Climate Change Research Letters 气候变化研究快报, 2017, 6(5), 352-361
Published Online November 2017 in Hans. http://www.hanspub.org/journal/ccrl
https://doi.org/10.12677/ccrl.2017.65037

The Mechanism of Haze over the Beijing-Tianjin-Hebei Region and Its Relationship with Eurasian Wave Trains

Xuwen Zhou[1], Shiru Han[1], Jinlong Zhang[1], Chang Quan[2], Shaojing Che[1], Yuanyuan Jing[1]

[1]Hebei Climate Center, Shijiazhuang Hebei
[2]Hebei Provincial Institute of Meteorology, Shijiazhuang Hebei
Email: hbszxwgood@163.com

Received: Nov. 11th, 2017; accepted: Nov. 23rd, 2017; published: Nov. 30th, 2017

Abstract

Based on the NCEP/NCAR Reanalysis data and the haze data of Beijing-Tianjin-Hebei (BTH) region, the circulation of haze abnormal years over the Beijing-Tianjin-Hebei region is classified by cluster analysis and other statistical methods. The results show that two mainly modes of wave trains distribution over Eurasia at 500 hPa circulation field will result in haze abnormal of Beijing-Tianjin-Hebei region in January. Their variance contribution reaches 0.9. This study focuses on two modes of Eurasian wave trains distribution and the formation mechanism of haze over the Beijing-Tianjin-Hebei region; it shows that the characteristics of the polar atmospheric surface layer temperature determine that of the mid-high latitude atmosphere circulation. When the polar surface layer temperature is on the low side, the polar vortex is strong, there will be a "+ − +" anomaly distribution from west to east over the Eurasian continent, the haze weather over the Beijing-Tianjin-Hebei region will be more, and vice versa; When the temperature from the Greenland Sea to the Barents Sea region is on the high side, there will be a "+ − +" anomaly distribution from northwest to southeast over the Eurasian continent, the haze weather over the Beijing-Tianjin-Hebei region will be more, and vice versa.

Keywords

Haze, Eurasian Wave Trains, Formation Mechanism, Beijing-Tianjin-Hebei Region

欧亚波列与京津冀雾霾的关系及形成机制

周须文[1]，韩世茹[1]，张金龙[1]，权　畅[2]，车少静[1]，井元元[1]

[1]河北省气候中心，河北　石家庄
[2]河北省气象科学研究所，河北　石家庄
Email: hbszxwgood@163.com

文章引用: 周须文, 韩世茹, 张金龙, 权畅, 车少静, 井元元. 欧亚波列与京津冀雾霾的关系及形成机制[J]. 气候变化研究快报, 2017, 6(5): 352-361. DOI: 10.12677/ccrl.2017.65037

收稿日期：2017年11月11日；录用日期：2017年11月23日；发布日期：2017年11月30日

摘　要

利用NCEP/NCAR再分析资料和京津冀雾霾资料，采用聚类分析等统计方法对京津冀雾霾异常年环流场进行了分类，发现导致1月京津冀雾霾异常的欧亚大陆500 hPa环流场主要是两个模态的波列分布，方差贡献为0.9。重点讨论了两个模态欧亚波列分布及对应京津冀雾霾异常的形成机制，表明极地近地面层的温度特征决定了中高纬度大气的环流特征。当极区气温偏低时，极涡偏强，欧亚大陆形成东-西向“正、负、正”距平波列，京津冀雾霾天气偏多；反之，则偏少。当格陵兰海到巴伦支海区域气温偏高时，欧亚大陆为西北—东南向“正、负、正”距平波列，京津冀雾霾天气偏多；反之，则偏少。

关键词

雾霾，欧亚波列，形成机制，京津冀

1. 引言

近几年雾霾问题成了百姓的痛点，尤其是京津冀区域的雾霾严重地影响了民众的生活质量，已成为世界关注的焦点。近年来国内学者针对雾霾进行了大量研究工作，研究结果表明雾霾显著增加主要受到以下两个因素影响：一是人类活动导致大气污染物排放量增加，这为霾的形成提供了物质条件；二是天气气候条件的变化，是雾霾形成的外界自然条件。已有的研究主要针对雾霾的气候特征[1]-[9]、雾霾天气成因[10]-[17]和数值模拟[18]等方面，为雾霾的短期预报提供了科技支撑。而对雾霾的长期气候预测方面研究较少，本文力求从大气环流背景场入手，研究京津冀区域雾霾异常的大气环流特征及形成机制，为京津冀区域雾霾的长期预测提供科学依据。

2. 资料与方法

采用 1981~2015 年 NCEP/NCAR 全球再分析的月平均 17 层水平风场、位势高度场、海平面气压场以及温度场资料，空间分辨率为 2.5˚ × 2.5˚；京津冀区域 169 个气象站 1981~2015 年 1 月逐日雾、霾、能见度、气温、降水、湿度资料。

雾霾日数的统计方法：雾和霾均是在大气静稳条件下形成的，且雾和霾可以在同一天出现，在有雾霾的时段里，大气中的污染物难以扩散，会造成视程距离缩短，因此雾霾日数的统计标准，以能见度资料为基础，结合天气现象，排除降水、沙尘暴、扬沙、浮尘、吹雪、雪暴等现象对视程的影响，将单站能见度在 5.0 km 及以下的日期记为单站雾霾日。排除某些区域异常的污染物排放造成的雾霾现象，充分体现静稳天气引起的雾霾天气，把在 11 个站以上出现雾霾的日期定为本文研究的雾霾日。

