ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第6期

Vol.35 No.6

2014

中国科学院生态环境研究中心 主办

科学出版社 出版

双奖期刊

环境科学
(HUANJING KEXUE)
ENVIRONMENTAL SCIENCE
第35卷 第6期
2014年6月15日

目 次

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 …… 廖晓农,张小玲,王迎春,刘伟东, 杜佳,赵玲慧(2031)
阜康大气气溶胶中水溶性无机离子粒径分布特征研究 …… 苗红妍,温天雪,王跃思,刘子锐,王丽,兰中东(2045)
上海地铁站台大气颗粒物中过渡金属研究 …… 包良满,雷前涛,谈明光,李晓林,张桂林,刘卫,李燕(2052)
七一冰川地区苔藓中重金属元素含量研究 …… 马娟娟,李真(2060)
冬季东海、南黄海中DMS和DMSP浓度分布及影响因素研究 …… 宋以柱,张洪海,杨桂朋(2067)
大亚湾石化排污海域重金属污染及生态风险评价 …… 徐姗楠,李纯厚,徐娇娇,肖雅元,林琳,黄小平(2075)
深圳水库群表层水中全氟化合物的分布特征 …… 王鑫璇,张鸿,何龙,沈金灿,柴之芳,杨波,王艳萍(2085)
表层岩溶泉水中多环芳烃污染特征及来源解析 …… 孙玉川, 沈立成,袁道先(2091)
桂江主要离子及溶解无机碳的生物地球化学过程 …… 唐文魁,陶贞,高全洲,毛海若,姜光辉,焦树林,郑雄波,张乾柱,马赞文(2099)
汾河源区不同景观带水文过程研究 …… 杨永刚,李彩梅,秦作栋,邹松兵(2108)
北京市通州区地下水分层质量评价及水化学特征 …… 郭高轩,琚宜文,翟航,许亮,沈媛媛,纪轶群(2114)
光透法定量两相流中流体饱和度的模型及其应用 …… 章艳红,叶淑君,吴吉春(2120)
紫色土坡耕地氮淋溶过程及其环境健康效应 …… 陈维梁,高扬, 林勇明,朱波,徐亚娟,于贵瑞,吴承祯(2129)
基于非点源溶解态氮负荷估算的率水流域土地利用结构优化研究 …… 陆宇超,毕孟飞,李泽利,沙健,王玉秋,钱丽萍(2139)
镇江老城区古运河沉积物氮及有机质垂向分布及污染评价 …… 周晓红,李义敏,周艺,卫安平,周广顺, 肖思思(2148)
两种沉水植物对上覆水和间隙水中可溶性无机氮的影响 …… 杨文斌,李阳,孙共献(2156)
湖泊沉积物短时间反复扰动下悬浮物上生物有效磷的动态变化 …… 武晓飞,李大鹏(2164)
不同扰动强度下城市重污染河道底泥对磷吸收和固定的影响 …… 王尚, 李大鹏(2171)
池塘残饵对底泥氮、磷释放影响的模拟研究 …… 吕元蛟,李瑞娇,张念,赵峰,谢从新,张敏(2178)
再悬浮过程中河流底泥PAHs的迁移与释放 …… 王晓慧,毕春娟,韩景超(2185)
低分子有机酸对汞氧化还原反应的影响 …… 赵士波,孙荣国,王定勇,王小文,张成(2193)
活性炭催化过氧化氢去除荧光增白剂 …… 刘海龙,张忠民,赵霞, 焦茹媛(2201)
准分子灯光照降解水相中烷基酚的动力学 …… 刘玉海, 叶招莲, 文颖频,毕承路(2209)
AF+BAF用于处理树脂化工集中区废水厂尾水的研究 …… 涂勇,刘伟京,张耀辉,徐军,唐敏,陈勇,白永刚(2216)
镉(Ⅱ)-8-羟基喹啉分子印迹聚合物微球的合成及吸附性能研究 …… 杨春艳,陈复彬,赵慧,常自强,章竹君(2223)
微气泡曝气生物膜反应器同步硝化反硝化研究 …… 刘春,年永嘉,张静,张明,张磊,龚鹏飞,肖太民,李星(2230)
聚乳酸/淀粉固体缓释碳源生物反硝化研究 …… 唐丹琦,王娟,郑天龙,刘建国,汪群慧(2236)
丝状菌膨胀对无纺布生物反应器处理效果及膜污染特征的影响 …… 侍宽,薛罡,高品,吴凡(2241)
聚合氯化铝去除污泥水中磷的工艺优化 …… 周振,胡大龙,乔卫敏,陈冠翰,蒋玲燕,李震,麦穗海(2249)
鄱阳湖持久性有机污染物(POPs)长距离传输潜力模拟 …… 弓晓峰,向洪锐,陈春丽,周文斌,王佳佳,刘春英,曾艳(2256)
基于不确定性分析的垃圾焚烧烟气中重金属的土壤沉积及生态风险评估 …… 廖志恒,孙家仁,吴兑,范绍佳,任明忠,吕家扬(2264)
农药企业场地土壤中苯系物污染风险及管理对策 …… 谭冰,王铁宇,李奇锋,张海燕,庞博,朱朝云,王道涵,吕永龙(2272)
渤海湾海域10种鱼类中二噁英类及指示性多氯联苯的污染特征研究及风险评价 …… 王莎莎,高丽荣,田益玲,朱帅,张芹(2281)
基于荧光传感器Frex的特性检测水质环境中生物毒性物质 …… 赵巍,汪钊,蔡强,欧文斌,孟凡国(2287)
对苯二酚抑制铜绿微囊藻生长下藻毒素的产生与释放 …… 张元春,梁文艳,赵远,李飞贞,曹敬灿,胡绍杰(2294)
基于沼液的培养基及产油小球藻藻种选育 …… 赵凤敏,梅帅,曹有福,丁进锋,徐嘉杰,李树君(2300)
酸性矿山废水库周边土壤微生物多样性及氨氧化菌群落研究 …… 刘莹,王丽华,郝春博,李璐,李思远,冯传平(2305)
河蚬(*Corbicula fluminea*)扰动对表层沉积物中氨氧化菌群落结构和丰度的影响 … 王雪,赵大勇,曾巾,余多慰,吴庆龙(2314)
海洋油气田沉积物产甲烷活性及微生物生态 …… 田琪,王佳,范晓蕾,罗生军,郭荣波,邱艳玲(2322)
DGGE及T-RFLP分析光照下电位对细菌群落的影响 …… 吴义诚,邓欢,肖勇,赵峰(2328)
重金属抗性解磷细菌的磷溶解特性研究 …… 田江,彭霞薇,李霞,孙雅君,冯红梅, 江泽平(2334)
1株耐冷兼性嗜碱好氧反硝化菌的分离鉴定及反硝化特性 …… 王兆阳,陈国耀,姜珂,许培雅(2341)
黑麦草-丛枝菌根对不同番茄品种抗氧化酶活性、镉积累及化学形态的影响 …… 江玲,杨芸,徐卫红,王崇力,陈蓉,熊仕娟,谢文文,张进忠,熊治庭,王正银,谢德体(2349)
黄河三角洲区土壤活性氮对盐分含量的响应 …… 李玲,仇少君,陈印平,赵西梅,刘京涛,陆兆华(2358)
宁南山区不同草地土壤原位矿化过程中氮素的变化特征 …… 蒋跃利,赵彤,闫浩,黄懿梅(2365)
长期施用四环素残留猪粪对土壤中耐药菌及抗性基因形成的影响 …… 张俊,杨晓洪,葛峰,王娜,焦少俊,叶波平(2374)
长期不同耕作方式对紫色水稻土重金属含量及有效性的影响 …… 常同举,崔孝强,阮震,赵秀兰(2381)
伊犁河流域土壤重金属环境地球化学基线研究及污染评价 …… 赵新儒,特拉津·那斯尔,程永毅,詹江渝,杨剑虹(2392)
江苏如东互花米草盐沼湿地重金属分布及其污染评价 …… 张龙辉, 杜永芬, 王丹丹, 高抒, 高文华(2401)
小流域农业面源氮污染时空特征及与土壤呼吸硝化关系分析 …… 欧阳威,蔡冠清,黄浩波,耿晓君(2411)
保护性耕作下小麦田土壤呼吸及碳平衡研究 …… 张赛,王龙昌, 黄召存,贾会娟,冉春燕(2419)
米槠天然林和人工林土壤呼吸的比较研究 …… 吴君君,杨智杰,翁发进,刘小飞,陈朝琪,林伟盛,王小红,陈坦(2426)
水力停留时间对复合式厌氧折流板反应器乙醇型发酵制氢系统的影响 …… 刘晓烨,张洪,李永峰(2433)
《环境科学》征订启事(2208) 《环境科学》征稿简则(2400) 信息(2084,2200,2229,2391)

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

廖晓农[1,2],张小玲[1,2],王迎春[3],刘伟东[3], 杜佳[4],赵玲慧[4]

(1. 中国气象局北京城市气象研究所,北京 100089; 2. 中国气象局京津冀环境气象预报预警中心,北京 100089; 3. 北京市气象局,北京 100089; 4. 北京市气象台,北京 100089)

摘要: 在北京地区,除冬季供暖期外盛夏也是雾-霾天气的高发季节,与我国南方不同. 使用微波辐射仪、风廓线和常规气象探测资料、NCEP 再分析资料以及大气成分观测结果,通过对比分析揭示了冬、夏季持续 6 d 的 2 个雾-霾过程形成和维持机制的异同. 冬季雾-霾过程出现在高空西北气流、低层多短波活动的背景下,其形成和维持的主要机制是边界层内始终有逆温层、地面弱风场、底层湿度逐渐增大. 逆温层昼高夜低、湿度昼小夜大是影响 $PM_{2.5}$ 质量浓度和能见度日变化的重要环境因子. 在雾-霾天气持续期间地面弱风场能够维持主要源于冷空气势力弱、常不能影响到地面. 此外,入夜后地面迅速辐射降温、边界层上层有暖平流以及空气过山后下沉增温在逆温层的形成中起了关键作用. 然而,对于夏季持续性雾-霾天气,气溶胶区域输送、环境大气保持对流性稳定、空气的高饱和度是其发生的重要条件. 在副热带高压长时间控制下对流层低层盛行偏南风,北京的 $PM_{2.5}$ 质量浓度随着偏南风风速增大升高. 对流层底层系统性偏南风与北京附近的山谷风共同构成了从北京以南气溶胶累积地向北输送的机制. 夏季雾-霾过程低层没有逆温,但是北京上空一直维持超过 200 $J \cdot kG^{-1}$ 的对流抑制能量,它同样限制了污染物的垂直扩散. 夏季自由对流高度也存在昼夜变化,其对 $PM_{2.5}$ 浓度和能见度的作用与逆温层高度升降相同. 因此,冬、夏个例分别代表了 2 种不同类型的持续性雾-霾过程,导致差异的根本原因在于大气环流型.

