洪也, 杨婷, 王喜全, 等. 2015. 辽宁中部城市群灰霾污染的外来影响 [J]. 气候与环境研究, 20 (6): 675−684. Hong Ye, Yang Ting, Wang Xiquan, et al. 2015. Extrinsic influence of haze episodes in the central city group of Liaoning province [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 20 (6): 675−684, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2015.14278.

辽宁中部城市群灰霾污染的外来影响

洪也[1] 杨婷[2] 王喜全[2] 马雁军[1] 关颖[3] 张云海[1]
周德平[1] 王扬锋[1] 刘宁微[1]

1 中国气象局沈阳大气环境研究所，沈阳 110016
2 中国科学院大气物理研究所大气边界层物理和大气化学国家重点实验室，北京 100029
3 辽宁省气象台，沈阳 110016

摘　要　利用 MODIS（MODerate-resolution Imaging Spectroradiometer）卫星资料、空气质量监测资料、地面气象资料及后向轨迹方法，对辽宁中部城市群代表性城市——沈阳市 2009 年全年发生的 30 d 首要污染物为 PM10（空气动力学当量直径小于等于 10 μm 的颗粒物，即可吸入颗粒物）且空气污染指数 API（Air pollution Index）为 3 级及以上污染过程的天气形势及污染来源进行了综合分析。研究结果表明：引发 3 级以上重污染事件的天气形势主要为 4 类，分别为高压均压场型（包括高压后均压场型、高压前均压场型和高压内均压场型）、长白山小高压型、弱低压场型及地形槽型。发生污染天气时气流主要有两个来向，即西南方向的京津冀来向和偏北方向的内蒙和长春来向。气流来自偏南方向的天数最多，为 19 d。其中最容易受京津冀影响的天气型为高压后均压场型和地形槽型，共有 8 d，占总污染天数的 26.7%。因此，来自京津冀的外来输送对于辽宁中部城市群霾污染的影响不容小视，辽宁中部城市群空气质量的改善与临近区域的改善紧密相关。

关键词　灰霾　跨区域输送　辽宁中部城市群　京津冀地区　天气分型
文章编号　1006-9585（2015）06-0675-10　　**中图分类号**　504　　**文献标识码**　A
doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2015.14278

Extrinsic Influence of Haze Episodes in the Central City Group of Liaoning Province

HONG Ye[1], YANG Ting[2], WANG Xiquan[2], MA Yanjun[1], GUAN ying[3], ZHANG Yunhai[1], ZHOU Deping[1],WANG Yangfeng[1], and LIU Ningwei[1]

1 *Institute of Atmospheric Environment*, *China Meteorological Administration*, *Shenyang* 110016
2 *State Key Laboratory of Atmospheric Boundary Layer Physics and Atmospheric Chemistry*, *Institute of Atmospheric Physics*, *Chinese Academy of Sciences*, *Beijing* 100029
3 *Liaoning Provincial Meteorological Observatory*, *Shenyang* 110016

Abstract　The city group of central Liaoning (CL) is one of the major air pollution areas in Northeast China. Based on the MODIS (MODerate-resolution Imaging Spectroradiometer) satellite data, air quality monitoring data, and ground meteorological data for Shenyang (one of the cities in the CL city group) in 2009, this paper, using the backward trajectory method, analyzes the weather patterns and haze pollution sources of 30 haze pollution days on which particulate

收稿日期　2014-12-22；**网络预出版日期**　2015-05-27
资助项目　中国气象局沈阳大气环境研究所基本科研业务费项目 2015IAE-CMA01，环保公益性行业科研专项 200809144，国家自然科学基金应急管理项目 414400364，国家自然科学基金项目 41375146，气象关键技术集成与应用项目 CAMGJ2012M14，公益性行业（气象）科研专项 GYHY201406031-1，辽宁省科技厅项目 2013229031
作者简介　洪也，女，1969 年出生，硕士，副研究员。主要研究方向为大气环境与环境气象。E-mail: yehongofxf@126.com
通讯作者　王喜全，E-mail: wxq@mail.iap.ac.cn

matter (PM10) was the main pollutant and the Air Pollution Index (API) level was ≥3. The results show that there were four different weather patterns that mainly triggered the heavy air pollution episodes: A uniform high-pressure field pattern, such as rear high-pressure, high-pressure in front, or high-pressure inside; the Changbai Mountains small high-pressure pattern; a weak gradient low-pressure field pattern; and a topographic trough pattern. The polluted days were mainly influenced by the southwest airflows from the Beijing–Tianjin–Hebei (BTH) region and the northerly airflows from Inner Mongolia–Changchun. Most (19) of the polluted days were generated under the southwest airflows conditions. The external haze pollutants from the BTH region were transported to the CL city group via Bohai Bay and the Liaoxi Corridor, and were mostly influenced by the near-surface southwesterly airflow from the uniform pressure field pattern to the rear of the high pressure and the topographic trough pattern. The two patterns resulted in eight polluted days, which accounted for 26.7% of the total number of haze days (30) in Shengyang during 2009. This demonstrates that cross-regional impacts of haze pollution cannot be ignored. The improvement of air quality in the CL city group is closely related to that over its neighboring regions, especially the BTH region. This poses a challenge for air pollution regional control strategies in China in the future.

Keywords Haze episode, Long-range transport, Central Liaoning city group, Beijing–Tianjin–Hebei region, Weather Pattern

1 引言

随着我国经济的高速发展及城市化进程的加快，城市群在我国经济发展中发挥越来越重要的作用。与此同时，城市群能源消耗量不断上升，大气复合型区域污染日趋明显。其中尤为突出的是在城市群出现的细颗粒物集中、相对湿度增大导致的灰霾天气。日趋严重的灰霾天气不仅使能见度恶化，危害人体健康，而且还会引发一系列生态系统问题、环境效应问题以及气候效应问题（Appel et al.，1985；Liousse et al.，1993；Sisler and Malm，1994；Xu et al.，2002；Sun et al.，2006）。由于天气系统的多样性及其尺度的跨地理区域的特性，一个区域或城市群的灰霾污染，有可能造成跨区域的影响。王喜全等（2011）在研究东北、华北地形槽天气形势控制下，辽宁中部城市群和京津冀地区同时发生灰霾污染过程时指出，此次辽宁中部城市群灰霾过程在一定程度上是由于京津冀地区灰霾污染跨区域输送的结果。Yang et al.（2012，2013）分析计算了京津冀地区灰霾输送对此次辽宁中部城市群灰霾过程的“贡献率”。洪也等（2013）研究了一次南下高压后部控制华北和东北地区形势下，辽宁中部城市群灰霾污染过程同京津冀地区灰霾的内在关系。唐娴等（2014）利用嵌套网格空气质量模式系统（NAQPMS）模式的源追踪计算方法，分析计算了京津冀地区灰霾输送对此次辽宁中部城市群灰霾过程的“贡献率”。以上几项研究工作，都指出了外来影响对辽宁中部城市群灰霾过程的重要“贡献”和其决定性影响。这就给辽宁中部城市群采用区域污染控制措施，治理区域污染的战略提出了挑战。

