

郭蕊,段浩,马翠平,等. 2016. 河北中南部连续 12 d 重霾污染天气过程特征及影响因素分析. 气象,42(5):589-597.

河北中南部连续 12 d 重霾污染天气过程 特征及影响因素分析^{*}

郭蕊¹ 段浩² 马翠平³ 赵娜³ 曲晓黎¹ 郭卫红³ 张金满¹

1 河北省气象服务中心,石家庄 050021

2 河北省气象局,石家庄 050021

3 河北省环境气象中心,石家庄 050021

提 要: 2013 年 12 月 14—25 日,河北中南部地区发生了一次长达 12 d 的重霾污染天气过程。本文通过对同期气象条件、流场、污染物特征进行分析,探讨了这次过程的成因。此次污染过程与霾密切相关,具有持续时间长、范围广及强度大的特点;在静稳的大尺度气象条件和近地面大气层结下,污染物沿近地面风场的弱辐合区迅速积累,是重霾污染天气形成的关键;此次重霾污染天气过程中有两次弱冷空气活动,两次冷空气影响层次有所不同但影响时间均较短,不能彻底改变静稳大气层结,对污染物的扩散能力有限,重霾污染天气得以长时间持续。

关键词: 重霾污染天气,气象条件,稳定层结,弱冷空气

中图分类号: P458

文献标志码: A

doi: 10.7519/j.issn.1000-0526.2016.05.008

Analysis on the Characters and Influencing Factors of a 12 d Heavy Haze Pollution Weather Process

GUO Rui¹ DUAN Hao² MA Cuiping³ ZHAO Na³ QU Xiaoli¹
GUO Weihong³ ZHANG Jinman¹

1 Public Meteorological Service Centre of Hebei, Shijiazhuang 050021

2 Hebei Meteorological Service, Shijiazhuang 050021

3 Hebei Provincial Environmental Meteorology Centre, Shijiazhuang 050021

Abstract: From 14 to 25 December 2013, a heavy haze pollution process occurred in the central and southern part of Hebei. By analyzing the meteorological conditions, flow field and characteristics of pollutants, the causes of this process are discussed. This pollution process which was closely related to haze presented such features as long duration, wide range and great intensity. With large-scale stagnant meteorological condition and near-surface atmospheric stratification, pollutants accumulated rapidly in the convergence zone of surface wind, leading to the formation of this heavy pollution process. There were two weak cold air activities during this period, but they were too weak to change the stagnant atmospheric stratification. Thus, the heavy pollution process, this time lasted a long time.

Key words: heavy haze pollution, meteorological condition, stable stratification, weak cold air

^{*} 河北省科学技术厅计划项目(15274204D 和 1627409D)及河北省气象局科研项目(14ky30)共同资助
2015 年 2 月 2 日收稿; 2015 年 12 月 31 日收修定稿
第一作者:郭蕊,主要从事交通、环境气象服务及相关模式研究. Email:gr=jnyxb@163.com

引 言

随着我国经济社会的不断发展,经济规模迅速扩大和城市化进程日渐加快,大气气溶胶污染日趋严重,已经成为一种常见环境灾害和污染事件(孙亮,2012)。然而影响空气质量的因素有人为和自然两种:人为因素是指污染物排放所造成的空气污染(罗宇翔等,2012);自然因素指如降水、雾、霾、大风、沙尘暴、扬尘等天气现象。硫酸盐、硝酸盐、含碳气溶胶是造成空气质量变化的主要化学组分,通过散射和吸收作用影响大气消光(Lee et al,2002;Latha et al,2001;梁永贤等,2012;姚青等,2012)。直接造成空气质量良与差重要因素之一主要是气象条件(William et al,2003),多年来,许多气象研究人员致力于空气污染预报方法及气象因素的影响研究工作。Schichtel 等(2001)和 Doyle 等(2002)曾分别分析了美国和英国霾与能见度的长期变化趋势。在华北平原的霾过程中,均出现明显的气流停滞区,不利于空气中污染物的水平扩散(吴兑等,2014)。在空气污染预报中,首先要关注大的天气系统,高空无明显的垂直运动或系统性弱下沉运动,中低层弱的辐散场以及弱的下沉气流使得大气上、下层之间的交换作用很微弱,污染物易于在边界层堆积,近地层存在逆温,稳定的层结使空气污染得以持续(段宇辉等,2010;曹伟华等,2013;毛宇清等,2013),当地面的主要气象要素如低风速、高湿度及逆温等情况可能出现时,结合能见度状况,就做出高浓度污染的预警或预报(徐晓峰等,2005)。风速和温度层结对大气污染物浓度都能产生影响(何建军等,2013;靳军莉等,2014),水平方向上暖平流对应污染物浓度增加,并在暖平流转为冷平流时堆积到最大值,而冷平流对应污染物浓度的降低,冷平流转为暖平流时浓度最低(张琳娜等,2014)。在大气边界层高度较低、高压变性出海、偏东和偏南气流输送高湿度空气三种气象条件下,气溶胶吸湿增长效应显著,易导致严重灰霾天气(吴兑,2005;过宇飞等,2013)。陈训来等(2008)利用空气污染指数(API)资料和 NCEP/NCAR 风场、气压场再分析资料分析了香港地区空气污染指数特征以及典型天气形势对香港地区空气污染的影响。李喜仓等(2011)分析了城市发展对大气环境的影响,发现城市发展影响局地环流,大气扩散能力减弱。李琼等(1999)利用珠江三角洲地区主