本文采用相关分析、聚类分析、合成分析等统计方法[19]对资料进行了分析。

3. 环流因子构建

为了准确找出雾霾异常的大气环流背景特征，首先对 1981~2015 年 1 月雾霾日数与 500 hPa 高度场进行相关分析(图 1)。可以看到，雾霾日数与中高纬度地区高度场联系较为密切，存在 4 个高相关区。其

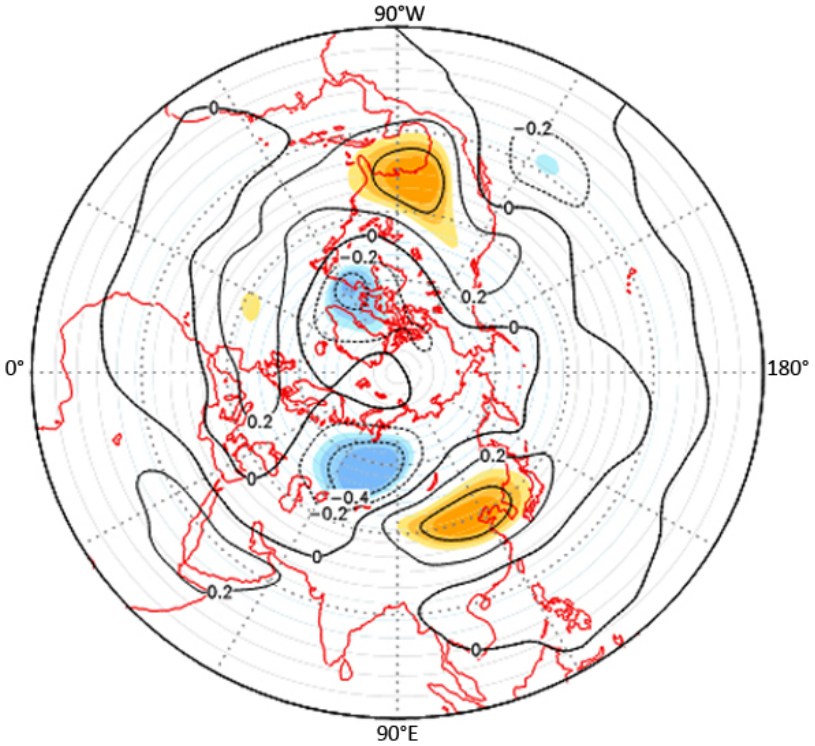


Figure 1. Correlation coefficient distribution of Haze and 500 hPa height field in January
图 1. 1 月雾霾与 500 hPa 高度场相关分布图

中，位于戴维斯海峡地区的负相关区与 1 月份北半球较强极涡活跃区位置吻合，在遥相关作用下，西半球极涡会影响京津冀区域雾霾天气过程。华北正相关区、北美正相关区分别位于东亚大槽和北美大槽的上游区域，西西伯利亚负相关区位于欧亚大陆脊的上游区域，表明中纬度环流异常对京津冀区域雾霾有直接影响。由此可知，京津冀区域雾霾主要与极涡及中高纬度环流有关。

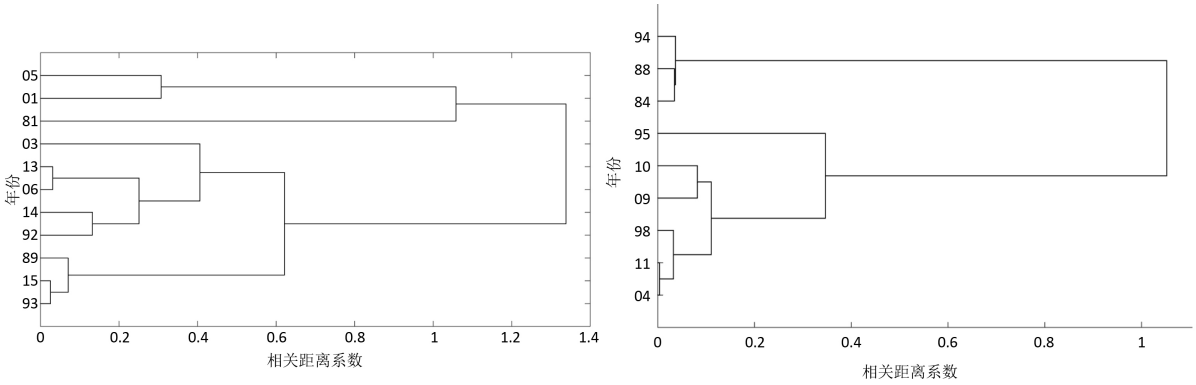
提取这 4 个相关区域中通过 0.05 显著性水平检验的格点值，分别计算各区域平均值作为环流因子，用于对 500 hPa 高度场的聚类分析。

4. 大气环流分类

4.1. 聚类分析

为了找出雾霾异常年的典型大气环流特征，对 1981~2015 年中的雾霾偏多年和偏少年进行环流分型，环流分型采用系统聚类法中的类平均法，聚类分析的相似性度量指标采用变量间相关距离系数。雾霾偏多年和偏少年的选取：选取 1981~2015 年中雾霾日数距平绝对值 > 3 天的雾霾日数异常年份，其中有 9 个偏少年(1984、1988、1994、1995、1998、2004、2009、2010、2011 年)和 11 个偏多年(1981、1989、1992、、1993、2001、2003、2005、2006、2013、2014、2015 年)，分别对 1 月雾霾偏多年和偏少年份的 500 hPa 高度场进行聚类分析，结果见图 2。

多雾霾年的大气环流背景比较复杂(图 2(a))，可提取出两类典型场(相关距离系数 < 0.3)，分别是 A1 类：1989、1993 和 2015 年，A2 类：1992、2006、2013 和 2014 年。少雾霾年的聚类结果(图 2(b))较好，可以明显看出有两类典型的环流场(相关距离系数 < 0.2)，分别是 B1 类：2004、2011、1998、2009 和 2010 年，B2 类：1984、1988 和 1994 年。