关键词:北京; 不同季节; 持续性雾-霾; 气象条件; 大气环流型; 差异分析

中图分类号: X513 **文献标识码**: A **文章编号**: 0250-3301(2014)06-2031-14 **DOI**: 10.13227/j.hjkx.2014.06.001

Comparative Analysis on Meteorological Condition for Persistent Haze Cases in Summer and Winter in Beijing

LIAO Xiao-nong[1,2], ZHANG Xiao-ling[1,2], WANG Ying-chun[3], LIU Wei-dong[3], DU Jia[4], ZHAO Ling-hui[4]

(1. Institute of Urban Meteorology, China Meteorological Administration, Beijing 100089, China; 2. Environmental Meteorology Forecast Center of Beijing-Tianjin-Hebei, China Meteorological Administration, Beijing 100089, China; 3. Beijing Meteorological Bureau, Beijing 100089, China; 4. Beijing Meteorological Observatory, Beijing 100089, China)

Abstract: Summer is another peak season for haze besides winter in Beijing area, which is different from that in South China. The data of microwave radiometer, profiler, sounding, AWS, NCEP (NCAR) and air pollution monitors were used in the analysis of two haze cases which occurred in winter and summer, respectively. Both cases lasted for 6 days. This research focused on the difference in the mechanism of the formation and persistence of haze cases in various seasons. In winter, north-westerly flow dominated Beijing at upper-levels and a few of shallow troughs passed by during persistent haze development. The main meteorological reasons for lower visibility in 6 days were: there was an inversion in the boundary layer all the time; wind was weak at surface and moisture went up gradually. The change of inversion height and humidity day and night led to the diurnal variation of $PM_{2.5}$ concentration and visibility. The surface wind speed kept lower because the weak cold air could not often hit the surface during the haze case. In addition, three factors played key roles in the inversion formation in boundary layer. One was that the rapid decrease in the surface temperature after sunset due to the radiation. At the same time, there was some warm advection at upper boundary layer. The third one attributed to the temperature increase after the air flowing over the mountains and down. However, in summer, regional transportation of aerosol, sustained convective stability and high air saturation were very important factors for the haze formation. Under the sub-tropic high control, the wind direction at lower troposphere was south. The $PM_{2.5}$ concentration went up when the speed of south wind increased. The south flow caused by both synoptic scale systems and mountain-valley breeze near Beijing transported the aerosol northward from higher polluted area. There was no inversion in the summer haze case. But, the convective inhibition was kept over 200 $J \cdot kG^{-1}$. As the result, it was not favorable for the pollutant diffusion upward. Furthermore, the level of free convection also changed during the day and at the night, which had similar effect on the $PM_{2.5}$ concentration and visibility as the daily variation of inversion. In conclusion, these cases in winter and summer were categorized into two different kinds of persistent haze. The main reason leading to the difference was the synoptic pattern.

Key words: Beijing; different season; persistent Haze; meteorological condition; synoptic pattern; variance analysis

收稿日期: 2013-10-18; **修订日期**: 2014-01-11

基金项目: 国家科技支撑计划项目(2014BAC16B04);北京市科委绿色通道项目(Z131100005613024);国家自然科学基金项目(41075111);国家公益性行业(气象)专项(GYHY200806027)

作者简介: 廖晓农(1962~),女,硕士,研究员级高级工程师,主要研究方向为灾害性天气,E-mail:cristinlxn@126.com

雾和霾原本是两种本质上完全不同的、影响视程的自然天气现象. 雾(包括轻雾)是由大量 3 ~ 100 μm 的水滴或冰晶微粒组成的乳白色悬浮体,霾则是由 0.01 ~ 10 μm 极细微的气溶胶粒子均匀地浮游在空中导致空气普遍浑浊的现象. 根据“霾的观测和预报等级”规定(行标 QX/T 113-2010),在能见度小于 10 km 的情况下,当相对湿度低于 80% 时定义为霾; 超过 95% 时为雾; 介于 80% 和 95% 之间是雾-霾混合,需根据细颗粒物浓度或地面观测规范作进一步界定. 然而,当今我国主要城市的雾-霾已经不完全是自然现象,气溶胶污染日趋严重已变成雾-霾天气发生频率增大的主因[1], 其中 $PM_{2.5}$ 等细粒子浓度对能见度的影响最大[2~4]. 此外,多地持续性雾-霾天气频繁出现. 一次雾-霾过程少则 2 ~3 d,多则5 d 以上. 2013 年1 ~3 月京津冀地区持续 3 d 以上的雾-霾过程累计达到 8 次. 在雾-霾天气持续期间,细颗粒物浓度逐渐升高并最终达到重污染的程度. 例如:2013 年初北京上甸子本底站的 $PM_{2.5}$ 小时浓度就从最初的 150 $\mu g \cdot m^{-3}$ 升高到后期的 630 $\mu g \cdot m^{-3}$. 由于持续性雾-霾天气对市民的健康以及交通造成的影响更大,因此对其进行深入研究具有重要意义.

气溶胶粒子的重要来源是本地排放. 在本地排放一定的前提下,环境气象条件是影响气溶胶浓度的主要因素. 由于霾天气中大气污染物主要聚集在边界层内[5],因此 850 hPa 以下的温、湿、风最为重要. 通常,严重污染出现在地面附近为小风或静风等不利于污染物水平扩散的条件下. 此外,当对流层低层有逆温层、大气处于稳定状态时,限制了污染物的垂直扩散[6~17]. 逆温层越强、高度越低,则气溶胶浓度越大,对能见度的影响也越明显[18,19]. 由于一些气溶胶粒子具有很强的吸湿性,因此潮湿的环境下,干气溶胶粒子也会吸湿增长,并活化成凝结核参与雾滴的形成. 于是,有时就会出现雾-霾转换、雾-霾混合的情况[20,21]. 而且,气溶胶粒子吸湿后含水量增大,其对太阳光的散射能力明显高于干粒子,从而使能见度进一步恶化[13,22]. 雾-霾天气的发生还与边界层内空气的垂直运动分布有一定的关联,下沉运动被认为是一种不利于污染物垂直扩散的气象条件. 京津冀秋冬季的雾-霾天气发生时,逆温层高度较低,下沉运动一般在逆温层以上[23,24]. 然而,2013 年 1 月河北省中南部发生严重污染时,1 000 ~900 hPa 之间有强的下沉气流. 在广州地区旱季的霾天气过程中,下沉区出现在边界层内[25]. 说明雾-霾天气垂直速度的分布具有多样性,这可能与分析者使用资料的分辨率以及雾-霾天气发生的地域不同有关.

研究表明,一些地区的重污染发生在特定的风向条件下[23,26~31]. 例如:北京地区对流层底层维持西南风或东南风时,污染就会明显加重. 其原因在于气溶胶会以“城市烟羽”的形式被传播到下游数百公里[32],使得雾-霾过程表现出明显的区域特征. 同时,污染物的区域输送以及有利于污染物积累的天气形势在一段时间内稳定是持续性雾-霾天气形成的重要条件[3,33~36].

上述研究成果为认识雾-霾天气的形成和维持奠定了基础. 根据气候统计,京津冀地区雾-霾日的月际变化具有双峰特征,即:每年的 10 月 ~ 次年 3 月是雾-霾集中发生的季节,它与冬季供暖有关; 第二个高峰期在夏季特别是 7 ~ 8 月的盛夏[37],而且持续性雾-霾过程占一定的比例,这是京津冀地区雾-霾天气的重要特点之一. 那么,在非取暖季的盛夏持续性雾-霾与冬季污染事件的特征是否相同,导致其形成和维持的机制是什么? 这些涉及雾-霾预报预警的关键问题还没有得到很好的回答.

本研究采用常规观测、NCEP(NCAR)再分析资料、边界层风廓线雷达资料、微波辐射仪和大气成分观测资料,通过对比盛夏和冬季持续 6 d 的雾-霾过程,讨论了有利于雾-霾发生和维持的环境气象条件差异以及天气学机制,以期提高对北京地区不同季节雾-霾天气特征的认识.

1 资料及雾-霾日标准

1.1 资料

本研究使用了气象站地面观测数据、1° × 1° NCEP(NCAR)再分析资料、微波辐射仪和风廓线雷达探测资料. 其中,微波辐射仪设在北京大兴的观象台,有 12 个通道. 垂直探测高度 10 km,温湿廓线的分辨率为 0.1 ~ 1 km,时间分辨率 1 min. 风廓线雷达位于海淀气象站,是一部频率为1 290 MHz、探测高度3 500 m 的边界层雷达,测风资料的垂直分辨率 50 m,时间间隔 5 min.

气溶胶浓度来自位于海淀区宝联体育公园内的测站,采用美国的 1400a Tapered Element Oscillating Microbalance(TEOM)仪器观测,数据时间分辨率为 5 min,并且使用极值法、连续性和多物理量相关判定对比等方法对数据质量进行了控制.

气象观测数据的空间代表性一般为 80 km[38].

本研究使用的风廓线雷达、微波辐射仪、能见度观测站点以及宝联综合观测站之间的直线距离为 4 ~ 20 km. 由于雾-霾天气产生在水平方向热动力特征比较均匀的气团中,因此上述观测仪器得到的数据可以被用于雾-霾天气的研究中.

1.2　雾-霾日标准

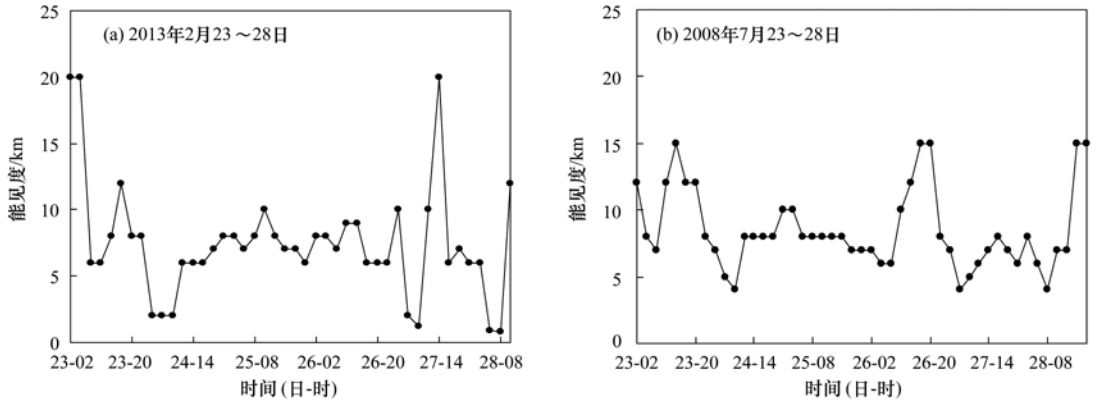
雾-霾天气的基本特征是能见度下降. 本研究规定:在剔除了现在天气是降水、扬沙、浮尘、沙尘暴、吹雪、雪暴的前提下,当 08:00 ~ 次日 08:00 任意时次能见度小于 10 km 时,计为一个雾-霾日. 考虑到雾-霾天气的日变化特征,进一步规定当 08:00 且当日连续 6 h 能见度达到或超过 10 km 时,认为一次雾-霾过程结束. 按照上述标准遴选了分别发生在盛夏和冬季、持续 6 d 的两个雾-霾过程,作为本研究分析的个例.

2　持续性雾-霾天气演变过程

本研究选取的冬季雾-霾个例出现在 2013 年 2 月 23 日 08:00 ~28 日 11:00,能见度呈总体下降趋势[图 1(a)]. 过程的前期(23 日 08:00 ~24 日08:00),能见度波动较大,在 2 ~12 km 变化. 24 日 08:00 ~26 日 20:00 是雾-霾天气的稳定维持期,绝大多数时次的能见度在 6 ~9 km. 26 日 20:00 以后,能见度又进入到一个大幅度波动阶段. 28 日早晨测站观测到大雾天气,能见度仅为 0.8 ~0.9 km. 此外,在能见度波动较大的阶段,午后视程较好,17:00以后转差, 08:00 前后达到最低点,具有一定的日变化特征. 而在能见度较稳定的时段,日变化不明显.