要城市的污染物浓度资料和天气资料,分析得出了珠江三角洲地区天气类型和地面空气污染物浓度之间的定性关系。杨德保等(1994)、王宏等(2008)分别研究分析得出,兰州和福州的城市空气污染物浓度变化和气象条件有着显著的相关关系。

12月,河北中南部地区出现了长达12 d(2013年12月14—25日)的重霾污染过程,过程中AQI指数多次爆表,呈现持续时间长、范围广、强度大的特点。重污染过程与气象条件关系密切,特定的天气系统和气象要素是重污染天气形成的关键,但目前针对不同气象条件对于重污染天气的消散能力的研究较少,而在本次过程中在重污染天气形成后大气较弱的扩散能力是污染过程得以长时间持续的关键。因此,本文针对这次污染过程的特点,从天气分析、流场分析、污染物特征分析入手,探讨过程的成因及影响因素,并重点分析此次过程中污染得以长时间维持的主要气象条件,以进一步了解重霾污染天气形成和消散机理,为准确监测、预测重霾污染天气提供参考。

1 空气污染资料和气象资料

本文所使用的空气质量监测资料由河北省环境监测站提供,污染物数据为石家庄市市区7个观测站的平均值,内容包括污染物浓度、首要污染物、空气质量指数和空气质量级别等。气象资料采用逐日自动站、常规气象资料、L波段加密探空资料、风廓线雷达资料和NCEP/NCAR再分析资料。

2 连续12 d重霾污染天气过程特征

2.1 观测事实

在这次重霾污染天气过程中,河北中南部大部分地区空气质量持续严重污染。本次污染过程与气象条件密切相关,由气象条件及污染物浓度变化特征可将本次过程分为三个阶段(以石家庄为例,图1),第一阶段:14日08时至16日22时,是冷高压前部均压场控制,在静稳形势下河北中南部地区空气质量开始转差,石家庄从重度污染转为严重污染,PM_{2.5}和PM₁₀浓度最高值分别达到500和835.3 μg·m⁻³;第二阶段:16日23时至18日19时,受弱冷锋过境影响,河北中南部地区空气质量转

好,石家庄由严重污染转为中度到重度污染,18日01时 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 浓度分别下降至 87 和 $154 \mu g \cdot m^{-3}$,18日20时后河北中南部地区空气质量再次迅速转坏;第三阶段:18日20时至25日22时,是强冷空气来临前近地面空气长时间滞留时期,19日19时后石家庄 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 浓度值分别达到或超过 500 和 $600 \mu g \cdot m^{-3}$,并维持较长时间,期间仅在21日受弱冷空气影响,污染物浓度短时间内有所下降。这一阶段中 $PM_{2.5}$ 浓度最大达 $933 \mu g \cdot m^{-3}$, PM_{10} 浓度最大达 $1166.8 \mu g \cdot m^{-3}$ 。25日22时,当冷锋移过石家庄上空后,空气质量从严重污染迅速降至轻度污染, $PM_{2.5}$ 浓度在1 h内由 $532 \mu g \cdot m^{-3}$ 下降至 $46 \mu g \cdot m^{-3}$ 。26日,石家庄空气质量为优。

由图1b进一步分析,过程第一阶段中的风速均小于 $2.5 m \cdot s^{-1}$,不利污染物的扩散和稀释,相对

湿度维持在 $40\% \sim 70\%$ 。第二阶段中,风速与相对湿度的变化成反比,风速的峰值正好与相对湿度谷值相对应,风速日变化明显,最大风速达到 $4.2 m \cdot s^{-1}$,相对湿度大多在 $93\% \sim 80\%$ 摆动,小尺度颗粒物的凝并、冷凝效应使得较多小颗粒转化成尺度较大的颗粒物,导致颗粒物浓度减小的同时能见度降低,形成大雾。 $PM_{2.5}$ 浓度占比与前一阶段略偏少,中午当温度升高,风速加大时相对湿度减小到 60% 。第三阶段中,虽然相对湿度略有降低,但雾滴脱水后霾粒子又再次悬浮在大气中,雾向霾发生转化(杨德保等,1994)。由于相对湿度仍维持在 $60\% \sim 80\%$,悬浮在空中的大气颗粒物经过长时间的积累,造成视程越来越差、空气质量恶化,在这一阶段中风速大多维持在 $0 \sim 1.5 m \cdot s^{-1}$,因此 $PM_{2.5}$ 浓度比第一、二阶段有明显增加。

