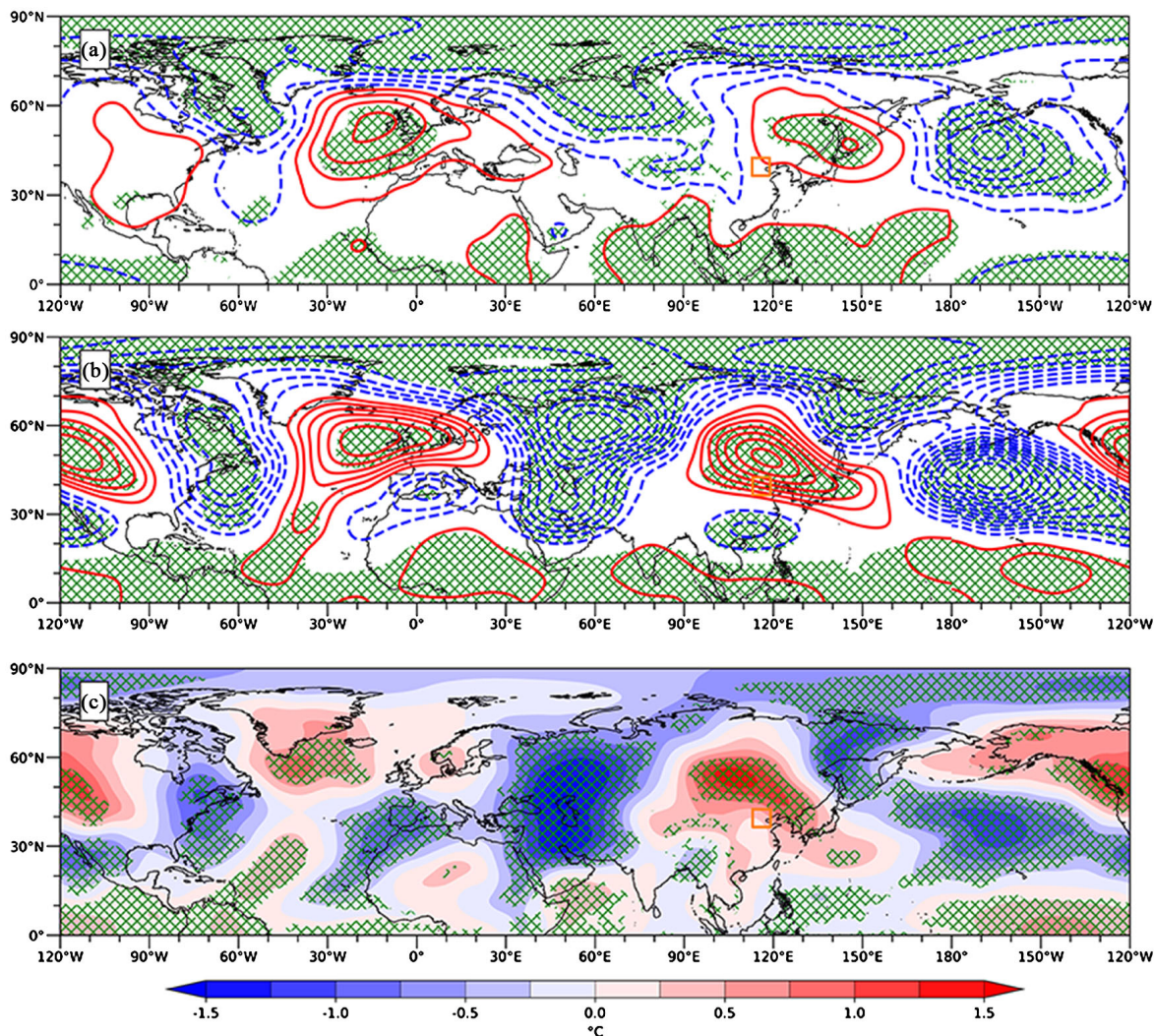


Figure 5. (a) Mean sea level pressure anomaly (unit: hPa, contour) on high pollution years (2002, 2004, 2006); (b) 500 hPa geopotential height anomaly (unit: dagpm, contour) on high pollution years (2002, 2004, 2006); (c) 850 hPa temperature anomaly (unit: °C, shading) on high pollution years (2002, 2004, 2006). Red lines denote positive values, blue lines denote negative values, the shaded area is the area that passes 95% student-t test, the orange square is the approximate position of BTH region