(a) (b)

Figure 2. Clustering tree diagram of 500 hPa height field in haze abnormal years ((a) more haze years, (b) less haze years)
图 2. 雾霾异常年 500 hPa 高度场聚类树形图((a) 偏多年，(b) 偏少年)

4.2. 环流场的 EOF 分解

为了区分不同类型环流场对京津冀区域雾霾的相对贡献，应用构建的 4 个环流因子对 1981~2015 年 500 hPa 环流场进行了 EOF 分解，得到第一模态的方差贡献率为 0.61，第二模态的方差贡献率为 0.29，前两个模态的方差贡献达到 0.9。表明京津冀区域 1 月雾霾异常的典型环流主要有两类分布型。

对第一模态时间系数和 1 月雾霾距平进行相关分析，二者具有明显的负相关，相关系数为−0.6。由图 3 看到：雾霾偏多年的 A1 类年份(1989、1993 和 2015 年)对应时间系数负的较大值，雾霾偏少年的 B1 类年份(1998、2004、2009、2010 和 2011 年)对应时间系数正的较大值。表明雾霾偏多年 A1 类和偏少年 B1 类环流场具有反位相特征，属于第一模态的环流场。

对第二模态时间系数和 1 月雾霾距平进行相关分析，二者是正相关关系。分析第二模态时间系数和 1 月雾霾距平的时间序列分布(图 4)，雾霾偏多年的 A2 类年份(1992、2006、2013 和 2014 年)都对应较大的第二模态时间系数正值，雾霾偏少年的 B2 类年份(1984、1988 和 1994 年)对应较大的第二模态时间系数负值，显然 A2 类和 B2 类环流场也具有反位相特征，属于第二模态的环流场。

5. 雾霾异常年的典型环流特征及其形成机制

根据对 500 hPa 高度场 EOF 分解和雾霾异常年聚类分析，把雾霾偏多年 A1 类和偏少年 B1 类的合成场作为第一模态场，把雾霾偏多年 A2 类和偏少年 B2 类的合成场作为第二模态场，找出其典型特征，分析其成因。

5.1. 第一模态环流特征及形成机制

5.1.1. 第一模态环流特征

雾霾偏多年：从 500 hPa 高度距平场来看(图 5(a))，极区是负距平，表明极涡较常年偏强。中纬度欧亚大陆距平呈东西向的“正、负、正”波列分布，欧洲西部为正距平，表明西欧沿岸脊[20]偏强，乌拉尔山到青藏高原为负距平，表明欧洲东部槽偏强，青藏高原北部脊偏弱；日本岛到我国东海为正距平，表明东亚大槽偏弱。亚洲槽脊偏弱，中纬度环流平直，不利于京津冀区域污染物扩散，雾霾日数偏多。

雾霾偏少年的环流特征与偏多年基本相反。在极区(图 5(b))是正距平，极涡浅、范围大。中纬度欧亚大陆距平呈东西向的“负、正、负”波列分布，90˚E 以西为正距平、以东为负距平，表明欧洲槽偏弱、偏西，亚洲脊偏强偏西，蒙古地区的负距平，表明亚洲中高纬度环流的经向度较大，有利于较强的冷空气向华北入侵，对京津冀区域污染物有较好的稀释扩散作用，不易形成雾霾天气。

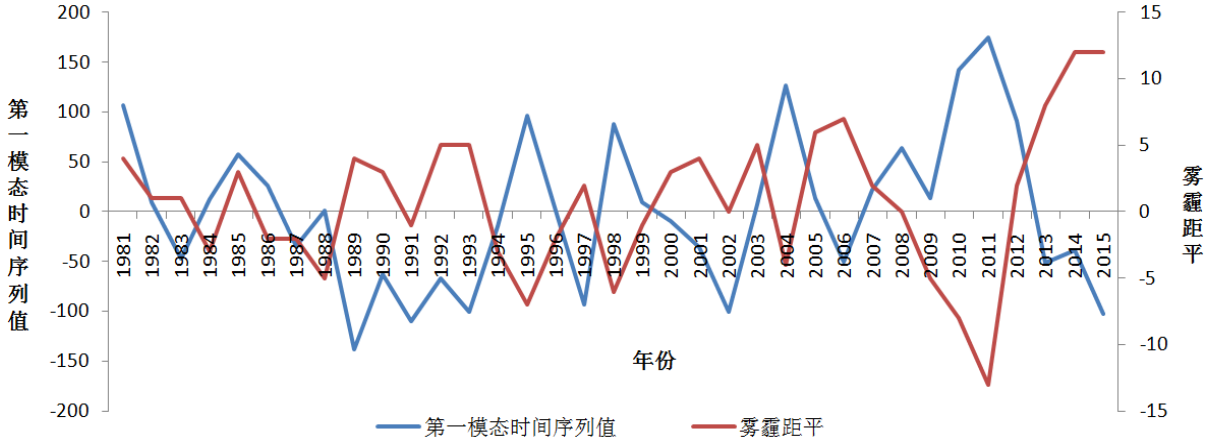


Figure 3. Time series of PC1 and haze abnormal in January
图 3. 第一模态时间系数和 1 月雾霾距平时间序列分布图