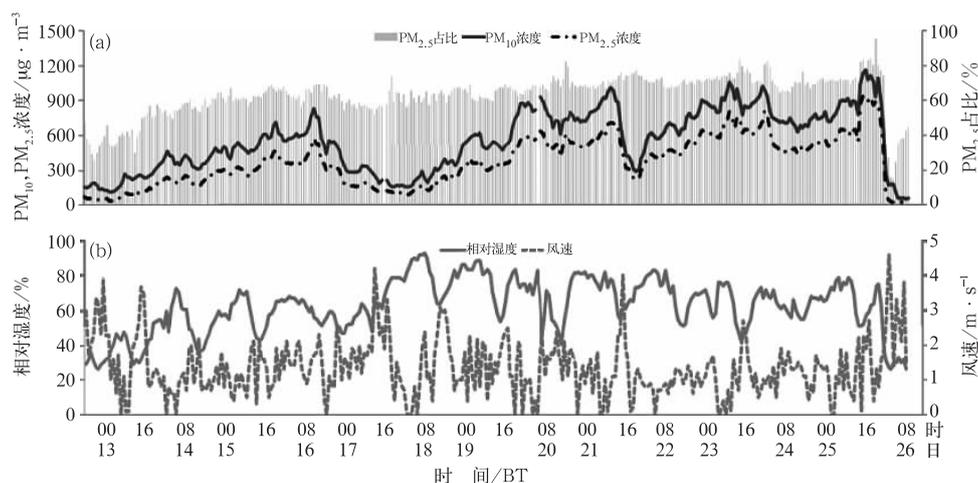


图1 石家庄市12月12日20时至26日08时 $PM_{2.5}$ 占比及 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 的浓度(a)、相对湿度和风速(b)时序图

Fig. 1 Hourly variations of percentage of $PM_{2.5}$ in PM_{10} and $PM_{2.5}$, PM_{10} mass concentration (a), surface relative humidity and wind speed (b) in Shijiazhuang from 20:00 BT 12 to 08:00 BT 26 December 2013

此次重霾污染天气过程中,污染物浓度变化具有明显阶段性的特征,地面风速等关键气象要素对于污染过程的形成具有直接影响,而关键气象要素则产生于特定的天气形势和天气系统下。因此,本文将从大气环流背景、大气层结等方面分阶段进一步深入分析产生此次重霾污染天气过程的关键气象条件。

2.2 大气环流背景分析

第一阶段中(图2a),在500 hPa上(图略)东北

地区有一冷涡发展维持,冷涡呈逆时针旋转而使得华北地区上空环流保持持续的平直西风,850 hPa温度场上为一暖脊,地面图上,河北中南部地区位于冷高压前部的均压场内,有利于低层大气静稳层结的形成与维持。第二阶段中(图2b),500 hPa冷涡南移至 $44^{\circ}N$ 、 $120^{\circ}E$,引导弱冷空气扩散南下,中南部地区地面风速加大,为弱反气旋环流控制,且在东部地区有弱降水出现,污染物浓度有所减小。第三阶段(图2c),弱冷空气过境后850 hPa温度快速回升,850 hPa温度脊更为明显,而等温线较为稀疏,

表明气团属性较为均一,对应地面为高压前部的均压场,有利于污染物的进一步积累。21日,弱冷空气再次快速移过,但强度更弱,污染物浓度下降幅度不明显,直至25日强冷空气伴随着地面冷锋的再次到来,历经12d的重霾污染过程才得以结束。

此次污染过程中,当污染物浓度迅速增加时,对

应的大气环流背景为,高空以偏西或西北气流为主,850 hPa在河北省中南部地区有明显暖脊,925 hPa以下风速较小,地面被冷高压前部均压场或锋前暖区所控制,污染物浓度最高的石家庄、邢台和衡水地区正好位于地面弱辐合场内。

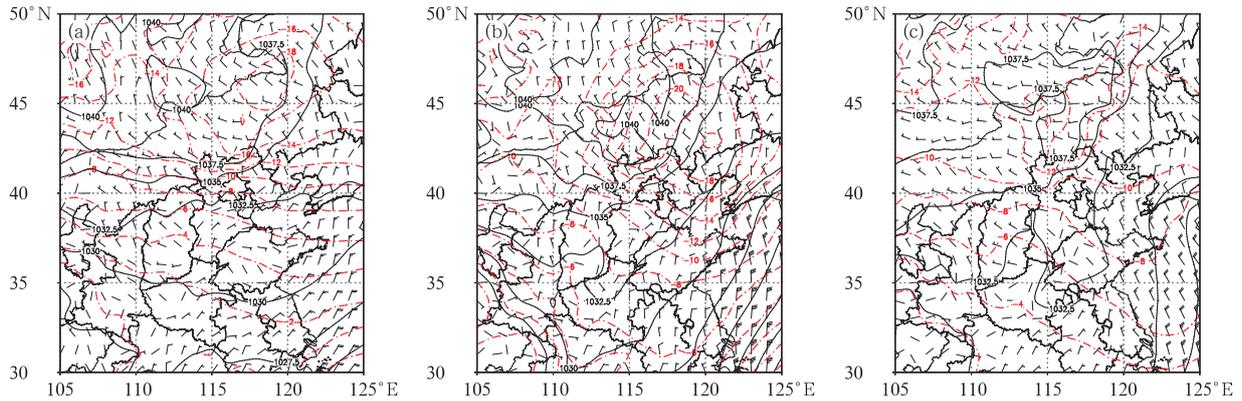


图2 2013年12月14—25日重污染过程第一阶段(a)、第二阶段(b)、第三阶段(c)平均地面气压场(实线)、地面风场(风向杆)以及850 hPa温度场(点划线)