图 5. (a) 高污染年冬季(2002年、2004年、2006年)平均海平面气压距平(单位: hPa, 等值线); (b) 高污染年冬季(2002年、2004年、2006年) 500 hPa 平均位势高度距平(单位: dagpm, 等值线); (c) 高污染年冬季(2002年、2004年、2006年) 850 hPa 气温距平(单位: °C, 填色); 红线代表正值, 蓝线代表负值, 阴影区域为通过 95%显著性检验的区域, 橙色方框代表京津冀区域大致位置

海平面气压距平场(图 5(a))上最显著的特征为北半球高纬度的低压异常和横跨欧亚大陆的中纬度呈三波结构的异常高低压相间的波列分布, 三个高压异常中心分别位于北大西洋-北欧、东北亚日本海地

区和北美东部。东北亚地区为气压正距平中心, 京津冀以西为气压负距平中心。从北大西洋中部延伸至北太平洋的遥相关波列, 京津冀处于东北亚异常反气旋的南侧, 受异常高压控制。在 500 hPa 位势高度距平场上(图 5(b)), 北半球三波型的波列结构更加显著, 高、低压异常中心较气压场(图 5(a))上的异常中心略偏西, 呈准正压结构特征。京津冀地区处于东北亚异常反气旋的南侧, 其南部华南地区为异常气旋式环流, 呈现出北正南负的南北偶极型异常分布, 根据地转风关系, 表明该地区的西风异常减弱。低空大气 850 hPa 气温距平场(图 5(c))也呈现出与高空位势高度场相对应的冷槽(低压)暖脊(高压)的热力结构特征, 京津冀地区处于暖高压的南侧。总体上而言, 京津冀地区极端污染事件高发年的冬季北半球中纬度呈三波型的异常波列分布, 但定常波的位置与冬季平均三大槽脊的位置有明显位相差, 特别是东亚地区东北亚异常暖高压减弱了东亚大槽, 使京津冀地区西风减弱, 不利于污染扩散。

4.2. 极端污染事件相关的大尺度天气异常环流特征

为了分析极端污染事件发生时大尺度天气异常环流的特征, 合成 135 个极端污染日的大气环流场, 并进行显著性检验。结果表明, 高空 500 hPa 位势高度距平场(图 6(b))最显著的特征是北半球中高纬度横贯大西洋和太平洋的正负相间的大气遥相关波列, 从格陵兰 - 加拿大群岛一带出发, 经过北欧海、西伯利亚、东北亚地区, 直到北太平洋中纬度区域, 形成一支几乎绕地球一圈的“负 - 正 - 负 - 正 - 负”有 5 个异常中心的类环流遥相关波列[12]。