陈朝晖等（2007）的分析发现，最不利于扩散的大尺度天气型不是 PM10（空气动力学当量直径小于等于 10 μm 的颗粒物，即可吸入颗粒物）质量浓度最高的背景场，而是造成 PM10 质量增量最高的背景场。高压均压场和低压均压场是造成 PM10 质量浓度增加累积的主要天气形势场。范清等（2007）、隋珂珂等（2007）、任阵海等（2008）、王莉莉等（2010）研究的结果认为在冬、春季节，副热带高亚或者高压系统带来的下沉气流以及偏南风输送则是造成污染物累积的主要天气系统。苏福庆等（2004a）和孟燕军和程丛兰（2002）的研究发现了华北地形槽型和南下高压后部弱均压场型这两种天气形势是北京地区和华北地区出现污染甚至是重污染的典型天气形势。张云海等（2010a，2010b）的研究也验证了以上两种天气形势也是辽宁中部城市群地区出现大气污染的重要天气形势类型。而王喜全等（2011）和洪也等（2013）的研究认为在华北地形槽型和南下高压后部弱均压场型这两种天气形势控制下辽宁中部城市群的污染易受京津冀地区污染的影响。这似乎说明王喜全等（2011）、Yang et al.（2012，2013）、洪也等（2013）和唐娴等（2014）的研究结论“辽宁中部城市群灰霾过程在一定程度上是受京津冀地区灰霾污染跨区域输送的结果”具有一定的普遍性。本文研究了 2009 年全年辽宁中部城市群发生的灰霾天气过程，把灰霾污染过程进行天气分型，利用混

合单粒子拉格朗日综合轨迹模式（Hybrid Single Particle Lagrangian Integrated Trajectory Model，HYSPLIT）后向轨迹模型识别其气流来向，分析了京津冀地区灰霾对辽宁中部城市群灰霾影响的可能性及影响的频次，这对辽宁中部城市群地区污染区域控制方案的制定会有所裨益。

2 资料与方法

辽宁中部城市群大气污染状况以沈阳环境监测站为代表站。其监测资料即空气污染指数（Air pollution Index，API）资料来自中华人民共和国环境保护部数据中心网站（http://datacenter.mep.gov.cn/report/air_daily/airCityMain.jsp?lang= / [2010-10-11]）。API 为 0～50，空气质量级别为 I 级，空气质量状况属于优。API 为 51～100，为Ⅱ级，空气质量状况属于良；API 为 101～150，空气质量级别为Ⅲ1 级，空气质量状况属于轻微污染；API 空气污染指数为 151～200，空气质量级别为Ⅲ2 级，空气质量状况属于轻度污染；API 为 201～250，空气质量级别为Ⅳ1 级，空气质量状况属于中度污染：API 为 251～300 空气质量级别为Ⅳ2 级空气质量状况为中度重污染；API 大于 300，空气质量级别为 V 级，空气质量状况属于重度污染。现代化人机交互气象信息处理和天气预报制作系统（Micaps）资料和全球中期预报谱模式（MRF）预报结果资料来自辽宁省气象局。中分辨率成像光谱仪（MODIS）卫星图资料来自于（http://rapidfire. sci.gsfc.nasa.gov/ [2014-10-11]）。选用 Micaps 资料中逐日 08:00（协调世界时，下同）地面天气图、500 hPa 高度场和 850 hPa 温度场图，根据地面天气图上高压和低压系统温度和湿度的配置情况，将 2009 年沈阳站 3 级以上污染日的地面天气类型进行识别和归类，确定了辽宁中部城市群灰霾污染过程所属的主要天气型。天气分型的方法，参照陈力强和杨洪斌（2006）、杨洪斌等（2009）、陈朝晖等（2007）、李国翠等（2009）、王莉莉等（2010）的方法。

在以上天气分型的基础上，利用美国国家海洋和大气管理局（NOAA）的空气资源实验室和澳大利亚气象局联合研发的用于计算和分析大气污染物输送、扩散轨迹的专业模型（HYSPLIT-4）轨迹模式系统（Draxler and Hess，1988）计算沈阳站（41.83°N，123.4°E）气团的后向轨迹，计算的时间起始点为每日 00:00，向后延至 24 h，因为后向轨迹模拟结果的不确定度会随着推算距离和时间的增加而变大，所以选取时间为 24 h；轨迹的起始高度选取距地 500 m 高度，因为 1500 m 高度被广泛的用于对流层自由大气的区域输送研究中，但气溶胶主要分布于边界层以内，500 m 高度对气溶胶有更大的影响，所以轨迹的高度选用 500 m 高度（Makra et al.，2011）。

3 2009 年辽宁中部城市群 3 级及以上灰霾污染过程天气形势分型

鉴于目前尚没有统一的标准来定义灰霾，这里将 API 为 3 级及以上且主要污染物为可吸入颗粒物的污染，权作灰霾污染。表 1 为 2009 年辽宁中部城市群代表城市沈阳市 API 指数为 3 级及以上空气污染的天气类型和污染物来源方向统计，其污染程度根据国家空气质量标准划分。2009 年沈阳市 3 级及以上灰霾污染有 19 个过程，日数共 30 d，其中 4 级中度污染为 1 d，3 级污染中轻度污染为 2 d，其余 27 d 为轻微污染。灰霾污染过程的天气分型可基本归纳为 6 类，即高压均压场型、长白山小高压型、弱低压场型、地形槽型、鞍型场型和东北高压脊西部倒槽型。由于高压均压场型、长白山小高压型、弱低压场型和地形槽型这 4 种天气类型是辽宁灰霾污染中最为主要的天气类型，所以下面主要对这 4 类天气类型的污染天数、天气形势和污染机制进行分析。

3.1 高压均压场型

这种天气型下发生灰霾天气污染次数为 15 次共 17 d，占 2009 年沈阳 API 指数 3 级及以上污染天数的 56.6%。其中高压前均压场型为 9 d，高压后均压场为 4 d，高压内部均压场型为 4 d。高压均压场型的污染机制是在大范围的高压控制态势控制下，风速较小，并且伴有空气的下沉运动，在几百米或者 1000～2000 m 的高度上形成了下沉逆温，抑制了湍流的向上发展和污染物的垂直扩散，从而导致边界层内污染物的积聚，容易出现高污染天气（蒋维楣等，2004）。陈朝晖等（2007）的研究也认为持续存在的大陆高压均压场是造成重污染累积的主要背景场。下面以高压后均压场和高压前均压场型为例来分析高压均压场的污染形成机制。