Fig. 2 The mean sea level pressure (solid lines), surface wind (barb) and 850 hPa temperature (dot-dash lines) in stage 1 (a), stage 2 (b) and stage 3 (c) during the severe pollution process in 14–25 December 2013

在这次超长时间的重霾污染天气过程中共有三次冷空气影响,其中前两次冷空气势力太弱是此次重污染过程持续时间较长的重要原因。17日冷高压中心最大强度为1052 hPa,850 hPa温度场上高空锋区较明显,冷高压路径为西北路径,但主体南压不明显,冷空气主要以扩散形式南下。21日冷高压主体同样偏北,与17日相比冷空气强度更弱,冷高压中心最大强度为1048 hPa,中心位于内蒙古东部,850 hPa温度梯度较小,冷空气较为浅薄,仅在海平面气压场上较为明显,河北位于地面高压底部,随着冷空气不断渗透南下,14时冷高压后部西南风风速增大,河北南部地区污染物浓度稍有减小。相比前两次冷空气,25日冷空气势力强大,冷高压中心达1065 hPa,且地面气压梯度较大, ΔP_3 达3 hPa,冷锋过后,河北省空气质量迅速转好。

2.3 大气层结变化分析

稳定的大气环流为污染物的积累提供了大尺度背景条件,而稳定的层结使空气污染可以持续、加强。混合层高度能够表征大气近地面层的稳定性和垂直交换能力,也是影响大气污染物扩散的主要气

象因子之一。在整个重霾污染天气过程中,石家庄市的混合层高度14日起由588 m下降至400 m以下,15日降至228 m后混合层高度始终维持在200~300 m,最低达208 m; $PM_{2.5}$ 日均浓度与混合层高度呈现明显的反向变化关系,两者相关系数达到-0.74(图3)。混合层高度越低,越不利于污染物扩散,空气污染物浓度越大,当混合层高度维持在300 m以下时,空气污染物被积聚在近地面层, $PM_{2.5}$ 日均浓度达到 $300 \mu g \cdot m^{-3}$ 以上,混合层高度的降低与污染物浓度增高同步出现。

混合层高度常受到逆温层底部高度的限制,逆温会使大气垂直对流运动受阻,大气污染物不易扩散,大气层结尤其是大气低层的层结结构对污染过程有直接影响。虽然17和21日均在污染期间,但低层大气层结存在明显不同。

17日(图4a)850 hPa以下为一致的东北风,且近地层风速较大,而探空温度曲线表明除940和870 hPa附近有逆温外,温度均随高度递减,逆温层结破坏,大气的水平扩散和垂直扩散能力均有加强, $PM_{2.5}$ 浓度明显下降,但由于冷空气变性较快,18日20时开始逆温层重建(图略), $PM_{2.5}$ 浓度也随之迅

速增加。

21 日(图 4b)冷空气强度更弱,且浅薄,因而对 850 hPa 以下整层大气层结改变不大,仅破坏了 960 hPa 以下的逆温层,这次弱冷空气对污染物的垂直扩散作用很有限,低层风速的加大(图 7b)使部分污染物沿低层水平风场迅速传播,当河北南部地

区空气质量改善的同时迫使河北中部的廊坊地区 PM_{2.5} 浓度急速上升。这次弱冷空气影响时间也比 17 日更短,22 日 08 时逆温层再次重建(图略),因而此次冷空气对河北中南部地区污染物的清洁作用持续时间更短。



图 3 2013 年 12 月 10—30 日石家庄市平均混合层高度和日平均 PM_{2.5} 浓度

Fig. 3 The time series of mixing height and the concentration of PM_{2.5} of Shijiazhuang in 10—30 December 2013

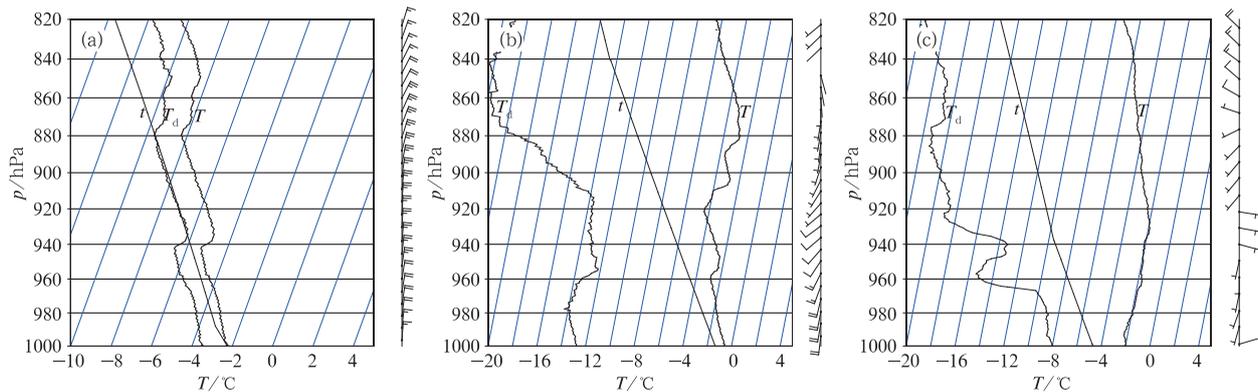


图 4 2013 年 12 月 17 日 20 时(a)和 21 日 20 时(b)邢台站探空图,以及 18、19 和 22 日 20 时邢台站平均探空图(c) (T、T_d 和 t 分别为层结曲线、露点曲线和抬升曲线)