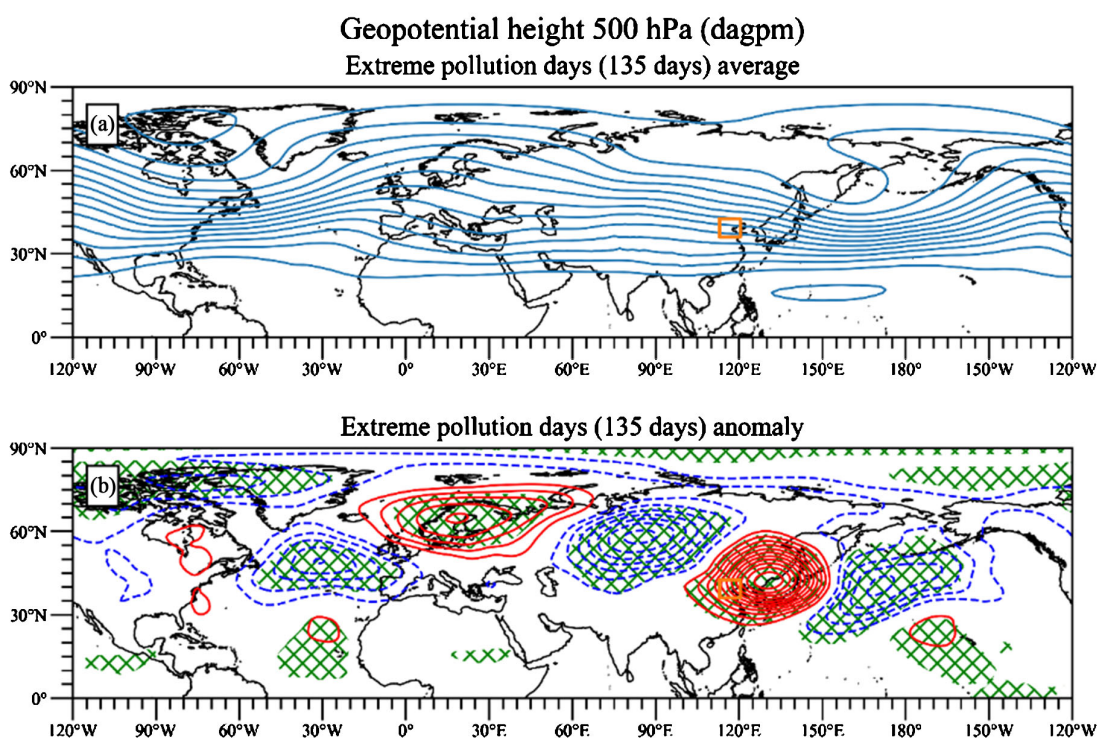


Figure 6. (a) 500 hPa geopotential height average (unit: dagpm, contour) on 135 extreme pollution days; (b) 500 hPa geopotential height anomaly (unit: dagpm, contour) on 135 extreme pollution days. Red lines denote positive values, blue lines denote negative values, the shaded area is the area that passes 95% student-t test, the orange square is the approximate position of BTJ region

图 6. (a) 135 个极端污染日的 500 hPa 平均位势高度(单位: dagpm, 等值线); (b) 135 个极端污染日的 500 hPa 位势高度距平(单位: dagpm, 等值线), 红线代表正值, 蓝线代表负值, 阴影区域为通过 95% 显著性检验的区域, 橙色方框代表京津冀区域大致位置

该波列在对流层 850 hPa 气温场(图 7(b))也存在, 表现出中纬度 Rossby 长波的斜压结构特征, 即温度场的异常冷暖中心落后于高度场相应的低压或高压异常中心, 海平面气压场上的波列中心均在高空 500 hPa 波列中心的东侧, 即从对流层低空到高空呈现出西倾斜结构。京津冀地区处于东北亚异常反气旋环流的西侧偏南风气流中, 而欧亚大陆中西部处于低温异常的控制下, 东北亚为显著的高温异常, 表明反气旋式异常的发展较深厚, 京津冀地区为气温正异常。