3.1.1 高压后均压场型

图 1 是高压均压场型、长白山小高压型、弱低

压场型和地形槽型 4 类天气类型中各天气类型代表日的海平面气压图及当日卫星图。4 月 9 日和 10 日、10 月 29 日和 11 月 30 日共 4 d 的污染类型属于高压后均压场型，以 4 月 9 日（见图 1a）为代表。对应的地面形势场为南高北低。在东北地区对应低压槽，华东沿海到东海维持高压。此型是辽宁春季常见的污染形势。春季近地面辐射增温，在东北地区产生低压场，辽宁处于东北低压的前部和华南高压后部，形成气压梯度很大的西南大风形势，加之春季地表干燥，大风易将沙尘吹起，沙尘或浮尘天气，造成污染。卫星图可以明显看出河北和辽宁中部和北部的沙尘污染区（图 1b 中覆盖在地面、雪面和低云背景上的灰白色雾状区域）。洪也等（2013）曾研究辽宁中部城市群灰霾污染同京津冀地区灰霾的内在关系时就是在此种天气形势控制之下。11 月 30 日的污染类型既属于高压后均压场型，又同时受华北地形槽影响。

3.1.2 高压前均压场型

高压前均压场型共 8 日，代表日期是 1 月 2 日（见图 1c）。该日地面平均气压场西北高、东南低，气流自西北移向东南，辽宁处于高压前变性减弱的均压场控制，高压前对应较强的冷锋，辽宁处于锋前暖区。高空为平直气流，850 hPa 为暖脊。地面和低空风速只有 2 m/s，有时地面出现静风。风向为偏东风或东南风，并伴有较强的辐射逆温和下沉逆温，此型污染机制为近地面辐射逆温和下沉逆温，加之 850 hPa 高空暖脊的存在更加强了逆温的强度，使大气层结稳定，不利于污染物的扩散和稀释。高空 500 hPa 高度场处于脊前平直气流，高空形势场稳定，容易形成较高污染浓度累积。此型过

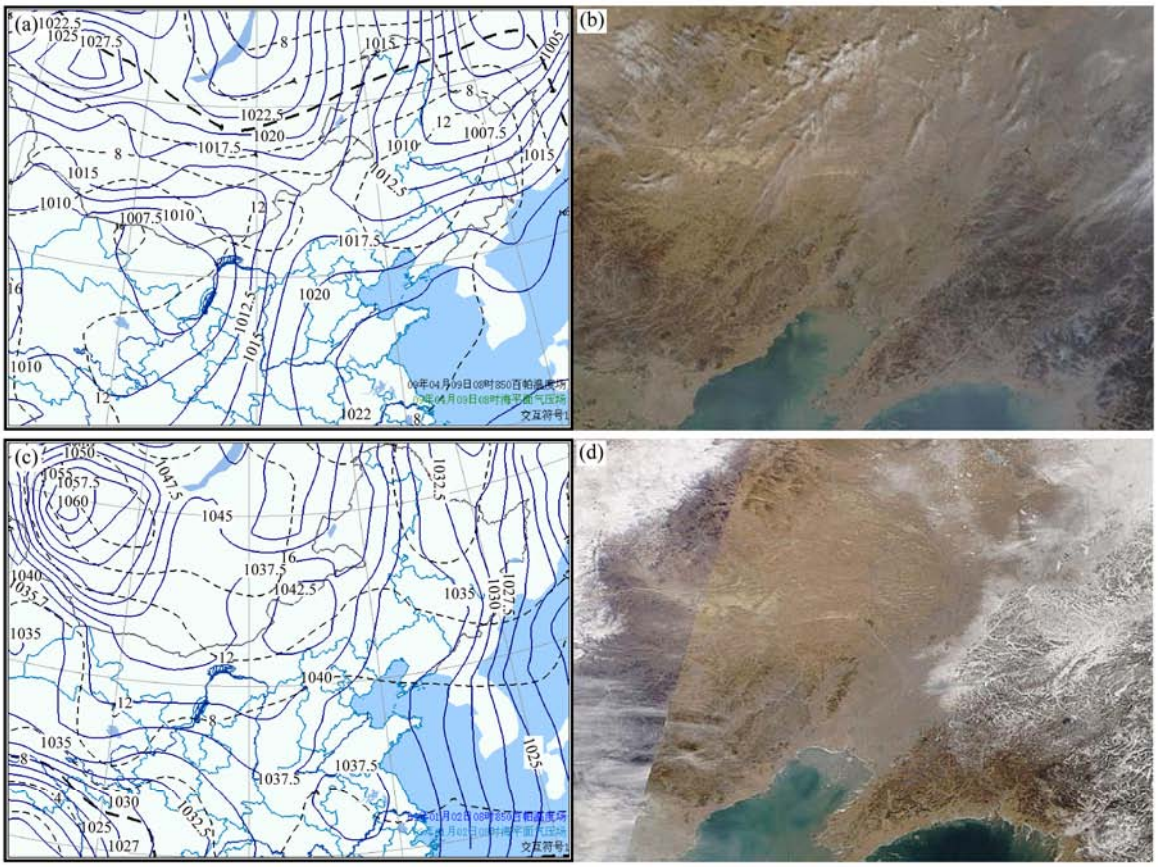

图 1 灰霾污染的典型天气类型代表日的海平面气压场（左列）和卫星图（右列）：（a、b）2009 年 4 月 9 日高压后均压场型；（c、d）2009 年 1 月 2 日高压前均压场型；（e、f）2009 年 1 月 3 日长白山小高压型；（g、h）2009 年 1 月 26 日弱低压场型；（i、j）2009 年 3 月 18 日华北地形槽型

Fig. 1 The typical weather types associated with the haze pollution [left panels: Sea level pressure charts; right panels: Visible light infrared scanning radiometer(VIRR) satellite images]: (a, b) Weak gradient low-pressure field pattern, uniform field pattern rear of high pressure on 9 April 2009; (c, d) uniform high-pressure field pattern, with high-pressure in front, on 2 January 2009; (e, f) Changbai Mountains high-pressure type, on 3 January 2009; (g, h) in front of low pressure type, on 26 January 2009; (i, j) topographic trough (North China) type, on 18 March 2009