Fig. 4 Profile of temperature, dewpoint temperature and wind at Xingtai at 20:00 BT 17 (a) and 21 (b) December 2013 and average profile of temperature, dewpoint and wind at Xingtai at 20:00 BT of 18, 19 and 22 December 2013 (c) (Stratification curve, dew point curve and state curve are marked with T, T_d and t)

为进一步研究逆温层与污染物增长速率的相关关系,本文选取 2000 m 以下的逆温层强度和厚度(图 5)进行计算(若存在多层逆温,则将多层逆温的温差和厚度进行累加,计算总的逆温强度和厚度),并叠加日均污染物浓度的逐日增长速率进行分析。逆温层厚度和强度均与污染物增长速率有一定相关性,其中逆温层厚度与污染物增长速率之间的相关性更好。即当污染物浓度不断加大时,近地面层逆温层结稳定维持,逆温层顶高度不断增大;而当逆温

层厚度较小,逆温较弱时,污染物浓度增长也较弱或浓度减小,其厚度变化对于污染物浓度的变化则有较好的指示意义。

综上所述,18、19 和 22 日污染物增长最快时期的探空层结结构有较高的相似性(图 4c),并有以下特征:(1)逆温层较厚,自地面延伸至 900 hPa 附近;(2)存在与逆温层相对应的小风速区,在 900 hPa 以下大部分风速在 2 m·s⁻¹ 以下。较深厚的逆温层结与小风速区的存在不利于污染物的扩散,为污染

物的迅速积累提供了条件。当近地面逆温层出现且为静风时,污染物浓度开始稳定增加,造成能见度降低,白天近地面层的辐射增温对污染物浓度虽然有较强的削弱作用,但是当没有明显冷空气活动时,逆

温层继续维持并加厚,这样逆温层的稳定维持又使得污染物持续增加,这种正反馈机制使得污染物浓度增大的同时逆温层的厚度不断加大。

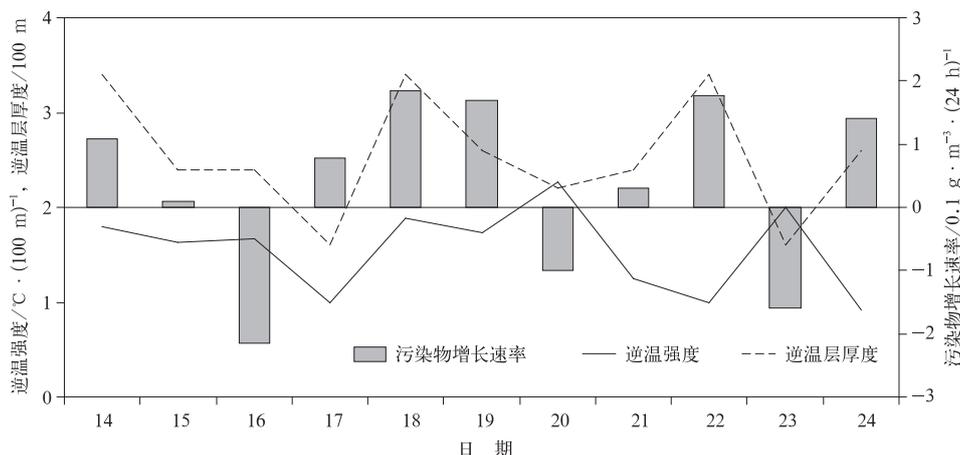


图 5 2013 年 12 月 14—24 日重污染过程期间邢台逆温层厚度、逆温强度以及污染物增长速率逐日变化

Fig. 5 Time series of thickness, strength of inversion layer and increase rate of pollutant at Xingtai during 14–24 December 2013

2.4 污染物扩散与输送气象条件分析

空气污染物的积累受大尺度环流和近地面层结的共同影响,污染物的扩散主要由低层大气层结的改变引起,而低层大气层结的改变则与冷空气的强度和持续时间息息相关。宝坻位于华北平原北部,利用宝坻站资料分析其上空大气层结结构,可显示冷空气越山到达平原地区的强度和影响层次。结合地形和气候特点,当影响河北的冷空气为西北路径时,强度特点为山区强于平原,北部强于南部,分析与污染物扩散联系密切的近地面风场(图 2b),也有一部分冷空气沿东北路径由北部平原南下至南部平原。因此分析宝坻地区大气层结对于准确把握冷空气到达南部平原地区的强度和层次有较好的参考意义。

根据宝坻站风廓线资料反演计算出其上空温度平流变化,能够在一定程度上反映冷空气的强度和层次(图 6)。12 月 17—18 日,冷平流自 2000 m 左右一直延伸到地面,且冷平流首先在较高层出现,然后向低层延伸,表明此次冷空气南下过程中越山到达河北北部平原地区时有一定强度,冷气团接地,能够改变原有近地面稳定大气层结结构。结合邢台站