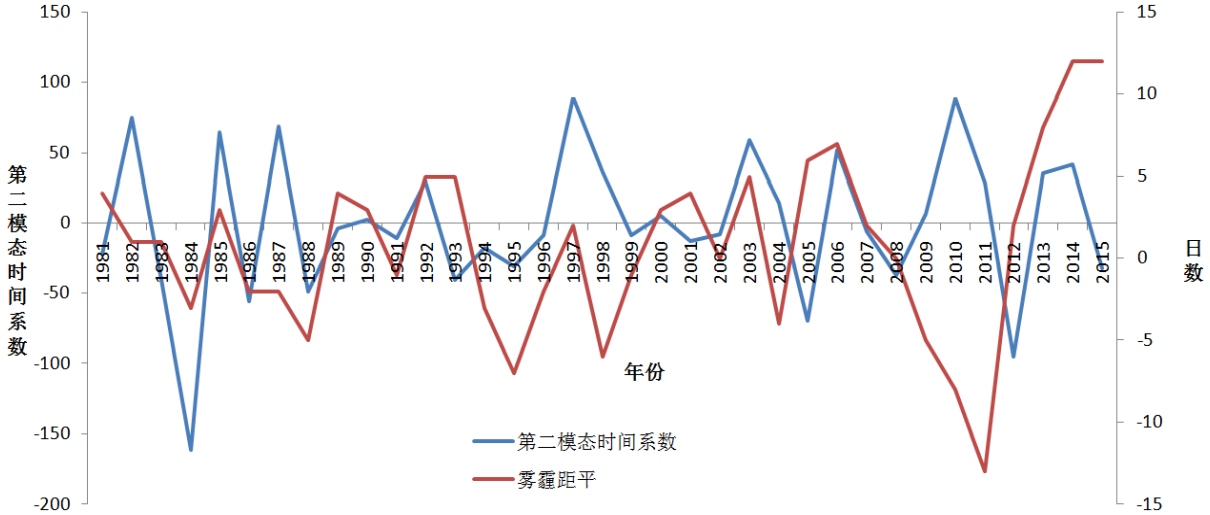


Figure 4. Time series of PC2 and haze abnormal in January
图 4. 第二模态时间系数和 1 月雾霾距平时间序列分布图

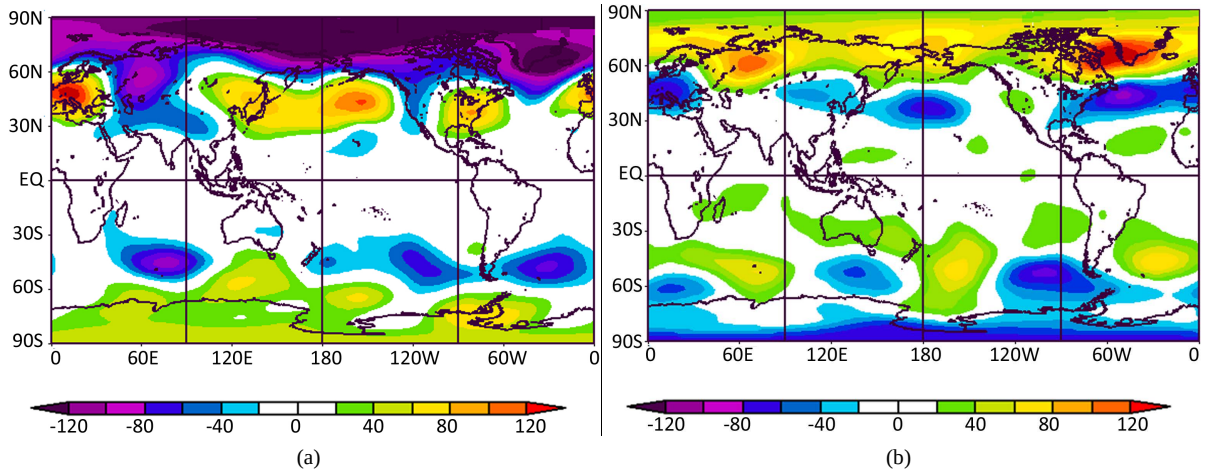


Figure 5. 500 hPa height anomaly field of PC1 ((a) more haze years, (b) less haze years)
图 5. 第一模态 500 hPa 高度距平场((a) 偏多年，(b) 偏少年)

5.1.2. 第一模态环流的形成机制

雾霾偏多年：在近地面温度距平场(图 6(a))上，极区是明显的负距平，表明极区气温较常年偏低。随着高度升高极涡加深，水平辐合增大[21]。在地转偏向力作用下，环绕极区的西风气流增强(图 7(a))，极区冷空气不易向中高纬度扩散。由于极地冷空气南下势力较弱，亚洲中高纬度地区温度较常年偏高(图 6(a))，经向温度梯度减小，对流层大气斜压性减弱，纬向风垂直切变减小，导致欧亚中高纬度高空西风环流异常偏弱[22] (图 7(a))。在 500 hPa 经向风距平场上(图 7(b))，从西西伯利亚平原到我国东部沿海为明显的经向风正距平，表明该区域北风较常年偏弱，即冷空气势力较弱。亚洲中纬度地区无论纬向风还是经向风均较常年偏弱，高空动量下传较小，大气处于稳定状态，有利于京津冀区域雾霾天气的形成。