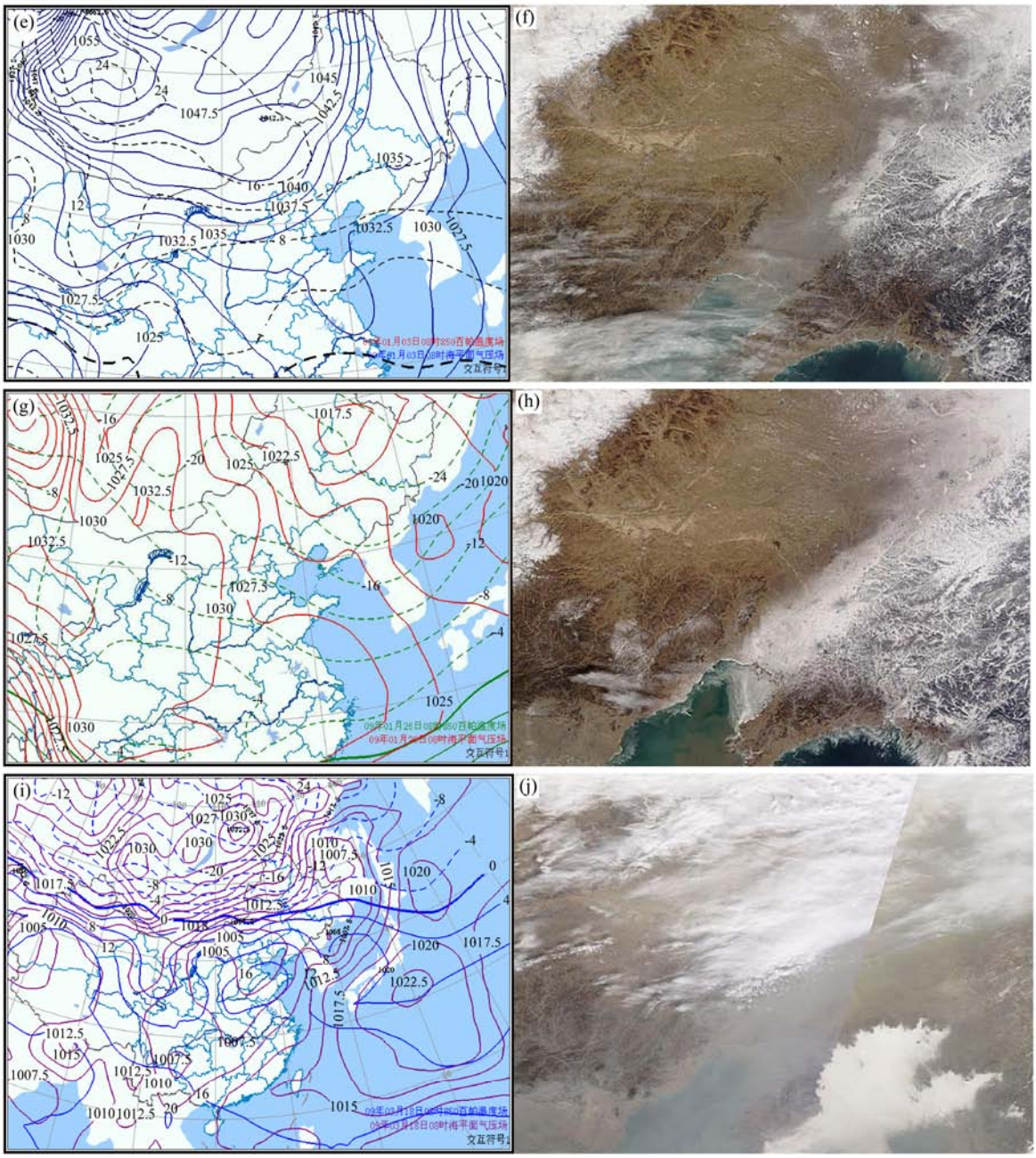

图 1 （续）

Fig. 1 (Continued)

后常对应大风天气，天气晴朗，污染物扩散速度很快。卫星图（图 1d）中辽宁中部及其吉林一带，南至京津冀、河北北部地区均为灰霾污染区。

除高压后均压场型、高压前均压场型外，还有另一种类型就是高压内部均压场型。此种天气型是辽宁中部城市群处于高压均压场的内部。主要发生日期为 2 月 25 日、3 月 4 日、9 月 25 日和 11 月 13 日等。其中 9 月 25 日还受华北地形槽的影响。

3.2 长白山小高压型

长白山小高压型天气型下发生灰霾天气污染日数为 3 d，代表日期为 1 月 3 日（见图 1e），辽宁处于高压前均压场，在长白山偏西地区出现长白山小高压（标志是出现小高压闭合线），东北地区出现明显的东北地形槽，辽宁处于东北地形槽辐合区内。长白山高压底部提供冷湿气流，降低下垫面温度，地形槽前东南气流移动到冷的下垫面上，造成

表 1 2009 年沈阳 API 指数为 3 级及以上空气污染的天气类型及污染物来源方向统计

Table 1 Statistical results for the air pollution episodes with an API level ≥3, as along with the corresponding weather patterns and airflow, in Shenyang during 2009

日期	API	级别	质量状况	天气类型	归类	来流方向
1 月 2～8 日	129	Ⅲ1	轻微污染	高压前均压场型	高压均压场型	西北
	149	Ⅲ1	轻微污染	长白山小高压型	长白山小高压型	西北
	113	Ⅲ1	轻微污染	高压前均压场型	高压均压场型	北
	123	Ⅲ1	轻微污染	高压前均压场型	高压均压场型	北
	142	Ⅲ1	轻微污染	长白山小高压型	长白山小高压型	西北
	162	Ⅲ2	轻度污染	高压前均压场型	高压均压场型	西北—东北
	131	Ⅲ1	轻微污染	高压前均压场型	高压均压场型	西北
1 月 26 日	124	Ⅲ1	轻微污染	低压前部型	弱低压场型	西北—西南
2 月 1～2 日	118	Ⅲ1	轻微污染	东北高压脊西部倒槽型	东北高压脊西部倒槽型	东北—西南
	147	Ⅲ1	轻微污染	长白山小高压型	长白山小高压型	东北—西南
2 月 10 日	143	Ⅲ1	轻微污染	北方低压锋面气旋型	弱低压场型	西南
2 月 25 日	105	Ⅲ1	轻微污染	高压内部均压场型	高压均压场型	西北
3 月 4 日	116	Ⅲ1	轻微污染	高压内部均压场型	高压均压场型	西南
3 月 18 日	126	Ⅲ1	轻微污染	低压顶前部型	华北地形槽型	西南
4 月 9～10 日	109	Ⅲ1	轻微污染	高压后均压场型（南大风型）	高压均压场型	西南
	112	Ⅲ1	轻微污染			西南
4 月 18 日	106	Ⅲ1	轻微污染	鞍型场型	鞍型场型	西南
9 月 25 日	111	Ⅲ1	轻微污染	高压内部均压场型	华北地形槽型	西北—西南
10 月 16 日	112	Ⅲ1	轻微污染	低压前部型	弱低压场型	西北—西南
10 月 26 日	128	Ⅲ1	轻微污染	高压前均压场型	高压均压场型	南
10 月 29 日	121	Ⅲ1	轻微污染	高压后均压场型	高压均压场型	西南
11 月 13 日	131	Ⅲ1	轻微污染	高压内部均压场型	高压均压场型	东北
11 月 24 日	129	Ⅲ1	轻微污染	低压前部型	弱低压场型	西南转南
11 月 29 日至 12 月 2 日	134	Ⅲ1	轻微污染	鞍型场型	鞍型场型	西北—西南
	139	Ⅲ1	轻微污染	高压后均压场型	华北地形槽型	西—西南
	182	Ⅲ2	轻度污染	高压前均压场型	高压均压场型	西北
	209	Ⅳ1	中度污染	低压内部均压场型	华北地形槽型	西北—西南
12 月 24 日	118	Ⅲ1	轻微污染	鞍型场型	鞍型场型	西北—西南
12 月 28 日	108	Ⅲ1	轻微污染	高压前均压场型	华北地形槽型	西北—西南
12 月 31 日	110	Ⅲ1	轻微污染	高压前均压场型	高压均压场型	西北