夏季个例发生在 2008 年 7 月 23 日 05:00 ~28 日 14:00. 其间,23 日 05:00 ~24 日 08:00 以及 26 日 08:00 ~28 日 14:00 能见度波动较大,白天视程明显变好,夜间能见度迅速降低; 24 日 08:00 ~26 日 08:00 能见度变化相对较小,无明显日变化[图 1(b)]. 此外,在雾-霾持续期间,视程也呈现降低的趋势.

综上所述,冬夏两季持续性雾-霾天气过程能见度演变的特征基本形同,只是夏季个例的变化幅度较小. 除冬季个例后期观测到大雾外,雾-霾天气持续期间,白天是霾(相对湿度小于 80%),而夜间则是雾-霾混合(相对湿度介于 80% 和 95% 之间).



图中时间 23-02 表示 23 日 02:00,下同

图 1　能见度时间序列

Fig. 1　Time series of visibility

3　雾-霾形成和维持的环境气象条件

3.1　冬季个例

由于能见度受细颗粒物浓度影响较大[2,3],因此本研究首先考察持续雾-霾过程中 $PM_{2.5}$ 浓度的演变特征及其与能见度升降之间的关联性. 结果表明,$PM_{2.5}$ 浓度变化具有一定的规律性(图 2). 除 25 日外,每日傍晚到前半夜浓度迅速增大,半夜过后又大幅度下降,一般在 02:00 前后达到低点后再次小幅度上升, 06:00 ~ 08:00 出现次峰值,随后下降. 上述变化规律与北京地区冬季供暖和机动车集中行驶的时间比较吻合. 其中,23 日(周六,正月十四)和 24 日(周日,正月十五)浓度很高,可能与假日增加供暖量以及燃放烟花爆竹有关. 对比图 1(a)和图 2 发现,25 日 05:00 之前能见度与气溶胶浓度之间的关联性不明显,但是此后两者之间呈负相关,即:气溶胶浓度下降能见度提高、气溶胶浓度增加能见度降低. 而且,能见度与气溶胶浓度的波动幅

度走势基本相同. 此外,25 日 14:00 以后,气溶胶浓度在波动中上升,也与能见度逐渐降低具有反向变化关系. 其间,25 日 14:00 能见度达到 10 km 是受降雪天气的影响. 上述分析表明,冬季雾-霾过程维持阶段,气溶胶浓度是影响能见度的关键因素之一. 值得注意,由于在雾-霾形成阶段视程与 $PM_{2.5}$ 浓度之间没有明显的相关性,因此雾-霾形成的机制、为何在不同阶段气溶胶浓度与能见度的关系有差异、是何机制导致气溶胶数浓度波动较小阶段没有明显的日变化等都是值得研究的问题.

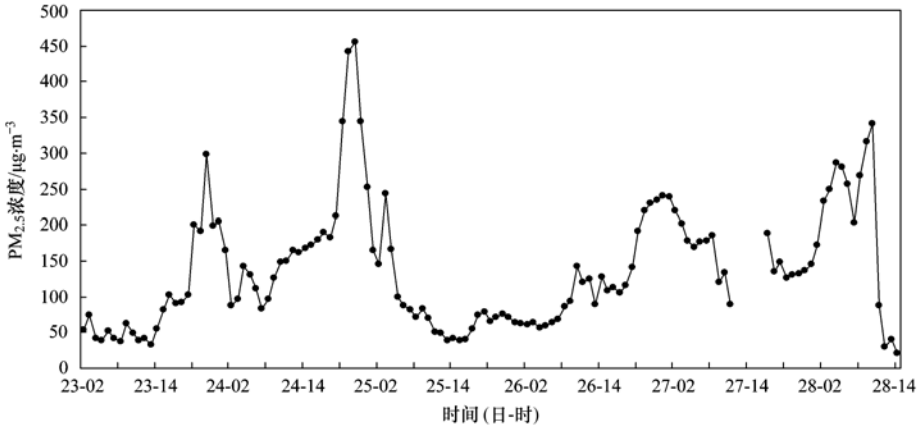


图 2 2013 年 2 月 23~28 日北京 $PM_{2.5}$ 质量浓度时序图

Fig. 2 Time series of $PM_{2.5}$ concentration in Beijing from 23rd to 28th Feb., 2013

对北京地区污染物源解析发现,硫酸盐、硝酸盐、铵盐占较大比重[39,40],这些化合物具有较强的吸湿性. 本研究使用微波辐射仪的探测资料计算了冬季个例的相对湿度和露点温度(25 日白天降雪导致微波辐射计数据污染,28 日数据缺失). 分析发现,能见度变化不仅与空气的饱和度有关,而且与露点温度的关系也比较密切,有时与后者的相关性更好. 在雾-霾形成阶段(23 日 02:00~24 日 08:00),夜间的相对湿度为 40%~50%,白天降低到 30% 以下[图 3(a)];露点温度除了具有相同的日变化特征外,还呈上升趋势,从最初的 -8~-10℃ 上升到 -4~-6℃,空气中的含水量增大[图 3(b)]. 结合图 1(a)可知,此阶段的能见度与相对湿度特别是与露点温度具有负相关性,说明空气饱和度增大尤其是潮湿程度增加是导致此次雾-霾天气形成的关键机制之一. 此后,夜间近地面层相对湿度进一步增大到 60%~80%,28 日早晨出现大雾时气象站观测的相对湿度达到 95%(微波辐射仪数据缺失). 同时,露点温度也一直上升,在 26 日夜间达到 -2~0℃. 在此期间,能见度与相对湿度和露点温度负相关,$PM_{2.5}$ 浓度与之正相关(气溶胶粒子吸收后会产生虚浓度),说明水汽的昼夜相变、污染物在湿度较大的夜间吸湿增长以及污染物排放时间变化的共同作用下导致能见度具有明显的日变化特征. 因此,关注环境大气湿度特别是含水量的演变将有助于判断严重污染事件的发展趋势.

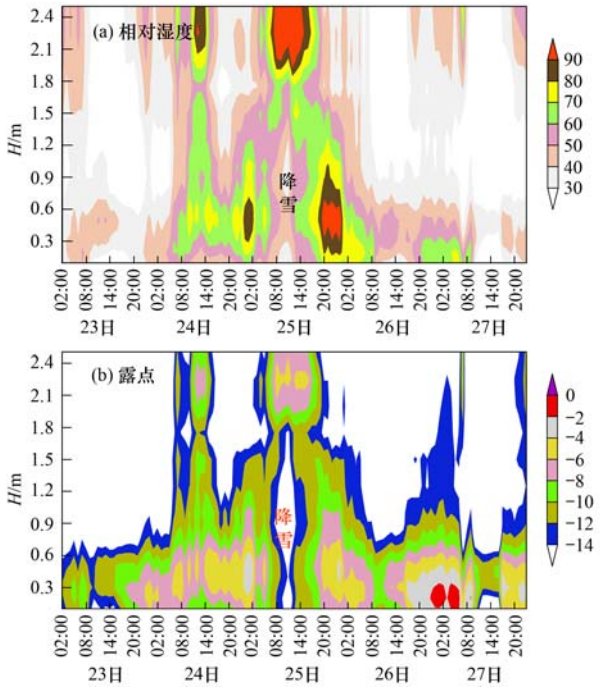


图 3 2013 年 2 月 23~27 日相对湿度和露点时序图

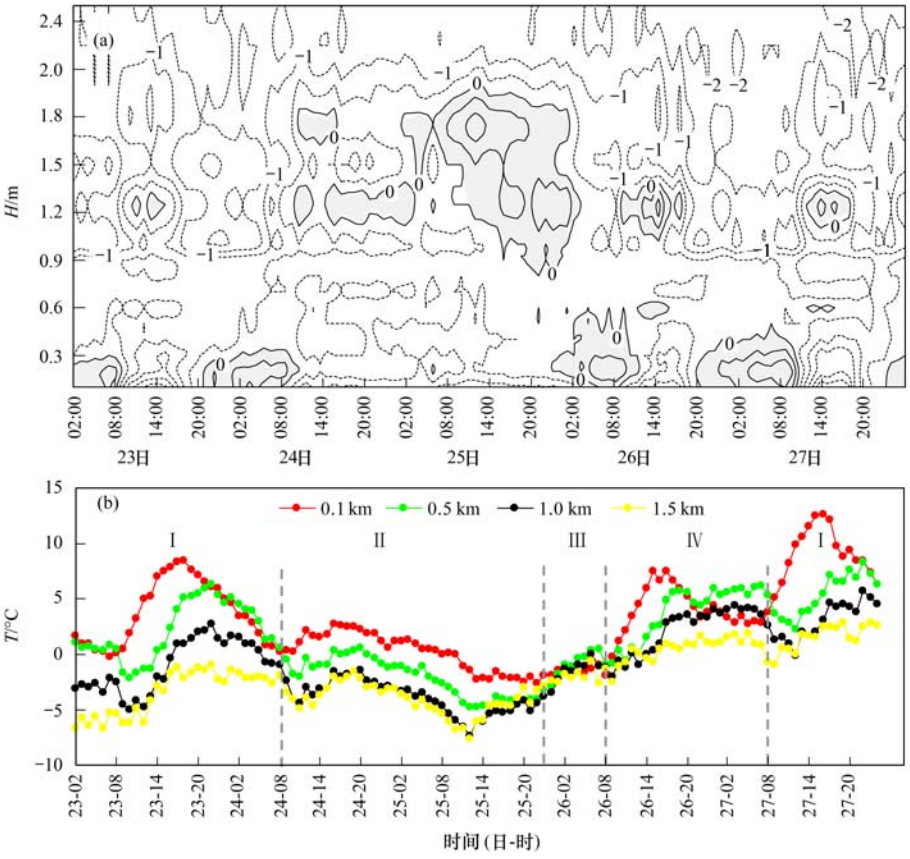
Fig. 3 Time series of relative humidity and dew-point from 23rd to 27th Feb., 2013

本研究分析的冬季雾-霾天气过程对流层低层始终有逆温层[图 4(a),正值表示逆温],边界层内大气处于稳定状态,不利于污染物的垂直扩散,这是导致其浓度逐渐增大的原因之一,与一些研究结果一致[41,42]. 雾-霾持续期内逆温层的演变方式有 2 种[图 4(a)]:一是有明显的日变化. 夜间出现在近

地面层,白天抬升至边界层顶附近(23 日 02:00 ~ 24 日 08:00 和 25 日 20:00 以后);二是无论昼夜均位于边界层上层(24 日 08:00 ~ 25 日 20:00). 而且,逆温层厚度逐渐增加、逆温强度逐渐增强. 结合图 2 可知,当逆温层出现在近地面时,气溶胶浓度一般较高;逆温层升高时,浓度一般较低. 24 ~ 25 日气溶胶浓度和能见度变化幅度减小、日变化不明显与该期间逆温层没有日变化有关. 因此,由于逆温层的存在使得对流层低层环境大气始终处于稳定状态,从而有利于雾-霾天气的维持,同时逆温层的高度也影响着气溶胶浓度的变化,进而决定了能见度是否具有日变化特征. 所以,持续性雾-霾的发生和维持与逆温密切相关.