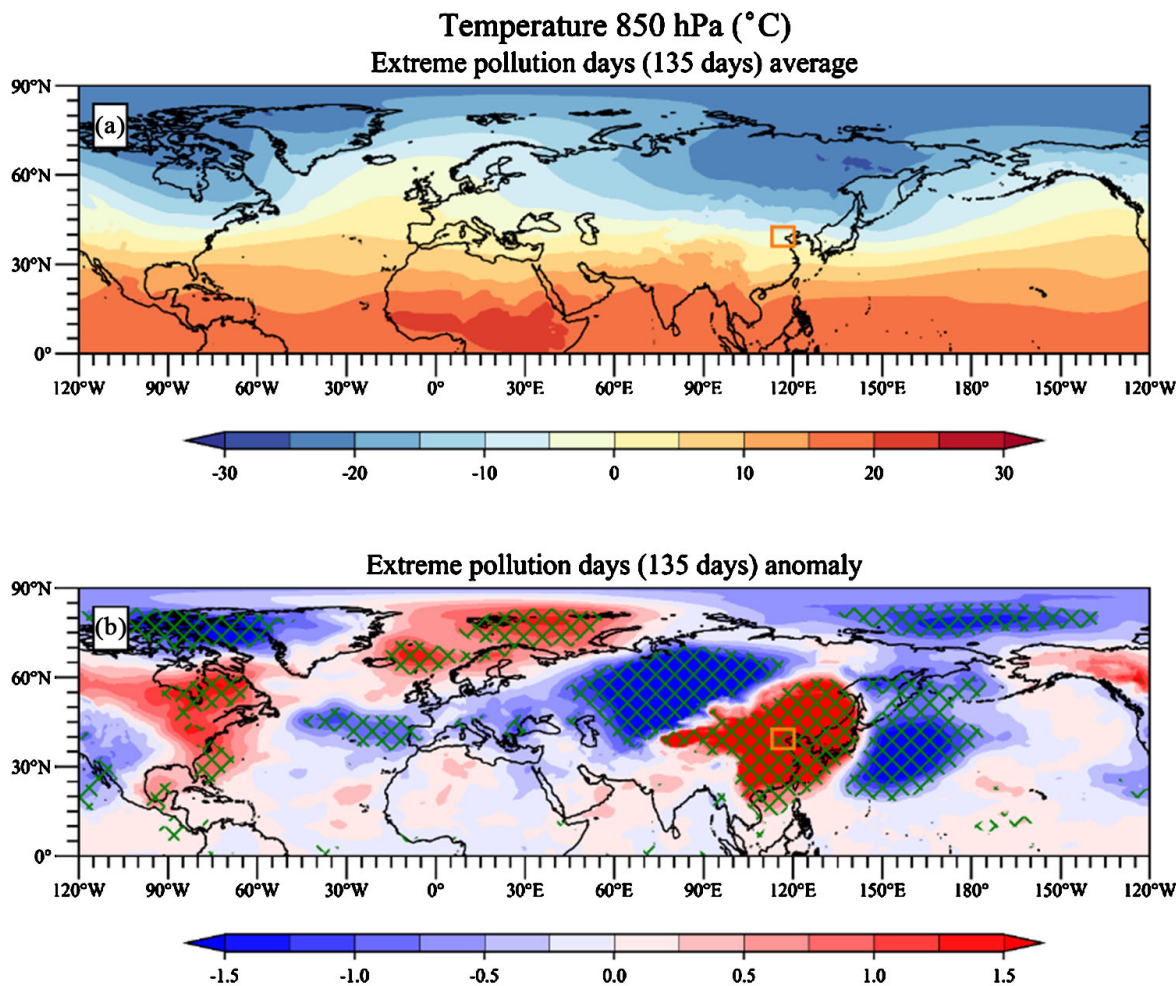


Figure 7. (a) 850 hPa temperature average (unit: °C, contour) on 135 extreme pollution days; (b) 850 hPa temperature anomaly (unit: °C, contour) on 135 extreme pollution days. The shaded area is the area that passes 95% student-t test, the orange square is the approximate position of BTH region

图 7. (a) 135 个极端污染日的 850 hPa 平均气温(单位: °C, 填色); (b) 135 个极端污染日的 850 hPa 气温距平(单位: °C, 等值线), 阴影区域为通过 95% 显著性检验的区域, 橙色方框代表京津冀区域大致位置

由图 8 位势高度距平的纬向剖面(36.5°N 至 42°N 平均, 即京津冀地区纬度范围平均), 京津冀处于深厚反气旋式环流的控制下, 京津冀东侧为气旋式环流异常, 中纬度波列呈现出典型的西倾斜压结构, 对流层中层环流形势稳定。而根据气温场的垂直结构(图 8(b)), 京津冀地区对流层中下层均处于高温异常控制下, 高温异常从近地面 1000 hPa 延伸至 500 hPa, 表明对流层中下部的逆温显著, 大气稳定度增加, 不利于污染物扩散和稀释; 在京津冀地区, 垂直速度为负距平(图 8(c)), 表明在极端污染期间, 垂直运动被抑制, 不利于污染物扩散。