地面逆温。在夜间晴空辐射的作用下使逆温强度加强，范围扩大。在这种天气形势控制下，气流辐合，大气层结稳定，污染不易扩散。卫星图（图 1f）灰霾污染范围与图 1a 相似。

3.3 弱低压场型

弱低压场型发生灰霾天气的日数为 5 d。其中低压前部型为 4 d，低压内部型为 1 d。低压前部型代表日期为 1 月 26 日（见图 1g）。1 月 26 日低压变性减弱，辽宁处于北方低压槽线附近，正好是锋面气旋的冷锋锋区，因此有些学者也把这种天气类型划分为北方低压锋面气旋型。850 hPa 高空为脊前冷气流，500 hPa 处于槽前冷平流范围。辽宁东部对应中心在朝鲜的高压后部，由于高压后部是较湿润的东南风，所以此型一般还对应大雾天气。污染物浓度较高，API 值为 128。卫星图（图 1h）中灰霾范围京津冀、辽宁、吉林都有部分灰霾污染区。

3.4 地形槽型

地形槽型天气型发生灰霾天气的日数为 5 d：3 月 18 日、9 月 25 日、11 月 30 日、12 月 2 日和 28 日。3 月 18 日为华北地形槽型的代表日期（图 1e）。地面受江淮气旋等南部低压顶前部控制，在华北地区形成华北地形槽。受此影响，地面吹西南 或东北风，850 hPa 有暖脊经过，高空为槽前暖湿气流，垂直扩散条件差。卫星图（图 1j）上京津冀、河北省北部、辽宁中部都有灰霾污染存在。

发生霾污染的其它天气型还有鞍型场型（4 月 18 日、11 月 29 日、12 月 24 日）、东北高压脊西部倒槽型（2 月 1 日）等其他天气形势造成的污染，也有其他局地污染类型发生，在此就不一一赘述。

4 受京津冀影响的两种天气类型（高压后部型和华北地形槽型）灰霾的范围和污染物来源

图 2 为沈阳 API 指数为 3 级及以上污染日（共 30 d）在 500 m 高度上的 24 h 气团后向轨迹图。从图 2 和表 1 来看，气流方向来自偏南方的天数最多，为 19 d，占总污染天数的 63.3%，其中来自南和西南方向的天数为 10 d，先西北（东北）后转为西南方向的天数为 9 d；其次是来自偏西北方向的，为 11 d。在这 30 d 中高压前（内）均压场、长白山小高压型、弱低压场型这 3 类天气型的气流来向既有来自偏北气流的、也有来自偏南气流的。而且从后向轨迹也可以看出，气流轨迹除了有远距离的传输外，更多的是局地绕旋型。也就是说，这三类天气型的污染更多的是以辽中南局地污染为主。

而高压后均压场型和地形槽型两类天气型则是以受远距离输送跨区域输送的天气型为主。因为其后向轨迹的方向均由西南方向向东北地区远距离传输。同时也说明了东北地区的污染与京津冀的输送密切相关。如前文所提，王喜全等（2011）和洪也等（2013）的研究已经证实了在这两类天气类型下，辽宁中部城市群的灰霾污染大多是受京津冀地区跨区域输送的影响所致。在受偏西南气流影响的 19 d 中，属于高压均压场型和地形槽型这两类天气型的共有 8 d，其中 4 月 9 日、4 月 10 日、10 月 29 日和 11 月 30 日是受高压后部天气形势控制下的天气类型，而 3 月 18 日、9 月 25 日、11 月 30 日、12 月 2 日和 28 日是受华北地形槽形势控制下的天气类型。其中 11 月 30 日同时受两类天气型控制。下面利用后向轨迹资料和卫星图片资料分析本研究中受高压后部和华北地形槽两种天气形势控制下的灰霾污染是否也发生了灰霾污染，其污染的范围和污染的来源及路径是如何变化的。

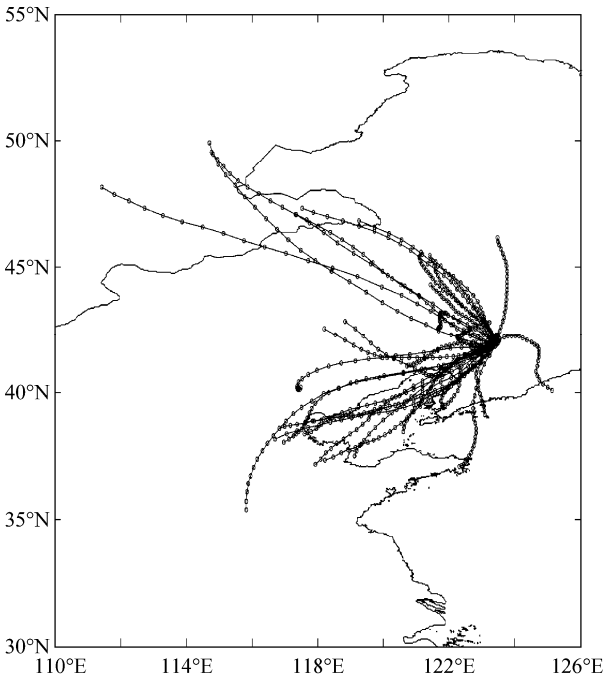

图 2 沈阳 API 指数为 3 级及以上污染日（共 30 d）在 500 m 高度上的 24 h 气团后向轨迹图

Fig. 2 Hybrid Single Particle Lagrangian Integrated Trajectory Model (HYSPLIT) 24-h backward trajectories at 500 m above sea level for the 30 pollution days with an API level ≥3 in Shenyang in 2009