地面辐射降温、空中增温是 2 个导致逆温层发生和维持的主要机制. 图 4(b)给出了 0.1、0.5、1.0 和 1.5 km 这 4 个高度上的温度演变,本研究按照其演变特征将 23 日 02:00 ~ 27 日 23:00 划分为Ⅰ~Ⅳ区. 在Ⅰ区,0.1 km 高度上的温度变化超前于其他 3 个层次 3 h 左右,而且在 23 日 23:00 ~ 24 日 08:00 期间,其降温幅度超过 0.5 km;而 08:00 后地面附近迅速增温,近地面层逆温层消失,说明它具有辐射逆温的性质. 在Ⅲ区,边界层内温度均呈上升趋势,近地面层出现逆温是由于 0.1 km 高度上的升温不及 0.5 km. Ⅳ区内,0.5 km 以上继续升温,而 0.1 km 高度上的温度则呈现日变化特征,因此地面附近的温度与高空反向变化导致形成逆温. 白天近地面层逆温消失源于地面的快速升温. 边界层上层白天形成逆温层主要是日出后高层大幅度升温的结果. 24 日 08:00 ~ 25 日 23:00 温度的演变明显不同于上述几个时段[图 4(b)],边界层内温度变化几乎同步,而且从 24 日 17:00 开始温度一直下降,25 日 11:00 以后又连续上升,越到高层升温的幅度越大,日变化特征明显减弱,这样该期间的逆温层就呈现出与其它时段不同的特征. 云量是影响该期间逆温层日变化的重要因素. 据北京南郊观象台观测,24 日08:00 ~ 25 日 20:00 北京上空始终保持 8 个量的总低云,而在雾-霾过程的其它时段没有低云. 天气阴沉大大地减少了地面附近的辐射降温,不利于入夜后形成贴地逆温层.

气溶胶在某地上空长时间停留并最终达到一定



(a)温度垂直变化;(b)4 个高度温度

图 4　2013 年 2 月 23 ~ 27 日温度垂直变化和 4 个高度温度时间-高度

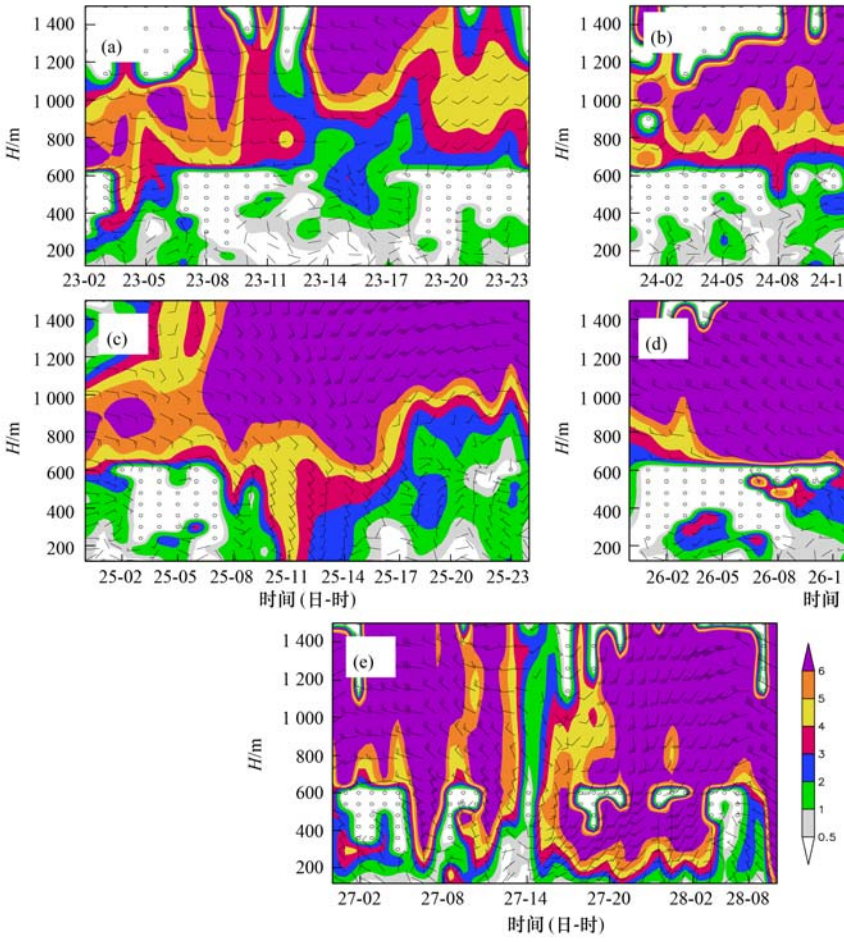
Fig. 4　Time-height of vertical temperature variation and temperature at several heights from 23rd to 27th Feb., 2013

的浓度还取决于近地面层水平风的分布,本研究使用风廓线雷达资料讨论雾-霾持续期间北京上空风的分布及演变(图 5). 在雾-霾形成初期,0.6 km 高度以下的风速明显减小,23 日 08:00 ~ 20:00 地面附近的风速基本在 1 $m \cdot s^{-1}$左右或以下. 23 日 20:00 ~ 24 日 05:00 风速出现了起伏,说明近地面层存在较小尺度的湍流,这可能是导致 $PM_{2.5}$浓度减小的原因之一. 尽管存在湍流扩散条件,但是没有带来能见度的明显变化,原因有可能是湍流扩散的作用没有完全抵消气溶胶湿增长对能见度带来的影响. 24 日 11:00 ~ 21:00 地面附近的风速持续小于 0.5 $m \cdot s^{-1}$,该期间气溶胶浓度快速上升. 此后,0.6 km 以下最大风速达到 3 ~ 5 $m \cdot s^{-1}$,再加上 25 日白天的降雪,对该期间气溶胶浓度大幅度下降有贡献. 26 日 02:00 ~ 28 日雾-霾结束之前,地面 ~ 0.4 km 层内的风速波动更加清晰,结合图 2 可以看到,当近地面层偏南风明显增大时,气溶胶浓度升高比较快; 而北风增大时,则浓度下降. 由于河北南部是京津冀的重污染区,$PM_{2.5}$浓度的上述变化反映了气溶胶区域输送特征.

此外,从图 5 给出的 2013 年 2 月 23 ~ 28 日边界层风向和风速逐时演变可以看到,24 日 08:00 ~ 25 日 23:00 边界层上层逆温维持阶段,0.8 km高度以上绝大多数时间是强的西南风或东南风,而且风向随高度顺转、风速随高度增大的特征比较明显,因此图 4(b)中 1.5 km 高度的温度与 1 km 高度相近或略高可能与暖平流随高度增强有关. 23 日、26 日和 27 日白天北京均受槽后西北气流控制,由于紧邻北京西部的燕山山脉东麓平均海拔高度为 1 ~ 1.2 km,因此当西北气流过山后就会因下沉而增温,这是上述几日白天边界层上层出现逆温的重要原因.

3.2 夏季个例

夏季雾-霾过程能见度与 $PM_{2.5}$浓度密切相关. 在雾-霾形成阶段,气溶胶浓度就达到了 80 ~ 120 $\mu g \cdot m^{-3}$,并呈现波动中逐渐上升趋势,峰值为 300



图中圆圈表示缺测, 阴影表示风速

图 5 冬季个例风廓线和风速

Fig. 5 Wind profile and wind speed of the winter case

μg·m^{-3},出现在过程的后期,气溶胶浓度累积增长特征比较清晰(图 6),是导致雾-霾过程能见度总体下降的因素之一. 此外,$PM_{2.5}$浓度演变呈一日双峰. 峰值出现在 08:00 前后和前半夜,15:00 前后和 02:00前后出现谷值,它与能见度之间有较好的负相关性. 因此,能见度的日变化在一定程度上受气溶胶浓度的影响. 而且,在雾-霾持续期间,绝大部分时间 $PM_{2.5}$浓度在 70 ~ 220 μg·m^{-3}之间变化,小于冬季. 在浓度变化幅度较大的时段,能见度的变化也较明显; 24 日 08:00 ~ 26 日 08:00 其振幅小于 100 μg·m^{-3},能见度也较平稳. 计算得到雾-霾持续期气溶胶浓度的平均值达到 143.8 μg·m^{-3},与冬季过程的 140 μg·m^{-3}相当,说明在夏季持续性雾-霾形成和维持过程中气溶胶起了十分重要作用.

夏季是非供暖季节,气溶胶浓度的日变化特征与冬季相近,那么除了机动车的贡献外 $PM_{2.5}$是否还有其它来源呢? 而且,25 日质量浓度的第二个波谷出现在 20:00,与其它几日不同,是何因素打乱了日变化规律?

夏季持续性雾-霾过程发生在环境大气饱和度高、近地面层潮湿的背景下,湿度的日变化及总体

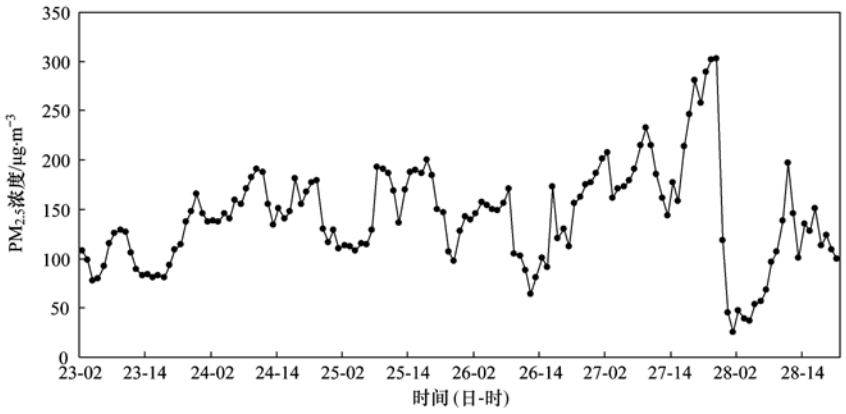


图 6　2008 年 7 月 23 ~ 28 日北京 $PM_{2.5}$浓度时序图

Fig. 6　Time series of $PM_{2.5}$ concentration in Beijing from 23rd to 28th July, 2008

演变趋势是影响气溶胶浓度和能见度的重要因素之一. 2008 年 7 月 23 日 02:00 ~ 28 日 11:00,空气的饱和度呈增加趋势,平均值明显高于冬季,而且具有日变化特征(图 7). 白天的相对湿度一般为 40% ~ 60%,17:00 ~ 20:00 开始迅速增大. 23 日 02:00 ~ 08:00, 1 km 以下的相对湿度为 70% ~ 80%. 从 24 日开始,夜间达到 80% ~ 90%,28 日早晨在相当厚的层次内超过 90%. 露点温度与相对湿度具有相同的演变特征,并且与能见度之间存在负相关、与气溶胶浓度有正相关关系,即:湿度大、气溶胶浓度高(有虚浓度)、能见度差; 湿度小、气溶胶浓度低、能见度好. 上述分析再次表明了环境大气的湿度在雾-霾过程中的重要性.