的探空曲线(图 4),在冷空气到达后逆温稳定层结消失,说明冷空气在到达河北南部平原地区时仍可接地,改变了大气的稳定层结并导致空气污染物浓度迅速下降。但由于高层无冷空气补充,850 hPa 迅速回暖,冷平流的持续时间较短,18 日 20 时以后已转为整层暖平流,污染物浓度重新迅速增高。而 21 日的冷平流明显更弱且并未接地,仅在部分层次为弱冷平流,其余层次为暖平流,说明此次冷空气影响层次较低,冷空气主要在低层渗透南下,到达南部平原地区时强度更弱,无法彻底打破稳定大气层结,仅由于近地面层风速加大造成污染物浓度下降,风速迅速减小后污染物浓度迅速回升。

两次冷空气的强度和所影响的层次有所不同,对重污染天气的清洁能力也有较大差别。瞬时风速增大对污染物清除所起的作用是不能持续的,不断补充输送的冷性气团才能够持续降低空气污染物浓度。深厚冷空气使大气污染物既能在水平方向产生扩散,也能在垂直方向产生扩散,伴随着局地气团属性的改变,污染物浓度迅速下降并维持。而浅薄冷空气对大气污染物的清除作用仅以水平扩散为主,清洁能力较弱,持续时间也较短,污染物浓度只在风速较大时显著下降,之后迅速累积。深厚冷空气与

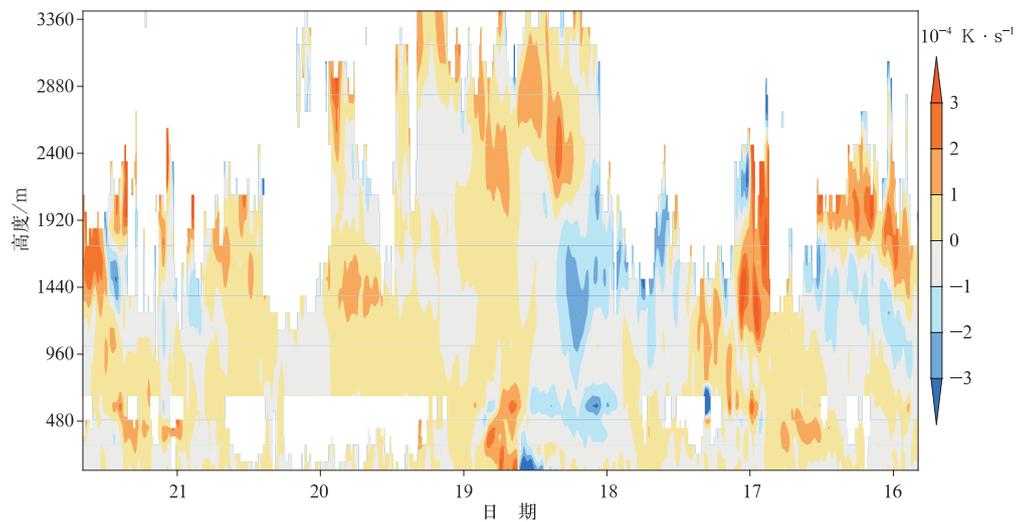


图 6 2013 年 12 月 16—21 日宝坻站温度平流时序图

Fig. 6 Time series of temperature advection at Baodi during 16–21 December 2013

浅薄冷空气对大气污染物清除能力的不同,主要在于是否有较强的垂直扩散能力。

风场对大气污染物的水平稀释和输送起主要作用。一般来说,风速越大对污染物的扩散能力越强,但当大气有逆温层存在时,风速越大,则抬升高度越低,这样反而会增加污染物的地面浓度,同时风速增大还可能增加开放源源强。因此风速对污染物环境浓度具有双重影响。在本次重霾污染天气过程中,当风速较大时(一般在 $2.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上),风速与相

对湿度成反比,同时与污染物浓度也成反比(图 1)。但污染较重时地面风场多在 $2.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以下,在风场较弱的情况下,风速对污染物增加速率的影响则需进一步研究。当大气处于静稳形势时,地面风场的变化一定程度上代表了整层近地面风场的变化。在污染迅速增加阶段(18 和 19 日),河北中南部地区风速在 $0.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以下,接近静风,西南部有一风场辐合带(图 7a),有利于污染物向此地水平输送并积聚。21 日弱冷空气南下,冷高压中心位