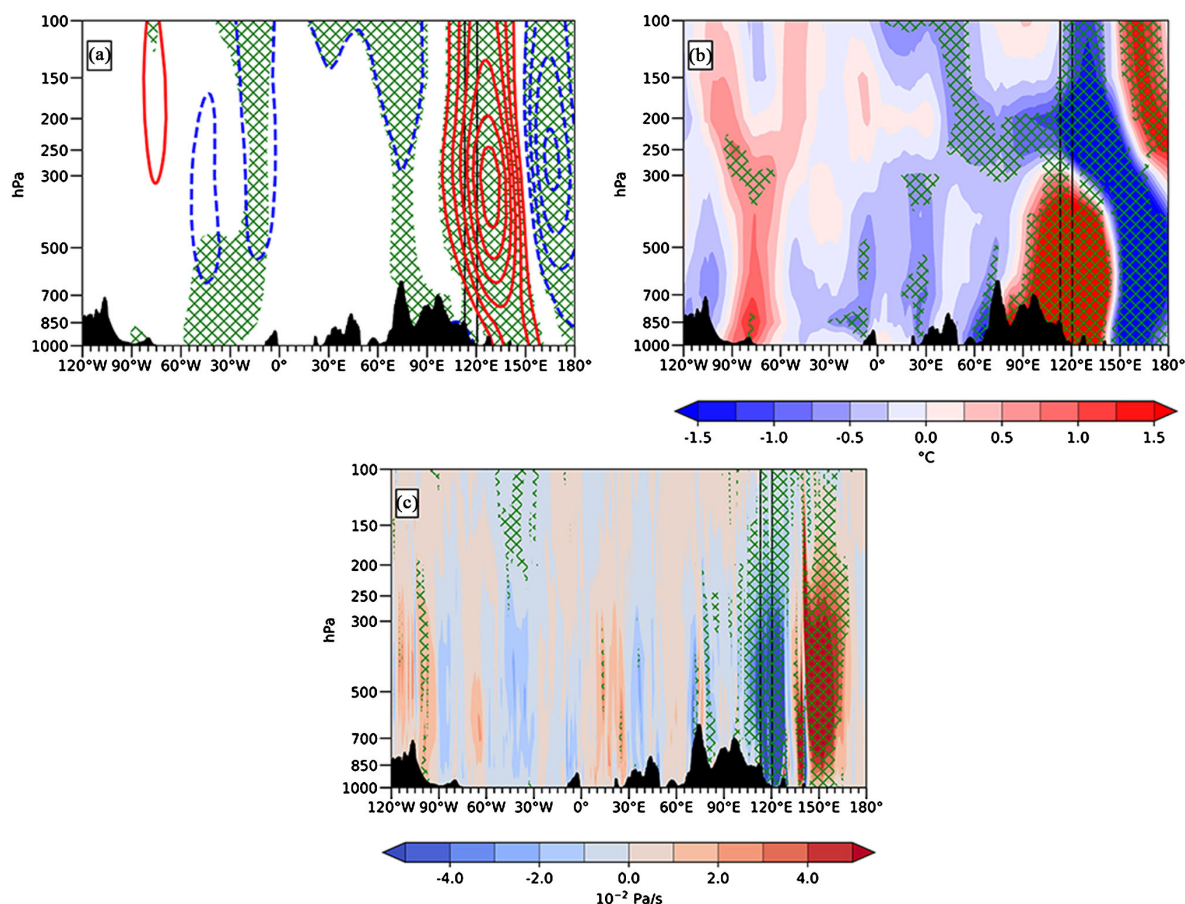


Figure 8. Zonal section (from 36.5°N to 42°N average) (a) Geopotential height anomaly (unit: dagpm, contour) on 135 extreme pollution days; (b) Temperature anomaly (unit: °C, shading) on 135 extreme pollution days; (c) Vertical velocity anomaly (unit: 10^{-2} Pa/s, shading) on 135 extreme pollution days; The shaded area is the area that passes 95% student-t test, the black lines is the approximate position of BTH region

图 8. 纬向剖面(36.5°N 至 42°N 平均) (a) 135 个极端污染日的位势高度距平(单位: dagpm, 等值线); (b) 135 个极端污染日的气温距平(单位: °C, 填色); (c) 135 个极端污染日的垂直速度距平(单位: 10^{-2} Pa/s, 填色); 阴影区域为通过 95% 显著性检验的区域, 黑色直线代表京津冀区域大致位置

5. 结论和展望

(1) 污染主要发生在京津冀东南部和中部, 西北部和西部较少, 空间上呈东高西低的分布。PM_{2.5} 浓度呈显著的年代际差异, 以 2014 年为界, 2014 年之前 PM_{2.5} 浓度较高, 而 2014 年后 PM_{2.5} 浓度逐渐降低; 利用百分位阈值法筛选出 135 个极端污染事件, 极端污染事件的时长平均值为 2.3 天, 标准差为 1.7 天; 2014 年后极端污染过程发生的个数较 2014 年之前减少, 并逐年递减。

(2) 在高污染年冬季, 京津冀地区处于阿留申低压异常的外围和高纬度高压异常的南侧, 西伯利亚高压偏弱, 来自高纬度的冷空气较少输送至京津冀地区, 对流层低层气温升高, 形成了静稳的大气环境, 不利于污染物扩散; 根据地转关系, 偏东风和东南风异常, 有利于将海上水汽输送至京津冀地区, 促进京津冀地区气溶胶的吸湿增长。

(3) 在 135 个极端污染日期间, 对流层上层存在由北大西洋传播至北太平洋的遥相关波列, 东亚地区为异常反气旋环流, 而京津冀地区处于反气旋异常控制下, 对流层中下层逆温显著, 大气层结稳定, 不利于京津冀地区污染物扩散和稀释; 东风和东南风异常为主, 将海上水汽输送至京津冀地区, 促进对流层