2008 年 7 月 23 日 02:00 ~ 28 日 23:00 对流层低层温度随高度基本都是递减的,没有逆温层,不同于冬季雾-霾个例[图 8(a)]. 没有形成逆温层的原因是不同高度上的温度变化趋势和幅度基本相同,表现为几条温度曲线基本平行[图 8(b)]. 那么,夏季雾-霾日在垂直方向上是否稳定呢? 对流抑制能量(CIN)是夏季判断对流层底层大气稳定特征的物理量,因此本研究借助 CIN 来考察上述几日环境大

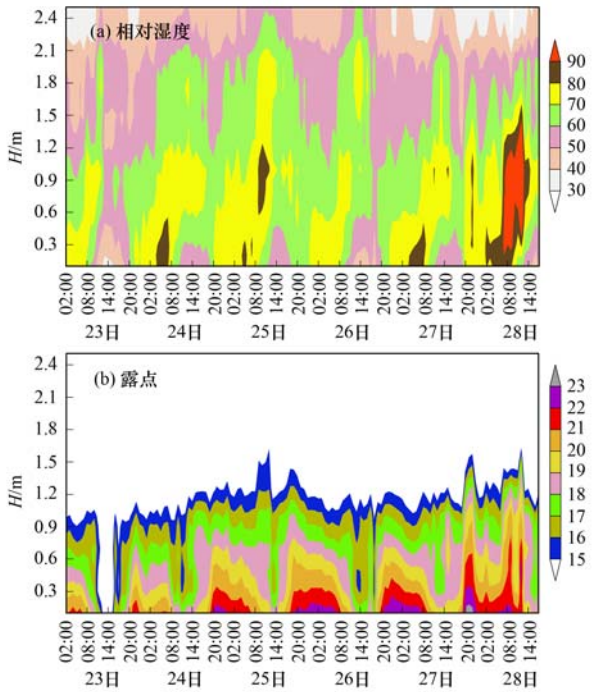
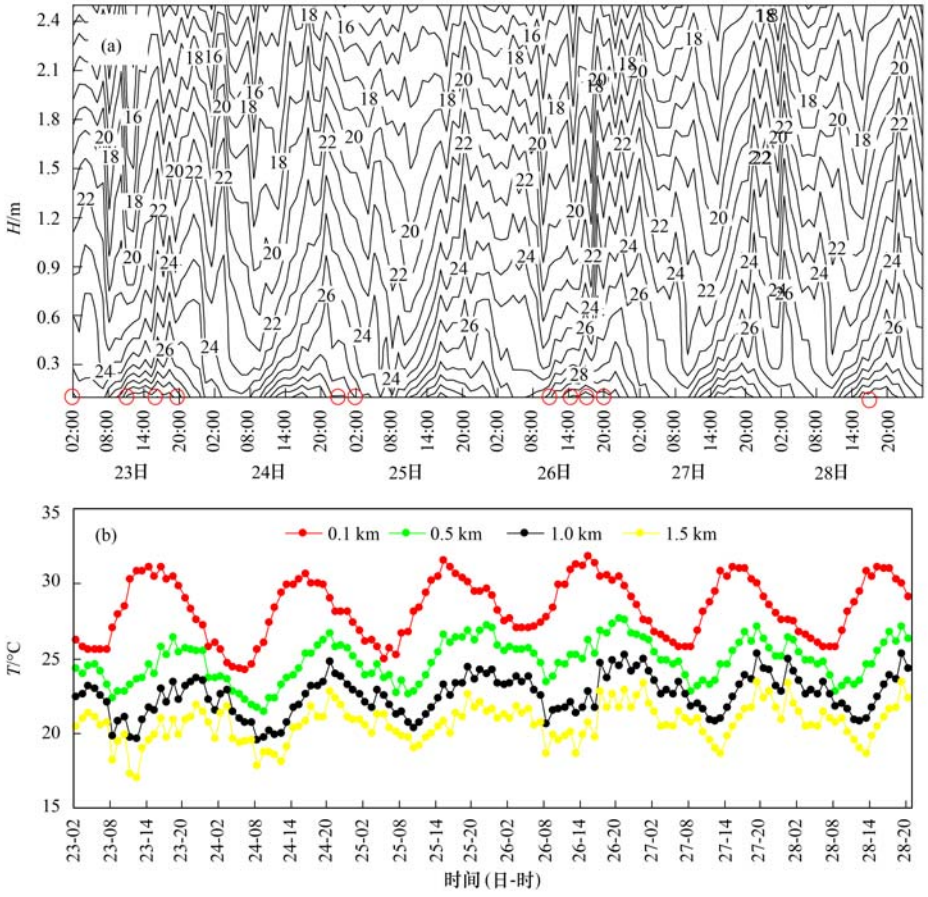


图 7　2008 年 7 月 23 ~ 28 日相对湿度和露点时序

Fig. 7　Time series of relative humidity and dew-point from 23rd to 28th July, 2008

气上升运动的趋势(表 1). 22 日 20:00 ~ 27 日 20:00,多数时次的 CIN 都超过了 200 $J \cdot kG^{-1}$,最大值达到 453 $J \cdot kG^{-1}$,说明存在着较大的阻止气块向上运动的能量. 而且,该期间的自由对流高度为 958 ~ 835 hPa(表 1),即对流稳定层就存在于边界层内. 上述分析表明,尽管夏季雾-霾日没有逆温,但是由于低层大气处于对流稳定状态,对气溶胶和水汽的垂直扩散也起到了限制作用. 此外,由于自由对流高度呈现昼高夜低的特征,因此对流稳定层的厚度存在昼夜差,它也是导致夏季个例气溶胶浓度和能见度具有日变化特征的因素之一.



(a)温度垂直变化; (b)4 个高度温度

图 8 2008 年 7 月 23 ~ 28 日温度垂直变化和 4 个高度温度时间-高度

Fig. 8 Time-height of vertical temperature variation and temperature at several heights from 23rd to 28th July, 2008

表 1 2008 年 7 月 23 ~ 28 日对流抑制能量(CIN)和自由对流高度(LFC)1)

Table 1 Convective inhibition (CIN) and level of free convection(LFC) from 23rd to 28th July, 2008

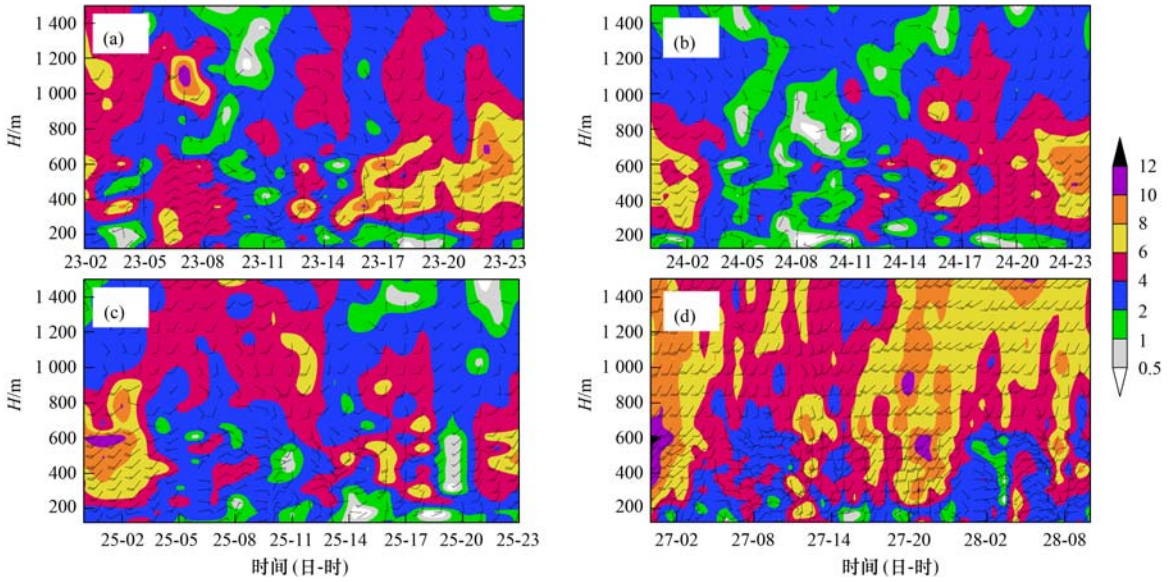
项目	22-20	23-08	23-20	24-08	24-20	25-08	25-20	26-08	26-20	27-08	27-20	28-08
CIN	-258	-453	-284	-221	-225	-308	-325	-327	-309	-226	-174	-35
LFC	835	890	840	936	881	914	866	898	860	941	883	958

1)表中 22-20 表示 22 日 20:00,23-08 表示 23 日 08:00,依次类推

夏季持续性雾-霾过程边界层内风的垂直分布有 2 个主要特征(图 9,26 日风廓线资料缺失):首先,在边界层上层没有偏北风和偏南风的频繁转换,绝大多数时次为偏南风; 其次,风向、风速具有日变化. 15:00 前后边界层低层出现整齐的西南风,而且风速逐渐增大,在午夜前后达到最大值. 次日 01:00 ~ 02:00 开始明显减小, 04:00 ~ 05:00 以后转为东北风. 最大风速中心出现在边界层低层,近地面层风速一般为 2 ~ 4 $m \cdot s^{-1}$, 06:00 ~ 08:00 风速小于 2 $m \cdot s^{-1}$. 结合气溶胶浓度演变可知(图 6),当边界层西南风增大时,气溶胶浓度也开始上升; 当偏南风风速明显减小并转成东北风时,气溶胶浓度停止增加并小幅下降; 此后,在近地面层趋于静稳时,浓度最高、能见度最低. 近地面 6 ~ 8 $m \cdot s^{-1}$ 的

东北风则对应着超过 10 km、污染物浓度较低的时段. 然而,25 日午后边界层内的风与其它几日明显不同[图 9(c)]. 西南风在 14:00 就提前增大到 6 ~ 8 $m \cdot s^{-1}$,并于 20:00 前后减小到 2 $m \cdot s^{-1}$ 以下,到 22:00 以后又再次增大. 南风减小与气溶胶浓度达到低点的时段一致. 因此,由于西南风的波动改变了 25 日 $PM_{2.5}$ 浓度的日变化规律. 上述演变特征表明,除高峰时段机动车排放外,区域输送可能是夏季北京地区持续雾-霾过程气溶胶的另一个来源. 边界层低层风向、风速的改变影响着该期间气溶胶的浓度变化,是除湿度外决定日变化特征的另一个关键因素.

从冬季个例分析可以看到,近地面层形成逆温层主要是由于日落后地面辐射降温的速度快于空中. 然而,在夏季雾-霾过程中,由于前半夜近地面层风的扰动较明显,从而不利于地面辐射降温形成逆温. 此外,在边界层上层盛行偏南风的情况下,气流过山后下沉增温形成逆温层的条件不具备,因此雾-霾天气维持期间在边界层顶附近也没有出现类似冬季过程的逆温.