雾霾偏少年：近地面温度距平图上(图 6(b))，在极区温度以正距平为主，表明极区的温度较常年偏高。

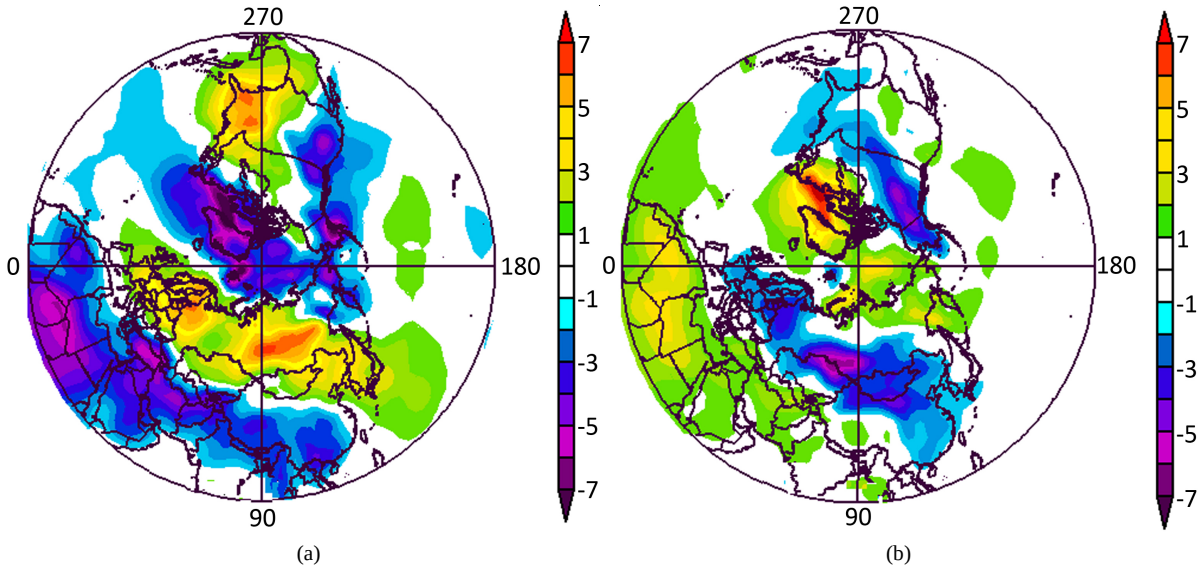


Figure 6. Surface temperature anomaly field of PC1 ((a) more haze years, (b) less haze years)
图 6. 第一模态近地面温度距平场((a) 偏多年，(b) 偏少年)

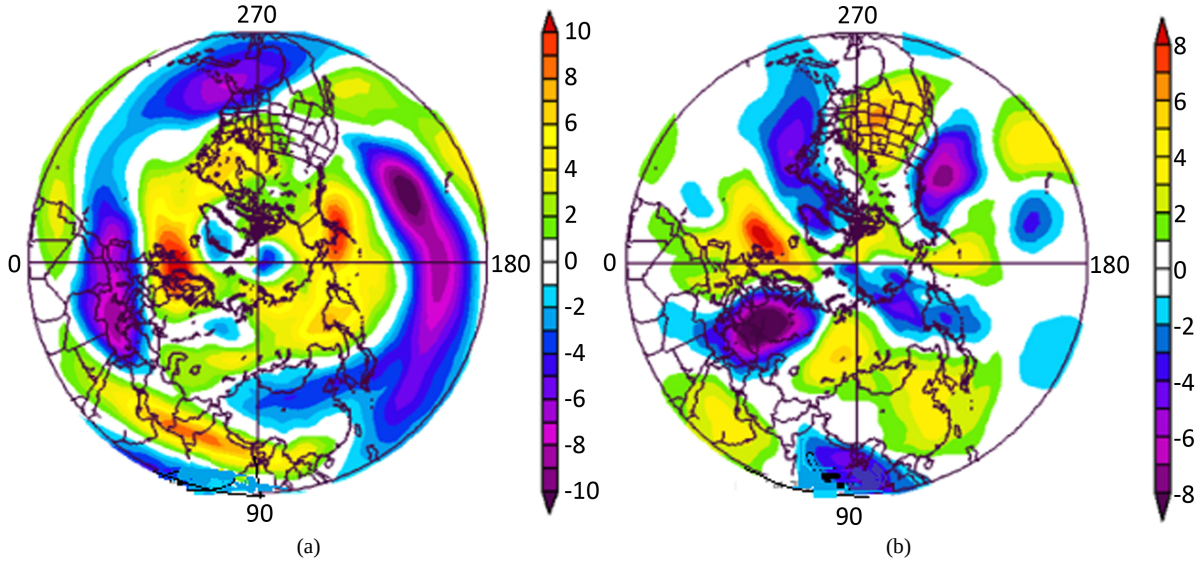


Figure 7. 500 hPa wind anomaly field of PC1 in more Haze years ((a) zonal wind, (b) meridional wind)
图 7. 第一模态雾霾偏多年 500 hPa 风距平场((a) 纬向风，(b) 经向风)

由静力学方程可知，极地低压虽高度减弱，极涡中心变浅，在某一高度极地的冷性涡旋分裂并偏离极地向南移动，导致锋区位置比平均状况偏南。在 500 hPa 纬向风距平图(图 8(a))上可以看到，欧亚高纬地区为负距平，西风偏弱；在我国 40˚N 附近为正距平，西风偏强。由于在中高纬地区平均经圈环流很弱，地球角动量守恒主要靠大型涡旋进行。由巴伦支海到西西伯利亚为经向风负距平，新西伯利亚群岛到鄂霍次克海为经向风正距平(图 8(b))可知，在蒙古一带多气旋活动。极地冷空气随着蒙古气旋的生成和移动向中高纬度扩散，使亚洲中纬度地区对流层温度经向梯度增大，对流层大气斜压性增强，引起对流层大气的不稳定。不稳定大气有利于高空干冷空气的下沉扩散，不利于雾霾天气形成。