表 2 为 2009 年沈阳 3 级及以上空气污染过程中高压后均压场型和华北地形槽型两种天气型污染物来源方向统计和前期及同期北京地区空气质量状况。图 3 为受京津冀影响的两种天气类型（高压后均压场型和地形槽型）的 500 m 高度上的后向轨迹图和卫星云图。由表 2 和图 3a 可以看出，天气类型属于高压后均压场型的 4 d 和属于华北地形槽型的 4 d 的后向轨迹均由西南京津冀地区向东北地区传输。卫星图也可以看出这 8 d 均存在灰霾污染，而且灰霾污染的范围与后向轨迹的路径也比较吻合。

表 2 2009 年沈阳 3 级及以上空气污染过程中高压后均压场型和华北地形槽型两种天气型污染物来源方向统计和前期及同期北京地区空气质量状况

Table 2 Statistical results for the airflow during the polluted episodes with an API level ≥3 under the main weather patterns in Shenyang during 2009, and the air quality of the simultaneous and prior days in Beijing

	北京地区			沈阳地区			
日期	API	级别	空气质量状况	API	级别	空气质量状况	污染物来流方向
2009-04-08*	140	Ⅲ1	轻微污染				
2009-04-09*	117	Ⅲ1	轻微污染	109	Ⅲ1	轻微污染	西南
2009-04-10*	115	Ⅲ1	轻微污染	112	Ⅲ1	轻微污染	西南
2009-10-29*	137	Ⅲ1	轻微污染	121	Ⅲ1	轻微污染	西南
2009-11-30*	139	Ⅲ1	轻微污染	139	Ⅲ1	轻微污染	西—西南
2009-03-18**	268	Ⅳ2	中重度污染	126	Ⅲ1	轻微污染	西南
2009-09-25**	130	Ⅲ1	轻微污染	111	Ⅲ1	轻微污染	西北—西南
2009-12-02**	133	Ⅲ1	轻微污染	209	Ⅳ1	中度污染	西北—西南
2009-12-25**	500	Ⅴ	重污染	108	Ⅲ1	轻微污染	西北—西南

*、**分别表示高压后均压场型、地形槽型。

天气类型属于高压后均压场型的 4 d 中，4 月 9 日和 4 月 10 日的 24 h 后向轨迹路线后 12 h 路径几

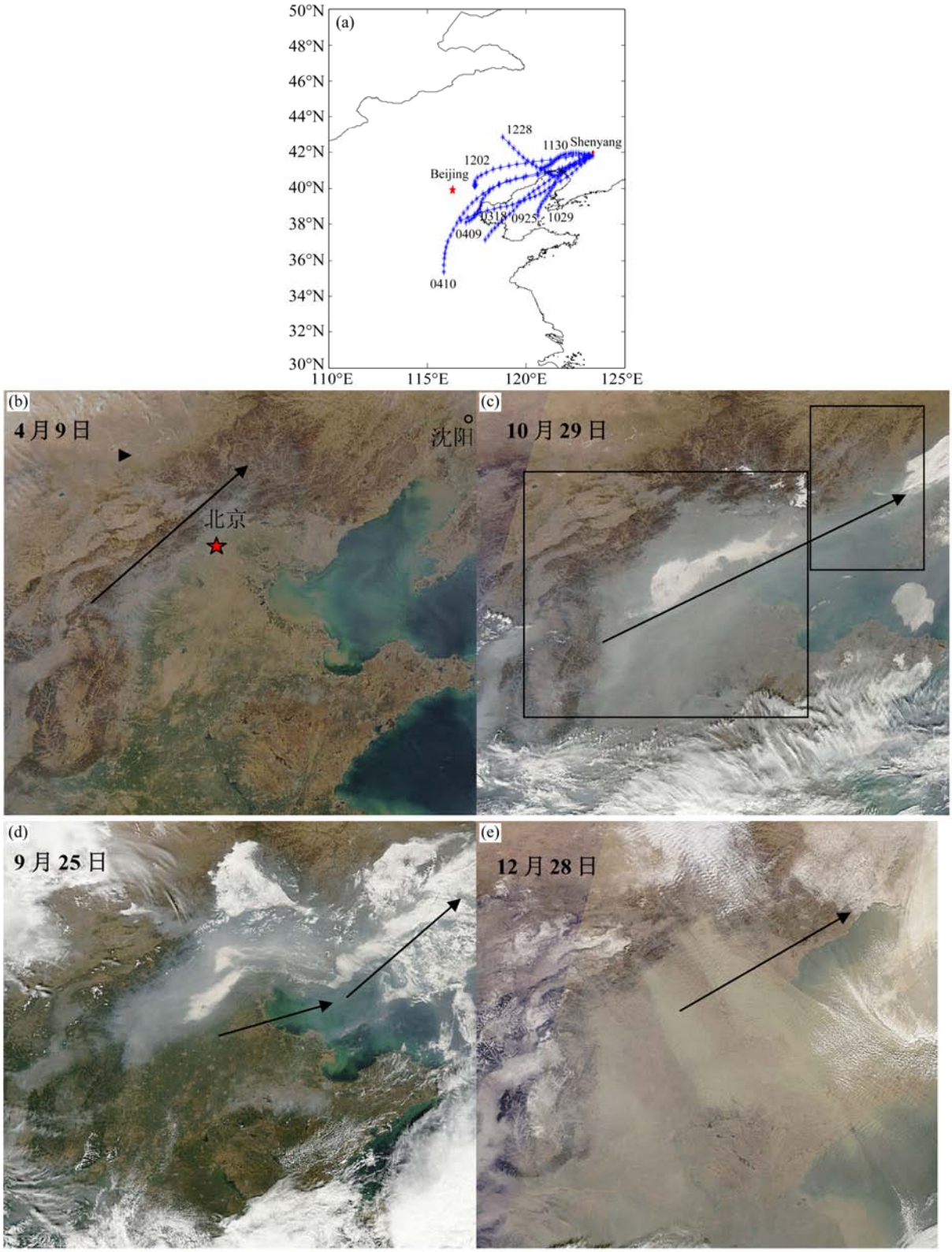

图 3 受京津冀影响的两种天气类型（高压后均压场型和地形槽型）的（a）500 m 高度上的气团后向轨迹图，以及（b）4 月 9 日、（c）10 月 29 日高压后均压场型和（d）9 月 25 日、（e）12 月 28 日地形槽型的卫星云图