阴影表示风速

图 9　夏季个例风廓线和风速

Fig. 9　Wind profile and wind speed of the summer case

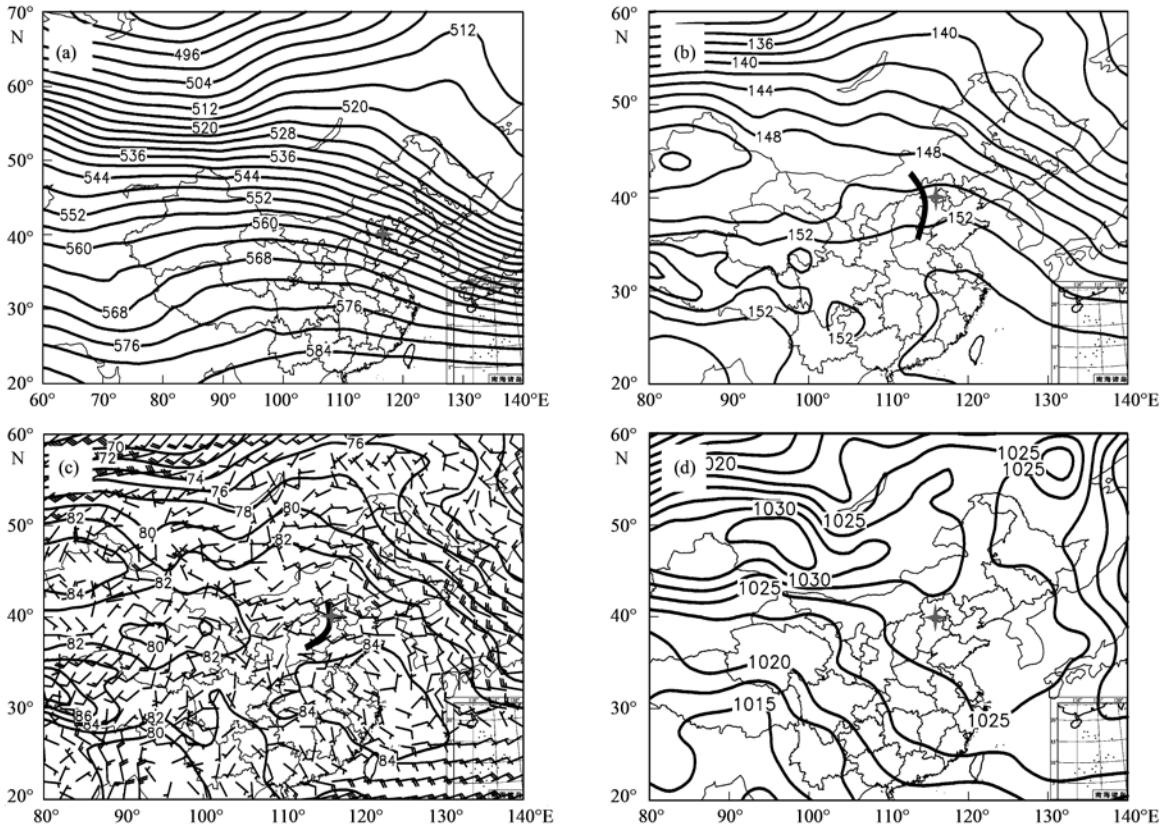
综上所述,冬夏两个持续性雾-霾过程的能见度均具有一定的日变化特征并呈总体下降趋势. 雾-霾形成和维持的机制包括:在空气的湿度和饱和度逐渐增大的环境中,气溶胶粒子浓度较高并呈增加趋势; 大气在垂直方向上稳定; 近地面层没有出现持续 3 h 以上的偏北风. 湿度、逆温层高度或自由对流高度、近地面层风速等的昼夜差异决定了在雾-霾持续期间能见度和气溶胶浓度具有日变化. 然而,不同季节的雾-霾过程仍然存在差异. 冬季个例前期 $PM_{2.5}$ 主要来自本地排放,后期与夏季个例类似,即:除本地源之外具有一定区域输送特征; 冬季个例大气处于稳定状态源自逆温层,而夏季个例却没有逆温,但是近地面层空气的垂直运动趋势仍然较弱,其原因是对流稳定性较强,而且一直没有破坏这种稳定性的机制. 此外,夏季边界层低层西南风风速的波动以及与东北风的交替出现是不同于冬季的、影响能见度和气溶胶浓度的关键因素.

4　持续性雾-霾过程产生的大气环流背景

本研究采用合成分析法讨论了持续性雾-霾天气发生时对流层中下层天气尺度环流特征,结果表明冬夏季个例产生在不同的背景下,这是导致 2 个个例环境条件不同的关键因素.

2013 年 2 月 23 ~ 27 日期间 500 hPa 层面上我国大部地区在一个呈西南-东北走向的弱脊控制下,在新疆以北的高纬度地区是平均槽区,强冷空气主体在 50°N 以北活动,北京则处在脊前西北气流中[图 10(a)]. 850 hPa 和 925 hPa,45°N 以北地区与 500 hPa 环流相似,但是越到低层脊越强. 而我国大陆的中纬度地区环流经向度则较小,北京附近有一个浅槽[图 10(b)和 10(c)],它们是图 5 中边界层内几次弱冷空气活动在合成图中的反映. 从北京上

空的温度平流演变可以看到(图 11),雾-霾持续期间对流层中下层冷暖平流昼夜交替,说明尽管北京处在 500 hPa 脊前,但还是有冷空气频繁沿西北气流南下. 总体来讲冷空气势力较弱,温度平流在(-10 ~ -40) $\times 10^{-5}$℃·m^{-1},除 24 ~ 25 日由偏东风回流使得近地面层出现的冷平流外,冷空气主要在空中活动,没有影响地面或者到达地面的部分不强、持续时间很短,因此绝大多数时间北京及周边地区地面处于均压场控制[图 10(d)],风速小,水平扩散条件差,从而有利于雾-霾天气长时间维持. 28 日当超过 -50×10^{-5}℃·m^{-1}的冷平流到达地面时,雾-霾过程结束. 同时,白天边界层上层形成逆温层也与高空弱冷空气频繁活动有关. 24 日 08:00 ~25 日 20:00,900 ~ 850 hPa 层内暖平流随高度增大或由冷平流变为暖平流(图 11),这是导致该期间边界层上层升温大于下层的重要原因,证实了 3.1 节风廓线分析的推论,即:此时边界层上层逆温层的形成是由温度平流在垂直方向上分布决定的.



(a)500 hPa 位势高度; (b)850 hPa 位势高度; (c)925 hPa 位势高度和风; (d)海平面气压; 图中十字星指示北京,粗实线为槽

图 10 2013 年 2 月 23 ~ 27 日天气形势合成图

Fig. 10 Composite synoptic chart of 23rd-27th Feb., 2013

夏季雾-霾个例发生在没有冷空气活动的阶段. 对流层中层的环流型及槽脊的位置与冬季个例相似,但是经向度却较大,北京处在高压的控制之下[图 12(a)]. 850 hPa 和 925 hPa 层面上由于海上副高强盛并西伸到大陆上,从而将冷空气阻滞在贝加尔湖到内蒙西部,京津冀位于高空槽前、副高西侧的西南气流中[图 12(b)和 12(c)],与冬季个例有明显差异. 在地面上,与冷空气对应的低压带和海上高压之间等压线密集,特别是在 40°N 附近最为密集[图 12(d)],使得近地面层也盛行较大的偏南风,与冬季雾-霾区气压场较弱不同. 上述分析表明,在夏季持续性雾-霾过程中,西太平洋副高是关

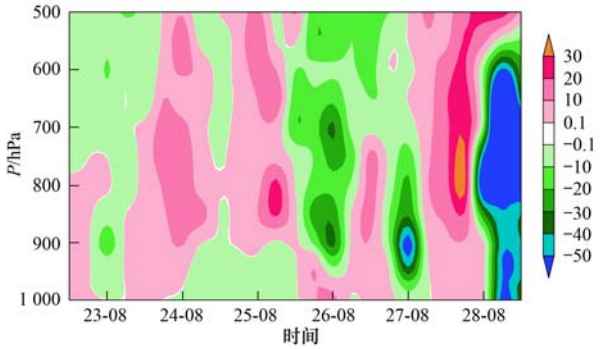
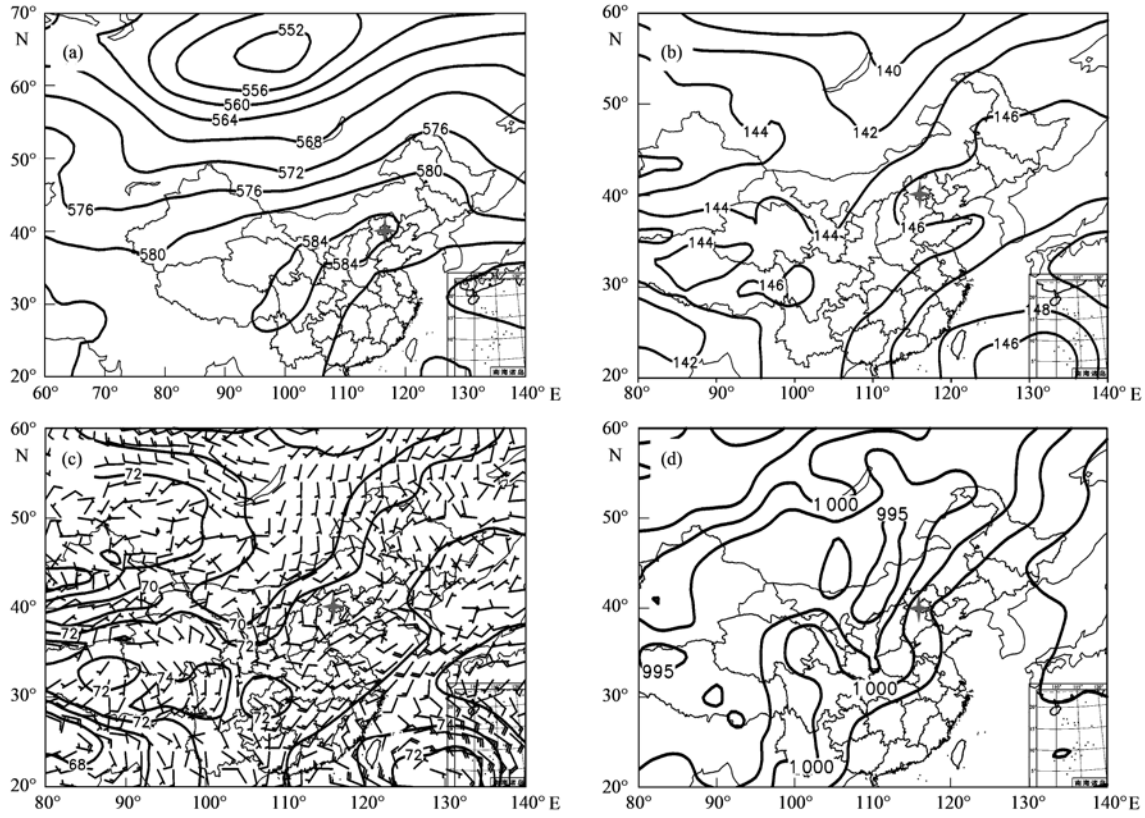


图 11 2013 年 2 月 23 ~ 27 日温度平流时间-气压

Fig. 11 Time-pressure chart of temperature advection on 23rd-27th Feb., 2013



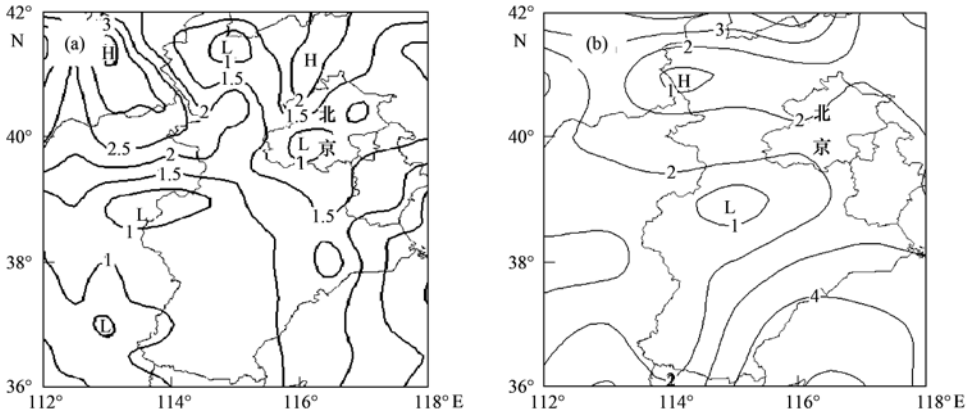
(a)500 hPa 位势高度; (b)850 hPa 位势高度; (c)925 hPa 位势高度和风; (d)海平面气压; 图中十字星指示北京

图 12　2008 年 7 月 23 ~ 27 日天气形势合成图

Fig. 12　Composite synoptic chart of 23rd-27th July, 2008

键的影响系统,它西伸到大陆上并稳定维持,在较长的时间内没有冷空气侵入北京及周边地区,不存在破坏对流抑制的机制,使底层大气能够一直保持对流稳定状态,而且对流层低层也始终受偏南风影响. 这种系统性的偏南气流与北京特殊地形的山谷风叠加就形成了具有明显日变化的西南风. 鉴于这支西南气流位于副高边缘,一般具有潮湿特性. 因此,它起着气溶胶和水汽输送的双重作用,是导致雾-霾天气持续的直接气象条件. 所以,从天气学角度来讲,本研究分析的发生在冬夏两个季节的持续性雾-霾过程分别代表了 2 种不同的类型.