5.2. 第二模态环流场特征及形成机制

5.2.1. 第二模态环流特征

雾霾偏多年：在 500 hPa 高度距平场(图 9(a))上，欧亚地区呈西北—东南向的“正、负、正”波列分布。贝加尔湖西北部是以西西伯利亚为中心，呈明显的东北—西南向带状结构的负距平区，表明欧洲槽偏东、偏强，亚洲高纬地区高度场偏低；贝加尔湖东南部是以我国东北部为中心，呈西北—东南向结构正距平区，表明亚洲中纬度脊前槽后高度场偏高，环流经向度较小，不利于冷空气南下影响我国。

在雾霾偏少年(图 9(b))，在欧亚地区呈西北—东南向的“负、正、负”波列分布。欧洲东部为正距平，表明欧洲槽偏弱，不利于极地冷空气大规模向欧洲入侵；亚洲中高纬地区为负距平，表明东亚大槽偏强、偏西，亚洲中高纬环流经向度大，冷空气活动频繁，有利于冷空气向我国入侵，干冷空气下沉有利于大气污染物的扩散。

5.2.2. 第二模态环流的形成机制

雾霾偏多年的近地面温度距平场(图 10(a))上，在格陵兰海到巴伦支海区域为明显的正温度距平，由于该区域气压随高度下降较四周慢，到一定高度形成高压，在其周围形成反气旋环流。在 500 hPa 风矢量距平图上(图 11(a))可以明显看出，在其左侧格陵兰海区域为较强的南风距平，右侧新地岛到东欧平原为较强的东北风距平，表明西欧沿岸脊偏西、偏北、偏强，脊前较强的偏北气流把极地的冷空气向欧洲大陆输送，在西西伯利亚平原上空形成较强冷气旋。在气旋辐合和地转偏向力作用下，在巴尔喀什湖一

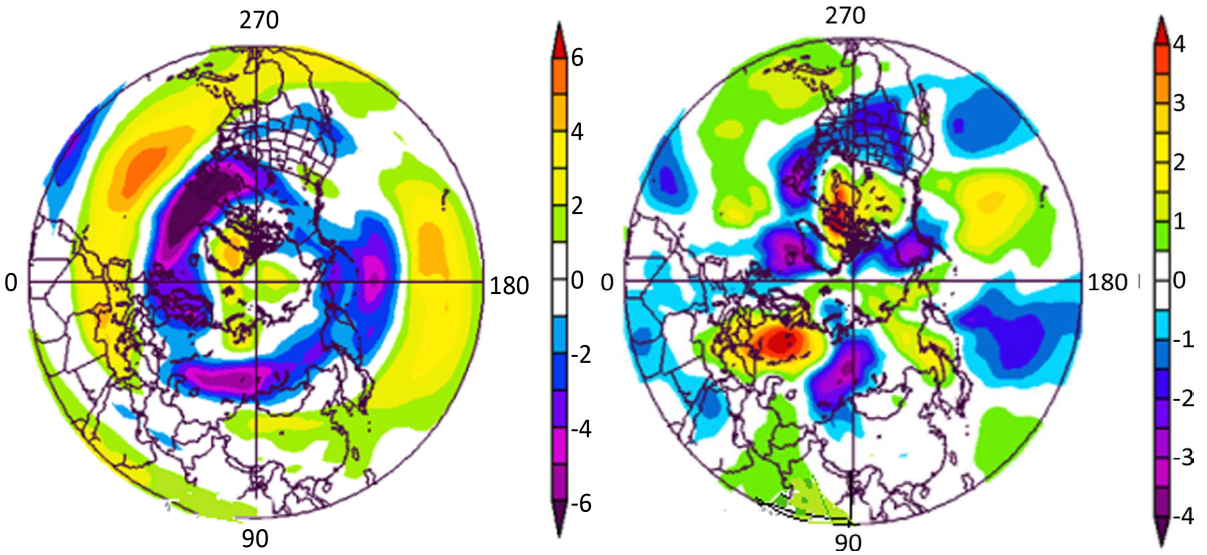


Figure 8. 500 hPa wind anomaly field of PC1 in less Haze years ((a) zonal wind, (b) meridional wind)
图 8. 第一模态雾霾偏少年 500 hPa 风距平场((a) 纬向风，(b) 经向风)

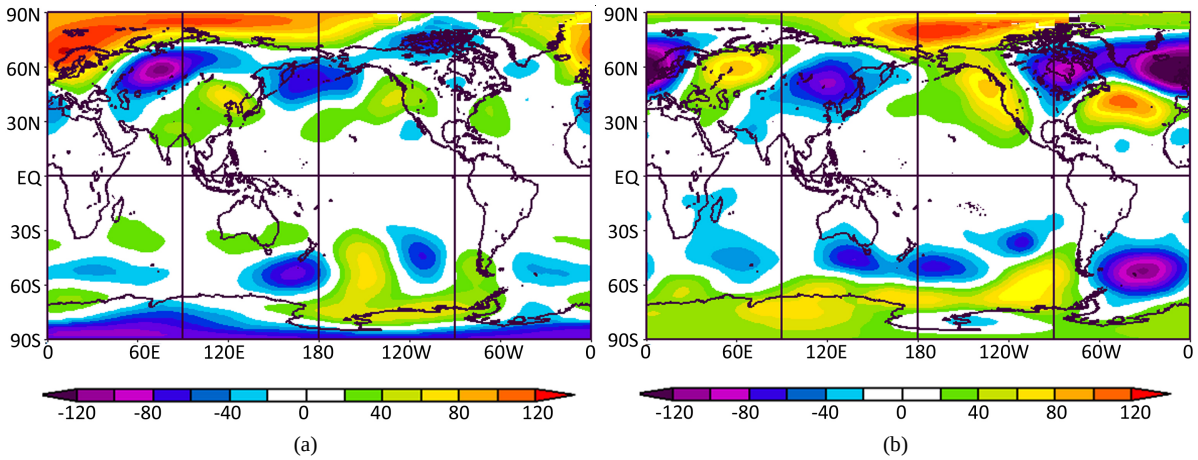


Figure 9. 500 hPa height anomaly field of PC2 ((a) more haze years, (b) less haze years)
图 9. 第二模态 500 hPa 高度距平场((a) 偏多年，(b) 偏少年)