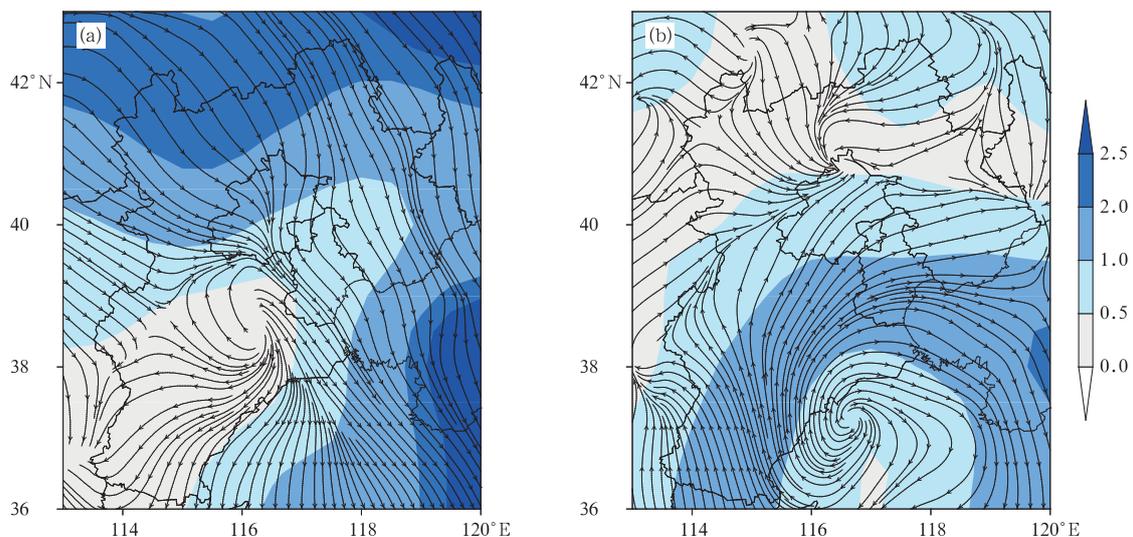


图 7 2013 年 12 月 18 和 19 日河北中南部地面平均流场(a)与 22 日 14 时地面流场(b)

(填色为第三阶段平均风速值,单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)

Fig. 7 Average surface flow field in the central and southern part of Hebei on 18 and 19 December (a)

and surface flow field at 14:00 BT 22 December (b) 2013

(Shaded area represents the average wind speed, unit: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)

于河北东南部(图 7b),河北南部位于冷高压后部,被偏南气流控制,污染物沿偏南气流向北输送,在廊坊地区风速辐合明显,再加上地形的阻挡作用,污染物在此积聚,因而造成了廊坊以南地区污染物浓度迅速下降而廊坊地区污染加重。由此可知,近地面风场对污染物的扩散能力不仅与风速相关,更受到风场的辐合辐散以及地形的影响。

为进一步分析近地面流场水平输送的作用,给出了地面风速及风场散度与污染物浓度增长速率(图 8)。14—24 日,地面日平均风速一直维持在 $2.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以下,当地面风场辐合时,风速与污染物浓度增长速率呈显著的正相关关系(相关系数达到 0.36),而散度与污染物浓度增长速率为显著的负相关关系(相关系数达到 -0.54),且三者峰值同时出现。表明在静稳大气且排放源固定的条件下,地面风场的水平输送大小一定程度上决定了污染物

浓度增长速率的大小,当风场辐合最强时,污染物浓度增长最快。

总的来说,稳定大尺度环流形势为近地面层结的形成和稳定维持提供了环境条件,并在受到弱冷空气影响时,能够依靠本身稳定的特性较快消解冷空气的影响,使近地面层结恢复到稳定状态并维持。而稳定的近地面层结禁锢了空气的流动和污染物的扩散,尤其削弱了近地面空气的垂直交换能力。只有当冷空气强度足以打破稳定层结结构时,垂直和水平扩散才会明显加强,不过由于冷空气势力不足以影响大尺度环流背景,低层层结在冷空气过境后迅速恢复稳定,气团性质相对均一,空气扩散能力也随之迅速下降,甚至出现辐合使污染物汇聚。这种大尺度环流背景下的稳定层结长时间维持,导致了污染物无法扩散、稀释,形成了这次持续 12 d 的重霾污染过程。

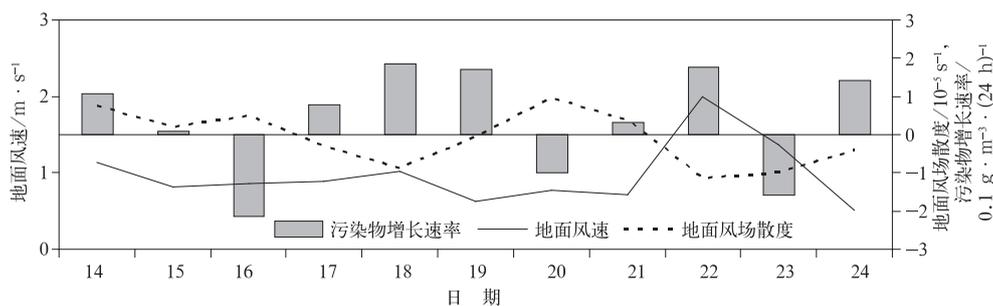


图 8 2013 年 12 月 14—24 日污染物增长速率、地面风速与地面风场散度时序图

Fig. 8 Time series of increase rate of pollutant, wind speed and divergence of surface wind field at Shijiazhuang

3 结论与讨论

通过对此次连续 12 d 重霾污染天气过程的分析,得到以下结论:

(1) 此次重霾污染天气过程造成具有持续时间长、范围广和强度大的特点,整个过程呈现“污染加重—略减—继续加重—达到极值—转好”的特点,根据这一特点及天气背景的不同将其分为:冷高压前部、弱冷锋过境、锋前暖区三个阶段。

(2) 重霾污染天气过程中污染物迅速积累阶段有相似的大尺度稳定大气环流背景:高空以偏西或西北气流为主,850 hPa 在河北省中南部地区有明显暖脊,925 hPa 以下风速较小,地面为冷高压前部