中下层相对湿度增加, 促进京津冀地区气溶胶吸湿增长, 上述过程将共同促进京津冀地区污染形势加剧。

受限于资料时间长度, 本文选取了 2000 年至 2022 年冬季的 PM_{2.5} 数据, 在后续的研究中, 应采用更长时间尺度的数据和资料, 以更好地反映京津冀污染天气的气候态特征。对大气如何强迫遥相关波列、激发东北亚反气旋异常的机制认识不充分, 后续研究应结合数值模式, 开展与遥相关波列相关的敏感性试验, 分析遥相关的建立机制。

致 谢

感谢中国海洋大学海洋高等研究院大数据中心高性能计算集群提供数据存储和算力支撑。

基金项目

国家自然科学基金(42075024); 山东省自然科学基金重大基础研究项目(ZR2019ZD12)。

参考文献

- [1] Hou, X., Zhu, B., Kumar, K.R., Leeuw, G., Lu, W., Huang, Q. and Zhu, X. (2020) Establishment of Conceptual Schemas of Surface Synoptic Meteorological Situations Affecting Fine Particulate Pollution across Eastern China in the Winter. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, **125**, e2020JD033153. <https://doi.org/10.1029/2020JD033153>
- [2] Lu, S., He, J., Gong, S. and Zhang, L. (2020) Influence of Arctic Oscillation Abnormalities on Spatio-Temporal Haze Distributions in China. *Atmospheric Environment*, **223**, Article ID: 117282. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2020.117282>
- [3] Chen, Z., Chen, D., Zhao, C., et al. (2020) Influence of Meteorological Conditions on PM_{2.5} Concentrations across China: A Review of Methodology and Mechanism. *Environment International*, **139**, Article ID: 105558. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.105558>
- [4] Mei, M., Ding, Y., Wang, Z., Liu, Y. and Zhang, Y. (2022) Effects of the East Asian Subtropical Westerly Jet on Winter Persistent Heavy Pollution in the Beijing-Tianjin-Hebei Region. *International Journal of Climatology*, **42**, 2950-2964, <https://doi.org/10.1002/joc.7400>
- [5] Zhang, Y., Yin, Z. and Wang, H. (2020) Roles of Climate Variability on the Rapid Increases of Early Winter Haze Pollution in North China after 2010. *Atmospheric Chemistry and Physics*, **20**, 12211-12221. <https://doi.org/10.5194/acp-20-12211-2020>
- [6] An, X., Sheng, L., Liu, Q., Li, C., Gao, Y. and Li, J. (2020) The Combined Effect of Two Westerly Jet Waveguides on Heavy Haze in the North China Plain in November and December 2015. *Atmospheric Chemistry and Physics*, **20**, 4667-4680. <https://doi.org/10.5194/acp-20-4667-2020>
- [7] An, X., Chen, W., Hu, P., Chen, S. and Sheng, L. (2022) Intraseasonal Variation of the Northeast Asian Anomalous Anticyclone and Its Impacts on PM_{2.5} Pollution in the North China Plain in Early Winter. *Atmospheric Chemistry and Physics*, **22**, 6507-6521. <https://doi.org/10.5194/acp-22-6507-2022>
- [8] Cohen, J., Screen, A.J., Furtado, C.J., et al. (2014) Recent Arctic Amplification and Extreme Mid-Latitude Weather. *Nature Geoscience*, **7**, 627-637. <https://doi.org/10.1038/ngeo2234>
- [9] Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., et al. (2020) The ERA5 Global Reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, **146**, 1999-2049. <https://doi.org/10.1002/qj.3803>
- [10] Geng, G., Xiao, Q., Liu, S., et al. (2021) Tracking Air Pollution in China: Near Real-Time PM_{2.5} Retrievals from Multisource Data Fusion. *Environmental Science & Technology*, **55**, 12106-12115. <https://doi.org/10.1021/acs.est.1c01863>
- [11] Xiao, Q., Zheng, Y., Geng, G., et al. (2021) Separating Emission and Meteorological Contributions to Long-Term PM_{2.5} Trends over Eastern China during 2000-2018. *Atmospheric Chemistry and Physics*, **21**, 9475-9496. <https://doi.org/10.5194/acp-21-9475-2021>
- [12] Xiao, Q., Geng, G., Cheng, J., et al. (2021) Evaluation of Gap-Filling Approaches in Satellite-Based Daily PM_{2.5} Prediction Models. *Atmospheric Environment*, **244**, Article ID: 117921. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2020.117921>
- [13] Richman, M.B. (1981) Obliquely Rotated Principal Components: An Improved Meteorological Map Typing Technique? *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, **20**, 1145-1159. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1981\)020<1145:ORPCAI>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1981)020<1145:ORPCAI>2.0.CO;2)