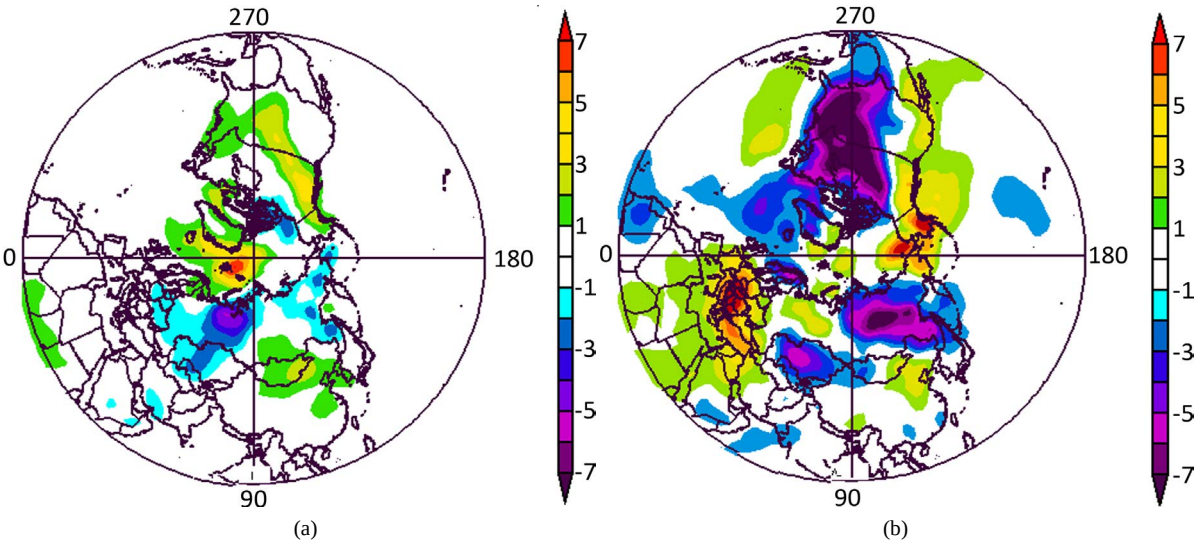


Figure 10. Surface temperature anomaly field of PC2 ((a) more haze years, (b) less haze years)
图 10. 第二模态近地面温度距平场((a) 偏多年，(b) 偏少年）

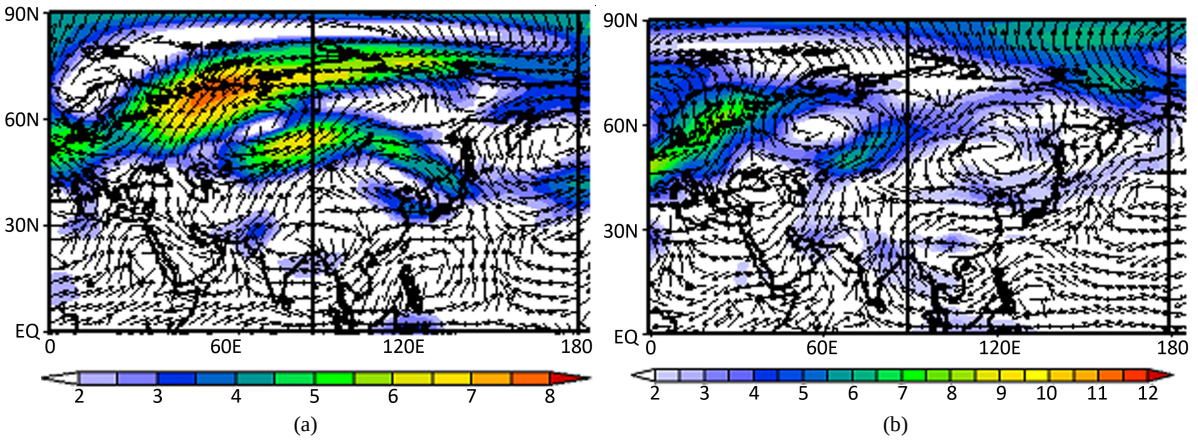


Figure 11. 500 hPa wind vector anomaly field of PC2 ((a) more haze years, (b) less haze years)
图 11. 第二模态 500 hPa 风矢量距平场((a) 偏多年，(b) 偏少年)

带形成较强的西南风距平，在亚洲 50˚N 附近形成较强的西风气流，这股西风气流携带西西伯利亚冷空气在蒙古及以北地区向东传播。同时，在我国东北地区形成反气旋环流，导致亚洲中纬度地区气温偏高(图 10(a))，纬向风垂直切变小，对流层中下层大气稳定；在京津冀区域上空形成东南风距平，表明该区域西北风较小，湿度偏大，有利于污霾天气形成。

雾霾偏少年的近地面温度距平场(图 10(b))上，从巴芬湾到巴伦支海以西的极区为明显的温度负距平，表明该区域冷源作用明显，为冷低压。随高度上升，北大西洋到欧洲北部形成较强的气旋性环流，在欧洲西部的中高纬地区为明显的西南风距平(图 11(b))，使欧洲槽、脊明显减弱。西西伯利亚一带较强的偏北风距平表明，该区域为极地冷空气向南输送通道，在地转偏向力作用下，在贝加尔湖和蒙古一带形成气旋性环流，使亚洲中纬度地区西北风加大，纬向风垂直切变增强，引起大气不稳定，有利于京津冀区域大气污染物的扩散。