均压场或锋前暖区控制,污染物浓度最高的区域位于地面弱辐合场内。

(3) 污染物累积阶段还具有类似的低层大气层结结构,即近地面层混合层高度较低,逆温层结稳定维持,逆温层厚度较大。混合层高度越低,越不利于污染物扩散,空气污染物浓度越大,混合层高度的降低与污染物浓度增高同步出现。逆温层厚度与污染物浓度有同步、同向变化特点,对污染物积累有较好的指示意义。

(4) 此次过程中大气对于污染物的扩散能力与冷空气活动强弱有关,过程中 17 和 21 日两次弱冷空气活动不能彻底清洁大气,导致污染过程持续时间长。17 日冷空气虽有一定的强度并且接地,在水平和垂直方向都有一定扩散能力,短时间内使污染

物浓度显著下降,但由于局地冷气团变性较快,对污染物清结持续时间短;21日冷空气强度更弱且浅薄,持续时间也更短,仅在水平方向上有一定扩散作用,清洁大气的效果更不明显。

(5) 在静稳大气且排放源固定的条件下,近地面风场的水平输送大小一定程度上决定了污染物浓度增长的大小,当风场辐合最强时,污染物浓度增长最快。而当冷空气较浅薄,垂直扩散能力较差时,污染物的水平传播同样与近地面风场的辐合辐散直接相关,往往造成上游地区污染减轻而下游地区污染加重的情况。

参考文献

- 曹伟华,梁旭东,李青春. 2013. 北京一次持续性雾霾过程的阶段性特征及影响因子分析. *气象学报*, 71(5): 940-951.
- 陈训来,范绍佳,李江南,等. 2008. 香港地区空气污染的典型天气背景形势. *热带气象学报*, 24(2): 195-199.
- 段宇辉,景华. 2010. 河北省夏季空气污染过程气象条件. *气象科技*, 38(6): 715-720.
- 过宇飞,刘端阳,周彬,等. 2013. 无锡市霾天气特征及影响因子研究. *气象*, 39(10): 1314-1324.
- 何建军,余晔,刘娜,等. 2013. 基于 WRF 模式的兰州秋冬季大气污染预报模型研究. *气象*, 39(10): 1293-1303.
- 靳军莉,颜鹏,马志强,等. 2014. 北京及周边地区 2013 年 1—3 月 $PM_{2.5}$ 变化特征. *应用气象学报*, 25(6): 690-700.
- 李琼,李福娇,叶燕翔,等. 1999. 珠江三角洲地区天气类型与污染潜势及污染浓度的关系. *热带气象学报*, 15(4): 363-369.
- 李喜仓,白美兰,马玉峰,等. 2011. 呼和浩特市城区发展对大气环境的影响分析. *气象*, 31(12): 1572-1577.
- 梁永贤,尹魁浩,颜敏,等. 2012. 深圳市大气能见度影响因子研究. *云南环境科学*, 31(4): 79-82.
- 罗宇翔,陈娟,郑小波,等. 2012. 近 10 年中国大陆 MODIS 遥感气溶胶光学厚度特征. *生态环境学报*, 21(5): 876-883.
- 毛宇清,李聪,沈澄,等. 2013. 两次秸秆焚烧污染过程的气象条件对比分析. *气象*, 39(11): 1473-1480.
- 孙亮. 2012. 灰霾天气成因危害及控制治理. *环境科学与管理*, 37(10): 71-75.
- 王宏,林长城,蔡义勇,等. 2008. 福州市 PM_{10} 突变特征与气象条件的关系研究. *热带气象学报*, 24(5): 564-568.
- 吴兑. 2005. 关于霾与雾的区别和灰霾天气预警的讨论. *气象*, 31(4): 3-7.
- 吴兑. 2006. 再论相对湿度对区别都市霾与雾(轻雾)的意义. *广东气象*, (1): 9-13.
- 吴兑,廖碧婷,吴蒙,等. 2014. 环首都圈霾和雾的长期变化特征与典型个例的近地层输送条件. *环境科学学报*, 34(1): 1-11.
- 徐晓峰,李青春,张小玲. 2005. 北京一次局地重污染过程气象条件分析. *气象科技*, 33(6): 543-547.
- 杨德保,王式功,黄建国. 1994. 兰州市区大气污染与气象条件的关系. *兰州大学学报(自然科学版)*, 30(1): 132-136.
- 姚青,韩素芹,蔡子颖,等. 2012. 天津城区春季大气气溶胶消光特性研究. *中国环境科学*, 32(5): 795-802.
- 张琳娜,郭锐. 2014. 2012 年冬季北京三种高影响天气的关联与成因分析. *气象*, 40(5): 598-604.
- Doyle M, Dorling S. 2002. Visibility trends in the UK 1950—1997. *Atmos Environ*, 36(19): 3161-3172.
- Latha K M, Badarinath K V S. 2003. Black carbon aerosols over tropical urban environment—A case study. *Atmos Res*, 69(1/2): 125-133.
- Lee Yuetlai, Sequeira R. 2002. Water-soluble aerosol and visibility degradation in HongKong during autumn and early winter, 1998. *Envir Pollution*, 116(2): 225-233.
- Schichtel B A, Husar R B, Falke SR, et al. 2001. Haze trends over the United States 1980—1995. *Atmos Environ*, 35(30): 5205-5210.
- William C M, Derek E D. 2003. Estimates of aerosol species scattering characteristics as a function of relative humidity. *Atmos Res*, 35(16): 125-133.