Fig. 3 (a) HYSPLIT 24-h backward trajectories at 500 m above sea level and (b, c, d, e) satellite images of the weather patterns influenced by the BTH region: Uniform field pattern rear of high pressure on (b) 9 April 2009 and (c) 29 October 2009; topographic trough (North China) type on (d) 25 September 2009 and (e) 28 December 2009

乎相同，前 12 h 4 月 9 日由河北省和山东省交界处沿辽西走廊向东北地区流动，4 月 10 日是由山东省流向东北地区，均由西南向东北移动。卫星图可以看出这两天中均存在灰霾污染，而且灰霾污染的范围与后向轨迹的路径也比较吻合。4 月 9 日河北京津冀和辽宁地区的灰霾污染的范围与后向轨迹的路径非常吻合（图 3b）。4 月 10 日大部分地区被云层遮挡，但也能看出北京和辽宁中部地区都有明显的灰霾存在（图略）。10 月 29 日后向轨迹的路径是由海上传输的，卫星图中京津冀地区和辽宁中部地区都有明显的灰霾污染，而且后向轨迹中污染的传输路径上有灰霾存在，并且灰霾的轮廓也呈条带状，灰霾轮廓与传输路径非常吻合（图 3 c）。11 月 30 日后向轨迹的路径较短，西起河北省与辽宁省交界处，向东传输至辽宁沈阳地区。卫星图上京津冀有灰霾污染，沈阳被云层覆盖（图略）。天气类型属于华北地形槽型的 4 日中，3 月 18 日路径始于河北省，沿海上传输至东北地区，9 月 25 日也是海上传输。这两日卫星图上京津冀和辽宁有大范围灰霾污染，而且传输路径上灰霾污染也十分明显（3 月 18 日图略，9 月 25 日为图 3 d）。12 月 2 日传输路径始于北京市的密云县，向西南传输至辽宁地区。12 月 28 日西起河北省与内蒙古自治区的交界处，向西南流动，至辽宁省境内发生发生气旋性偏转，由西南向东北流至辽宁沈阳。卫星图上灰霾范围也与后向轨迹路径十分吻合（12 月 2 日图略，12 月 28 日为图 3 e）。

上述污染过程期间，在来流京津冀方向上，污染日的前日或当日也发生了污染（表 2）。同年北京 API 指数 3 级及以上空气污染共发生日数为 80 d。其中在辽宁中部城市群发生污染的前日、当日或后日发生污染的日数就有 18 d。3 月 18 日、4 月 9 日和 9 月 25 日辽宁中部城市群发生污染天气时，北京的当日和前一日均已经发生了污染，污染指数也均比沈阳的污染指数高。这说明京津冀地区灰霾污染对辽宁中部城市群污染的输送存在一定的可能性。而如上所述属于两类天气型的 8 d 确实全部存在灰霾污染，污染天数占总污染天数（30 d）的 26.7%。从后向轨迹也可以清楚地看出污染是由京津冀向东北地区传输的。路径是沿辽西走廊或海上通道向东北传输。前面已经证明了在高压后均压场型和地形槽型这两类天气型控制下东北地区的污染与京津冀的输送密切相关。因此，从天气类型的角度来说，辽宁受京津冀污染传输影响所占的频次为 26.7%。

5 总结

通过对辽宁中部城市群代表城市沈阳市 API 指数 3 级及以上空气污染日的分析可以看出：

（1）辽宁中部城市群灰霾的主要外来影响有两个：一是来自西南的京津冀方向，二是来自偏北的内蒙长春方向。

（2）在沈阳市 API 指数 3 级及以上污染日中，来自偏南方向的日数为 19 d，其中属于受京津冀影响的高压后部型和华北地形槽型的日数为 8 d，占总污染天数的 26.7%。

从受京津冀影响占 1/4 强的比例来看，来自京津冀的外来输送对于辽宁中部城市群霾污染的影响不容小视。

致谢 感谢沈阳中心气象台陈力强研究员、沈阳大气环境研究所杨洪斌副研究员和中国海洋大学盛立芳教授及对本研究给予的指导和帮助。

参考文献（References）

Appel B R, Tokiwa Y, Hsu J, et al. 1985. Visibility as related to atmospheric aerosol constituents [J]. Atmos. Environ., 19 (9): 1525–1534, doi: 10.1016/0004-6981(85)90290-2.

陈力强, 杨洪斌. 2006. 辽宁省区域性空气污染的天气分型 [J]. 环境污染与防治, 28 (6): 435–451. Chen Liqiang, Yang Hongbin. 2006. Synoptic patterns of regional air pollution in Liaoning province [J]. Environmental Pollution and Control (in Chinese), 28 (6): 435–451.

陈朝晖, 程水源, 苏福庆, 等. 2007. 北京地区一次重污染过程的大尺度天气型分析 [J]. 环境科学研究, 20 (2): 99–105. Chen Zhaohui, Cheng Shuiyuan, Su Fuqing, et al. 2007. Analysis of large-scale weather pattern during heavy air pollution process in Beijing [J]. Research of Environmental Sciences (in Chinese), 20 (2): 99–105.

Draxler R R, Hess G D. 1998. An overview of HYSPLIT-4 modeling system for trajectories: Dispersion and deposition[J]. Aust. Meteor. Mag., 47 (2): 295–308.

范清, 程水源, 苏福庆, 等. 2007. 北京夏季典型环境污染过程个例分析 [J]. 环境科学研究, 20 (5): 12–19. Fan Qing, Cheng Shuiyuan, Su Fuqing, et al. 2007. Example analysis of typical environment pollution process in the summer in Beijing [J]. Research of Environmental Sciences (in Chinese), 20 (5): 12–19.

洪也, 马雁军, 王喜全, 等. 2013. 辽宁中部城市群灰霾天气的外来影响——个案分析 [J]. 环境科学学报, 33 (8): 2115–2122. Hong Ye, Ma Yanjun, Wang Xiquan, et al. 2013. External influences in the haze episode in the central city group of Liaoning: A case study [J]. Acta Scientiae Circumstantiae (in Chinese), 33 (8): 2115–2122.

蒋维楣, 孙鉴泞, 曹文俊, 等. 2004. 空气污染气象学教程 [M]. 2版. 北京: 气象出版社, 420pp. Jiang Weimei, Sun Jianning, Cao Wenjun, et al. 2004. Air Pollution Meteorology Tutorial (in Chinese) [M]. 2nd ed. Beijing: China Meteorological Press, 420pp.