6. 结论

京津冀区域异常的雾霾天气与欧亚环流的异常状态有较好的对应关系。主要有 4 种情况。

第 1 种情况：500 hPa 高度场上，极涡较强；欧亚大陆中高纬度呈东西向“正、负、正”距平波列分布，欧洲槽、脊偏强，亚洲槽脊偏弱，亚洲中纬度环流平直，京津冀区域雾霾偏多。

第 2 种情况，500 hPa 高度场上，极涡较强且明显偏向北美西部，欧亚地区呈西北—东南向的“正、负、正”波列分布。欧洲脊偏强、偏北，欧洲槽偏强、偏东，亚洲为北负南正的距平分布，冷空气不易向华北区域入侵，京津冀区域雾霾偏多。

第 3 种情况：500 hPa 高度场上，极涡较弱；欧亚大陆中高纬度呈东西向“负、正、负”距平波列分布，欧洲槽偏弱、偏西，亚洲脊偏强、偏西，蒙古地区为负距平，有利于冷空气南下，京津冀区域雾霾偏少。

第 4 种情况：500 hPa 高度场上，欧亚地区呈西北—东南向的“负、正、负”波列分布，欧洲槽脊明显偏弱；东亚大槽偏强、偏西，亚洲中高纬环流经向度大，中纬度西风气流偏强，京津冀区域雾霾偏少。

在气候预测应用中，应重点关注 500 hPa 高度场西西伯利亚区域与蒙古区域的距平场配置，亚洲中纬度与高纬度的距平配置及其位置，亚洲中纬度西风环流的强弱。

基金项目

河北省科技厅雾霾天气过程的形成机制和预测技术研究(17275303D)。

参考文献 (References)

[1] 于文金，吴雁，黄亦露，等. 河北省雾霾波动变化特征及成因研究[J]. 大气科学学报, 2016, 39(4): 554-561.

[2] 周贺玲，李丽平，乐章燕，等. 河北省雾的气候特征及趋势研究[J]. 气象, 2011, 37(4): 462-467.

[3] 张蓬勃，姜爱军，孙佳丽，等. 江苏秋季霾的年代际变化特征及其影响因素[J]. 气候变化研究进展，2012，8(3): 205-211.

[4] 张云海，王扬锋，洪也，等. 冬季典型会买天气过程的特征分析[J]. 安徽农业科学，2010，38(15): 8016-8017, 8124.

[5] 高歌. 1961-2005 年中国霾日气候特征及变化分析[J]. 地理学报, 2008, 63(7): 761-768.

[6] 吴兑，吴晓京，李菲，等. 1951-2005 年中国大陆霾的时空变化[J]，气象学报, 2010, 68(5): 680-688.

[7] 牛彧文，顾骏强，浦静姣，等. 浙江城市区域灰霾天气的长期变化[J]. 热带气象学报, 2010, 26(6): 807-812.

[8] 安月改. 京津冀区域近 50 年大雾天气气候变化特征[J]. 电力环境保护, 2004, 20(3): 1-4.

[9] 丁一汇，柳艳菊. 近 50 年我国雾和霾的长期变化特征及其与大气湿度的关系[J]. 中国科学: 地球科学，2014,

44(1): 37-48.

[10] 吴彬贵，解以扬，吴丹朱，等. 京津塘高速公路秋冬雾气象要素与环流特征[J]. 气象, 2010, 36(6): 21-28.

[11] 王丛梅，杨永胜，李永占，等. 2013 年 1 月河北省中南部严重污染的气象条件及成因分析[J]. 环境科学研究, 2013, 26(7): 695-702.

[12] 廖晓农，张小玲，王迎春，等. 北京地区冬夏季持续性雾-霾发生的环境气象条件对比分析[J]. 环境科学，2014, 35(6): 2031-2044.

[13] 陈朝晖，程水源，苏福庆，等. 华北区域大气污染过程中天气型和输送路径[J]. 环境科学研究，2008, 21(1): 17-21.

[14] 赵桂香，杜莉，卫丽萍，等. 一次持续性区域雾霾天气的综合分析[J]. 干旱区研究, 2011, 28(5): 871-878.

[15] 张人禾，李强，张若楠，等. 2013 年 1 月中国东部持续性强雾霾天气产生的气象条件分析[J]. 中国科学: 地球科学, 2014, 44(1): 27-36.

[16] 王跃思，姚利，王莉莉，等. 2013 年元月中国中东部地区强霾污染成因分析[J]. 中国科学: 地球科学, 2014, 44(1): 15-26.

[17] 杨欣，陈义珍，刘厚凤，等. 北京 2013 年 1 月连续强霾过程的污染特征及成因分析[J]. 中国环境科学，2014, 34(2): 282-288.

[18] 王自发，李杰，王哲，等. 2013 年 1 月中国中东部强霾污染的数值模拟和防控对策[J]. 中国科学: 地球科学, 2014, 44(1): 3-14.

[19] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术[M]. 北京: 气象出版社, 1999.

[20] 孙照渤，等. 短期气候预测基础[M]. 北京: 气象出版社, 2010.

[21] 朱乾根，林锦瑞，寿绍文，等. 天气学原理和方法[M]. 北京: 气象出版社, 1981.

[22] 徐晨，陈海山，黄菱芳. 冬季欧亚中高纬陆面热力异常与同期大气环流的联系[J]. 中国科学: 地球科学，2014, 44(1): 15-26.