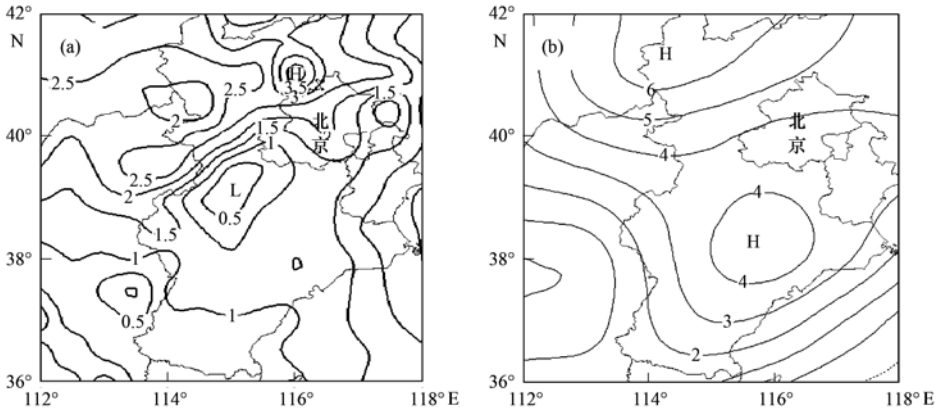
对雾-霾持续期间地面和边界层底层平均风场的进一步分析表明,冬、夏季个例有较大差异. 冬季个例,地面上 40°N 以南均为弱风区,北京除西北部山区外的大部分地区风速仅 1 $m \cdot s^{-1}$ 左右,是华北水平扩散条件最差的地区之一[图 13(a)]. 边界层底层的风场与地面相似,1 ~ 2 $m \cdot s^{-1}$ 的风速低值区从河北中西部、山西南部伸向北京 [图 13(b)]. 因此,近地面层弱风不利于本地污染物的扩散,为形成持续性雾-霾天气提供了条件. 2008 年 7 月 23 ~ 28 日,河北南部地面风仍然较弱(0 ~ 1 $m \cdot s^{-1}$),与冬季个例相似. 在北京地区,除西南部山区外,平均风速为 1.5 ~ 2.5 $m \cdot s^{-1}$,是华北平原风速较大的地区[图 14(a)]. 此外,计算了雾-霾持续期间 $PM_{2.5}$ 浓度明显增大时刻(20:00)950 hPa 平均 v 分量[图 13(b)],可以看到在北京以南 37°N、116°E 附近有一个 4 $m \cdot s^{-1}$ 的高值中心,即:从河北中南部到北京,边界层底层南风中有风速辐合. 而且,对比图 14(a)和 14(b)可知,南风的大风速中心位于地面弱风区的上空(即华北南部). 由于华北南部是京津冀的重污染地区,地面长时间维持弱风的环境,将导致污染物不断积累,而边界层底层的较大南风则起到将污染物向北输送的作用,并在到达北京上空时,因风速的辐合而产生一定的积聚. 这就是北京 $PM_{2.5}$ 浓度随着午后偏南风的建立和增速而增大的原因. 待北京上空的南风减弱时,由于特殊地形的影响,气溶胶就滞留在该地,随着稳定层厚度变小以及在吸湿增长的影响下,对大气的消光作用增强,视程转差. 这是 2008 年 7 月下旬北京发生持续性低能见度天气的重要机制. 上述分析表明,当北京出现雾-霾时,并不一定是京津冀的弱风区. 所以,应谨慎使用“弱风”作为判断雾-霾天气发生的预报指标.



(a)地面;(b) 950 hPa

图 13 冬季雾霾持续期地面和 950 hPa 平均风速

Fig. 13 Average wind speed at surface and 950 hPa for the winter case



(a)地面平均风速;(b)950 hPa 平均 v 分量

图 14 夏季雾霾持续期地面平均风速和 20:00 时 950 hPa 平均 v 分量分布

Fig. 14 Average wind speed at surface and v at 950 hPa for the summer case

5 结论

(1)冬季雾-霾过程能见度与 $PM_{2.5}$ 浓度具有负相关性,而后者的日变化特征与供暖和机动车行驶的高峰时段吻合. 夏季雾-霾过程能见度和 $PM_{2.5}$ 浓度与底层风向、风速的关系密切,区域输送特征明显. 当 200 ~ 600 m 高度上西南风增大至 4 ~ 12 $m\cdot s^{-1}$时,$PM_{2.5}$浓度开始增大、能见度降低; 而偏南风减小到 4 $m\cdot s^{-1}$以下时,浓度略下降. 因此,尽管夏季为非供暖期,但是在污染物输送条件具备的前提下,北京地区仍然会发生雾-霾天气.

(2)环境大气湿度在雾-霾形成和维持中起着重要作用,也是导致能见度和 $PM_{2.5}$ 观测浓度具有日变化特征的重要因素. 研究发现,$PM_{2.5}$浓度与露点温度的相关性有时甚至超过相对湿度. 其原因可能在于:气溶胶粒子吸湿增长要以空气中有一定的含水量为前提,在浓度一定的情况下,空气越潮湿,吸湿效应越明显.

(3)导致持续性雾-霾天气的另一个重要条件是环境大气的稳定性长时间维持,但是冬、夏季导致稳定的机制不同. 在冬季雾-霾过程中,边界层内始终有逆温层. 白天,逆温层在1 200 m左右的高度上,而夜间则出现在近地面层. 夏季个例边界层内没有逆温,但是对流抑制能量却一直保持在 200 ~ 453 $J\cdot kG^{-1}$,自由对流高度昼高夜低,在 958 ~ 835 hPa 之间变化,不利于边界层内气块的垂直运动. 与此同时,冬季的逆温层和夏季的自由对流高度的日变化也是造成夜间气溶胶浓度增大、白天减小的另一个环境条件.

(4)冬、夏季的 2 个雾-霾过程产生在不同的环流型下,这是导致其形成和维持条件有差异的主要原因. 冬季持续性雾-霾天气发生时,对流层中层盛行西北气流、低层多短波槽活动、地面风场弱. 此类环流型的特点是冷空气势力一般较弱,其影响往

往不能到达地面,有利于地面弱风场条件的维持. 而且,弱冷空气过山后下沉增温是边界层上层逆温层形成的机制. 而近地面层的逆温则是日落后地面迅速辐射降温的结果. 夏季雾-霾天气产生和维持阶段没有冷空气活动,使得底层对流稳定层结能够长时间存在. 对流层中层的副高是夏季雾-霾天气持续的关键影响系统,地面华北南部维持弱风,边界层内较强的系统性偏南风和由于北京附近特殊地形形成的山谷风共同将华北南部弱风区累积的污染物输送到北京提供了条件,表现为 $PM_{2.5}$ 浓度随偏南风速增大而上升,随后能见度下降. 因此,预报时不能将"近地面层弱风"认为是雾-霾天气发生的充分且必要条件.

(5)应该指出,雾-霾天气十分复杂,环境气象条件仅仅是其中的一个影响因素. 因此,本研究还不能针对持续性雾-霾过程的每一个细节均给出科学的解释. 此外,夏季北京地区除了本文分析的区域输送特征较明显的雾-霾天气外,还有一类是产生在高温高湿环境下,其形成和维持的机制也值得深入研究. 而且,冬季区域输送有贡献的雾-霾过程与夏季过程的异同也需要作进一步的对比分析.

参考文献:

[1] 张小曳, 孙俊英, 王亚强, 等. 我国雾-霾成因及其治理的思考[J]. 科学通报, 2013, **58**(13): 1178-1187.

[2] 马志强, 赵秀娟, 孟伟, 等. 雾和霾对北京地区大气能见度影响对比分析[J]. 环境科学研究, 2012, **25**(11): 1208-1214.

[3] 姚青, 韩素芹, 蔡子颖. 天津一次持续低能见度事件的影响因素分析[J]. 气象, 2012, **38**(6): 688-694.

[4] 岳建华, 陶俊, 林泽健, 等. 成都春季生物质燃烧和沙尘期间气溶胶散射特征及其重建[J]. 环境科学, 2012, **33**(7): 2151-2157.

[5] 陈训来, 冯业荣, 王安宇, 等. 珠江三角洲城市群灰霾天气主要污染物的数值研究[J]. 中山大学学报(自然科学版), 2007, **46**(4): 103-107.

[6] 李琼, 李福娇, 叶燕翔, 等. 珠江三角洲地区天气类型与污染潜势及污染浓度的关系[J]. 热带气象学报, 1999, **15**(4): 363-369.

[7] 周丽, 徐祥德, 丁国安, 等. 北京地区气溶胶 $PM_{2.5}$ 粒子浓度的相关因子及其估算模型[J]. 气象学报, 2003, **61**(6): 761-768.

[8] 孙韧, 刘伟, 张赞, 等. 城市典型气象条件与大气颗粒物污染之间的关系[J]. 中国环境监测, 2005, **21**(2): 80-83.

[9] 徐敬, 丁国安, 颜鹏, 等. 北京地区 $PM_{2.5}$ 的成分特征及来源分析[J]. 应用气象学报, 2007, **18**(5): 645-654.

[10] 张人文, 范绍佳. 珠江三角洲风场对空气质量的影响[J]. 中山大学学报, 2011, **50**(6): 130-134.

[11] 张艳昆, 刘树华, 李炬, 等. 北京 PM_{10} 质量浓度与总体理查逊数的关系[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2010, **46**(2): 192-198.

[12] 陶俊, 谢文彰, 许振成, 等. 冬季广州大气能见度影响因子分析[J]. 城市环境与城市生态, 2007, **20**(1): 17-20.

[13] 戴永立, 陶俊, 林泽健, 等. 2006～2009 年我国超大城市霾天气特征及影响因子分析[J]. 环境科学, 2013, **34**(8): 2925-2932.

[14] 宋宇, 唐孝炎, 张远航, 等. 北京市大气能见度规律及下降原因[J]. 环境科学研究, 2003, **16**(2): 10-12.

[15] 刘瑞晨, 李鸿洲. 北京地区的烟幕与天气条件的联系[J]. 大气科学, 1980, **4**(1): 69-78.

[16] 杨东贞, 于海青, 丁国安, 等. 北京北郊冬季低空大气气溶胶分析[J]. 应用气象学报, 2002, **13**(S1): 113-126.

[17] 姚青,蔡子颖,韩素芹,等. 2009 年秋冬季天津低能见度天气下气溶胶污染特征[J]. 气象,2012,**38**(9):1096-1102.