李国翠, 范引琪, 岳艳霞, 等. 2009. 北京市持续重污染天气分析 [J]. 气象科技, 37 (6): 656–659. Li Guocui, Fan Yinqi, Yue Yanxia, et al. 2009. Weather pattern analysis during continuing heavy pollution episodes in Beijing [J]. Meteorological Science and Technology (in Chinese), 37 (6): 656–659.

Liousse C, Cachier H, Jennings S G. 1993. Optical and thermal measurements of black carbon aerosol content in different environments: Variation of the specific attenuation cross-section, sigma (σ) [J]. Atmos. Environ., 27 (8): 1203–1211, doi: 10.1016/0960-1686(93)90246-U.

Makra L, Matyasovszky I, Guba Z, et al. 2011. Monitoring the long-range transport effects on urban PM10 levels using 3D clusters of backward trajectories [J]. Atmos. Environ., 45 (16): 2630–2641, doi: 10.1016/j.atmosenv.2011.02.068.

孟燕军, 程丛兰. 2002. 影响北京大气污染物变化的地面天气形势分析 [J]. 气象与环境, 28 (4): 42–47. Meng Yanjun, Cheng Conglan. 2002. Impact of surface synoptic situations on air pollution in Beijing area [J]. Weather and Environment (in Chinese), 28 (4): 42–47.

任阵海, 苏福庆, 陈朝晖, 等. 2008. 夏秋季节天气系统对边界层内大气中 PM10 浓度分布和演变过程的影响 [J]. 大气科学, 32 (4): 741–751. Ren Zhenhai, Su Fuqing, Chen Zhaohui, et al. 2008. Influence of synoptic systems on the distribution and evolution process of PM10 concentration in the boundary layer in summer and autumn [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 32 (4): 741–751.

Sisler J F, Malm W C. 1994. The relative importance of soluble aerosols to spatial and seasonal trends of impaired visibility in the United States [J]. Atmos. Environ., 28 (5): 851–862, doi: 10.1016/1352-2310(94)90244-5.

苏福庆, 杨明珍, 钟继红, 等. 2004a. 华北地区天气型对区域大气污染的影响 [J]. 环境科学研究, 17 (3): 16–20. Su Fuqing, Yang Mingzhen, Zhong Jihong, et al. 2004a. The effects of synoptic type on regional atmospheric contamination in North China [J]. Research of Environmental Sciences (in Chinese), 17 (3): 16–20.

苏福庆, 高庆先, 张志刚, 等, 2004b. 北京边界层外来污染物输送通道 [J]. 环境科学研究, 17 (1): 26–29. Su Fuqing, Gao Qingxian, Zhang Zhigang, et al. 2004b. Transport pathways of pollutants from outside in atmosphere boundary layer [J]. Research of Environmental Sciences (in Chinese), 17 (1): 26–29.

隋珂珂, 王自发, 杨军, 等. 2007. 北京 PM10 持续污染及与常规气象要素的关系 [J]. 环境科学研究, 20 (6): 77–82. Sui Keke, Wang Zifa, Yang Jun, et al. 2007. Beijing persistent PM10 pollution and its relationship with general meteorological features [J]. Research of Environmental Sciences (in Chinese), 20 (6): 77–82.

Sun Y L, Zhuang G S, Tang A H, et al. 2006. Chemical characteristics of PM2.5 and PM10 in haze–fog episodes in Beijing [J]. Environ. Sci. Technol., 40 (10): 3148–3155, doi: 10.1021/es051533g.

唐娴, 王喜全, 洪也, 等. 2014. 辽宁中部城市群一次灰霾天气过程的外来影响程度研究 [J]. 环境科学学报, 34 (6): 1541–1550. Tang Xian, Wang Xiquan, Hong Ye, et al. 2014. A case study of regional contributions to the air quality in city clusters in central Liaoning during a haze episode [J]. Acta Scientiae Circumstantiae (in Chinese), 34 (6): 1541– 1550.

王莉莉, 王跃思, 王迎红, 等. 2010. 北京夏末秋初不同天气形势对大气污染物浓度的影响 [J]. 中国环境科学, 30 (7): 924–930. Wang Lili, Wang Yuesi, Wang Yinghong, et al. 2010. Relationship between different synoptic weather patterns and concentrations of atmospheric pollutants in Beijing during summer and autumn [J]. China Environmental Science (in Chinese), 30 (7): 924–930.

王喜全, 杨婷, 王自发. 2011. 灰霾污染的跨控制区影响——一次京津冀与东北地区灰霾污染个案分析 [J]. 气候与环境研究, 16 (6): 690–696. Wang Xiquan, Yang Ting, Wang Zifa. 2011. Impact of dust–haze episode from one air pollution control region to the other—One case study [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 16 (6): 690–696.

Xu J, Bergin M H, Yu X, et al. 2002. Measurement of aerosol chemical, physical and radiative properties in the Yangtze delta region of China [J]. Atmos. Environ., 36 (2): 161–173, doi: 10.1016/S1352-2310(01)00455-1.

杨洪斌, 李元宜, 邹旭东, 等. 2009. 辽宁空气中度污染和重污染天气类型分析 [J]. 气象与环境学报, 25 (6): 15–17. Yang Hongbin, Li Yuanyi, Zou Xudong, et al. 2009. Synoptic situation classification based on medium and heavy air pollutions over Liaoning province [J]. Journal of Meteorology and Environment (in Chinese), 25 (6): 15–17.

Yang T, Wang X Q, Wang Z F, et al. 2012. Gravity-current driven transport of haze from North China plain to Northeast China in winter 2010—Part I: Observations [J]. SOLA, 8: 13−16, doi: 10.2151/sola.2012-004.

Yang T, Wang X Q, Wang Z F, et al. 2013. Gravity-current-driven transport of haze from the North China Plain to Northeast China in winter 2010—Part 2: Model Simulation with tagged tracers [J]. SOLA, 9: 60−64, doi: 10.2151/sola.2013-014.

张云海, 马雁军, 王扬锋. 2010a. 辽宁中部地区灰霾天气气候环境特征 [J]. 生态环境学报, 19 (5): 1114–1118. Zhang Yunhai, Ma Yanjun, Wang Yangfeng. 2010a. Synoptic, climatic and environmental characteristics of haze in center area of Liaoning province [J]. Ecology and Environmental Sciences (in Chinese), 19 (5): 1114–1118.

张云海, 马雁军, 刘宁微, 等. 2010b. 沈阳地区霾的环境特征研究 [J]. 生态环境学报, 19 (11): 2636–2641. Zhang Yunhai, Ma Yanjun, Liu Ningwei, et al. 2010b. Study on environmental characteristics of haze in Shenyang [J]. Ecology and Environmental Sciences (in Chinese), 19 (11): 2636–2641.