[18] 范烨, 郭学良, 付丹红, 等. 北京及周边地区 2004 年 8、9 月间大气气溶胶分布特征观测分析[J]. 气候与环境研究, 2007, **12**(1): 49-62.

[19] 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.

[20] Deng Z Z, Zhao C S, Ma N, *et al*. Size-resolution and bulk activation properties of aerosols in the North China Plain: the importance of aerosols size distribution in the prediction of CNN number concentration[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2011, **11**: 3835-3846.

[21] Zhang Q, Meng J, Quan J, *et al*. Impact of aerosol composition on cloud condensation nuclei activity[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2012, **12**: 3783-3790.

[22] Birgitta S, Hans-christen H, Alfred W, *et al*. Hygroscopic growth of aerosol particles and its influence on nucleation scavenging in cloud: experimental results from Kleiner Feldberg [J]. Journal of Atmospheric Chemistry, 1994, **19**: 129-152.

[23] 赵秀娟, 蒲维维, 孟伟, 等. 北京地区秋季雾霾天 $PM_{2.5}$ 污染与气溶胶光学特征分析[J]. 环境科学, 2013, **34**(2): 416-423.

[24] 王丛梅, 范引琪, 张海霞. 京津冀采暖期大气污染天气特征[J]. 气象科技, 2010, **38**(6): 691-694.

[25] 李菲, 吴兑, 谭浩波, 等. 广州地区旱季一次典型灰霾过程的特征及成因分析[J]. 热带气象学报, 2012, **28**(1): 113-122.

[26] 徐祥德, 周丽, 周秀骥, 等. 城市环境大气重污染过程周边源影响域[J]. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2004, **34**(10): 958-966.

[27] 刘伟东, 江玉华, 李炬, 等. 北京地区一次重污染天气气溶胶分布与传输特征研究[J]. 气候与环境研究, 2010, **15**(2): 152-160.

[28] 洪也, 马雁军, 王喜全, 等. 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, 2013, **33**(8): 2115-2122.

[29] 郑庆锋, 史军. 上海霾天气发生的影响因素分析[J]. 干旱

气象, 2012, **30**(3): 367-373.

[30] 苏福庆, 任阵海, 高庆先, 等. 北京及华北平原边界层大气中污染物的汇聚系统——边界层输送汇[J]. 环境科学研究, 2004, **17**(1): 21-33.

[31] 苏福庆, 高庆先, 张志刚, 等. 北京边界层外来污染物输送通道[J]. 环境科学研究, 2004, **17**(1): 26-29.

[32] Hanna S R, Ramsdell J V, Cramer H E. Urban Gaussian diffusion parameters. Modeling the urban boundary layer[C]. Boston: American Meteorological Society, 1987. 337-379.

[33] 高岑, 王体健, 吴建军, 等. 2009 年秋季南京地区一次持续性灰霾天气过程研究[J]. 气象科学, 2012, **32**(3): 246-252.

[34] 隋珂珂, 王自发, 杨军, 等. 北京 PM_{10}持续污染及与常规气象要素的关系[J]. 环境科学研究, 2007, **20**(6): 77-82.

[35] 刘波. 南昌市一次连续空气污染过程的气象条件分析[J]. 气象与减灾研究, 2009, **32**(2): 68-72.

[36] 李国翠, 范引琪, 岳艳霞, 等. 北京市持续重污染天气分析[J]. 气象科技, 2009, **37**(6): 656-659.

[37] 赵普生, 徐晓峰, 孟伟, 等. 京津冀区域霾天气特征[J]. 中国环境科学, 2012, **32**(1): 31-36.

[38] Darkow G L. An analysis of over sixty tornado proximity sounding [A]. In: Proceedings of the Sixth Conference on Severe Local Storm [C]. Chicago: American Meteorological Society, 1969. 218-221.

[39] 张小曳, 张养梅, 曹国良. 北京 PM_1 中的化学组成及其控制对策思考[J]. 应用气象学报, 2012, **23**(3): 257-264.

[40] 刘辉, 贺克斌, 马永亮, 等. 2008 年奥运会前后北京城、郊 $PM_{2.5}$及其水溶性离子变化特征[J]. 环境科学学报, 2011, **31**(1): 177-185.

[41] 贺千山, 毛节泰. 北京城市大气混合层与气溶胶垂直分布观测研究[J]. 气象学报, 2005, **63**(3): 374-384.

[42] 刘熙明, 胡非, 邹海波, 等. 北京地区一次典型大雾天气过程的边界层特征分析[J]. 高原气象, 2010, **29**(5): 1172-1184.

HUANJING KEXUE

Environmental Science (monthly)

Vol. 35 No. 6

Jun. 15, 2014

CONTENTS

Comparative Analysis on Meteorological Condition for Persistent Haze Cases in Summer and Winter in Beijing ····· LIAO Xiao-nong, ZHANG Xiao-ling, WANG Ying-chun, *et al.* (2031)

Size Distributions of Water-Soluble Inorganic Ions in Atmospheric Aerosols in Fukang ····· MIAO Hong-yan, WEN Tian-xue, WANG Yue-si, *et al.* (2045)

Study on Transition Metals in Airborne Particulate Matter in Shanghai City's Subway ····· BAO Liang-man, LEI Qian-tao, TAN Ming-guang, *et al.* (2052)

Heavy Metal Concentrations in Mosses from Qiyi Glacier Region ····· MA Juan-juan, LI Zhen (2060)

Distributions of Dimethylsulfide and Dimethylsulfoniopropionate and Influencing Factors in the East China Sea and the Southern Yellow Sea During the Winter ····· SONG Yi-zhu, ZHANG Hong-hai, YANG Gui-peng (2067)

Pollution by Heavy Metals in the Petrochemical Sewage Waters of the Sea Area of Daya Bay and Assessment on Potential Ecological Risks ····· XU Shan-nan, LI Chun-hou, XU Jiao-jiao, *et al.* (2075)

Distribution of Perfluorinated Compounds in Surface Water of Shenzhen Reservoir Groups ····· WANG Xin-xuan, ZHANG Hong, HE Long, *et al.* (2085)

Contamination and Source of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Epikarst Spring Water ····· SUN Yu-chuan, SHEN Li-cheng, YUAN Dao-xian (2091)

Biogeochemical Processes of the Major Ions and Dissolved Inorganic Carbon in the Guijiang River ····· TANG Wen-kui, TAO Zhen, GAO Quan-zhou, *et al.* (2099)

Hydrologic Processes of the Different Landscape Zones in Fenhe River Headwater Catchment ····· YANG Yong-gang, LI Cai-mei, QIN Zuo-dong, *et al.* (2108)

Assessment of Groundwater Quality of Different Aquifers in Tongzhou Area in Beijing Plain and Its Chemical Characteristics Analysis ····· GUO Gao-xuan, JU Yi-wen, ZHAI Hang, *et al.* (2114)

Models for Quantification of Fluid Saturation in Two-Phase Flow System by Light Transmission Method and Its Application ····· ZHANG Yan-hong, YE Shu-jun, WU Ji-chun (2120)

Nitrogen Leaching and Associated Environmental Health Effect in Sloping Cropland of Purple Soil ····· CHEN Wei-liang, GAO Yang, LIN Yong-ming, *et al.* (2129)

Research on Land Use Structure Optimization Based on Nonpoint Source Dissolved Nitrogen Load Estimation in Shuaishui Watershed ····· LU Yu-chao, BI Meng-fei, LI Ze-li, *et al.* (2139)

Nitrogen and Organic Matter Vertical Distribution Characteristics and Evaluation in Ancient Canal Sediments of Zhenjiang Old Town ····· ZHOU Xiao-hong, LI Yi-min, ZHOU Yi, *et al.* (2148)

Effects of Two Submerged Macrophytes on Dissolved Inorganic Nitrogen in Overlying Water and Interstitial Water ····· YANG Wen-bin, LI Yang, SUN Gong-xian (2156)

Bioavailable Phosphorus on Suspended Solids of Lake Under Short-term and Repeated Sediment Disturbance ····· WU Xiao-fei, LI Da-peng (2164)

Influence of Different Disturbance Intensity on the Phosphorus Adsorption and Immobilization by the Sediments from an Inner City Heavily Polluted Canal ····· WANG Shang, LI Da-peng (2171)

Effect of Feed Residues on the Release of Nitrogen and Phosphorus of Pond Sediment ····· LÜ Yuan-jiao, LI Rui-jiao, ZHANG Nian, *et al.* (2178)

Delivery and Release of Sediment PAHs During Resuspension ····· WANG Xiao-hui, BI Chun-juan, HAN Jing-chao (2185)

Effects of Low Molecular Weight Organic Acids on Redox Reactions of Mercury ····· ZHAO Shi-bo, SUN Rong-guo, WANG Ding-yong, *et al.* (2193)

Removal of Fluorescent Whitening Agent by Hydrogen Peroxide Oxidation Catalyzed by Activated Carbon ····· LIU Hai-long, ZHANG Zhong-min, ZHAO Xia, *et al.* (2201)

Kinetics of Alkylphenols Degradation in Aqueous Phase with Excilamp Irradiation ····· LIU Yu-hai, YE Zhao-lian, WEN Ying-pin, *et al.* (2209)

AF + BAF for Treating Effluent in the Sewage Plant of the Resin and Chemical Industry Park ····· TU Yong, LIU Wei-jing, ZHANG Yao-hui, *et al.* (2216)

Synthesis and Adsorption Property of Cd(Ⅱ)-8-hydroxyquinoline Molecularly Imprinted Polymer Microspheres ····· YANG Chun-yan, CHEN Fu-bin, ZHAO Hui, *et al.* (2223)

Simultaneous Nitrification and Denitrification in a Microbubble-aerated Biofilm Reactor ····· LIU Chun, NIAN Yong-jia, ZHANG Jing, *et al.* (2230)

Effect of PLA/Starch Slow-Release Carbon Source on Biological Denitrification ····· TANG Dan-qi, WANG Juan, ZHENG Tian-long, *et al.* (2236)

Impacts of Filamentous Bulking on Treatment Effect and Fouling Characteristics of Nonwoven Bioreactor ····· SHI Kuan, XUE Gang, GAO Pin, *et al.* (2241)

Optimization for Phosphorous Removal in Thickening and Dewatering Sludge Water by Polyaluminum Chloride ····· ZHOU Zhen, HU Da-long, QIAO Wei-min, *et al.* (2249)

Simulation of Long-Range Transport Potential of POPs in Poyang Lake ····· GONG Xiao-feng, XIANG Hong-rui, CHEN Chun-li, *et al.* (2256)

Uncertainty Analysis of Ecological Risk Assessment Caused by Heavy-metals Deposition from MSWI Emission ····· LIAO Zhi-heng, SUN Jia-ren, WU Dui, *et al.* (2264)

Risk Assessment and Countermeasures of BTEX Contamination in Soils of Typical Pesticide Factory ····· TAN Bing, WANG Tie-yu, LI Qi-feng, *et al.* (2272)

Levels Distribution and Risk Assessment of the Indicator and Dioxin-Like Polychlorinated Biphenyls in Ten Different Species of Marine Fish of Bohai Bay, China ····· WANG Sha-sha, GAO Li-rong, TIAN Yi-ling, *et al.* (2281)

Detection of Biohazardous Materials in Water upon the Characteristics of Fluorescent Sensor Frex ····· ZHAO Wei, WANG Zhao, CAI Qiang, *et al.* (2287)

Generation and Release of Microcystin-LR by *Microcystis aeruginosa* Under Hydroquinone Inhibition ····· ZHANG Yuan-chun, LIANG Wen-yan, ZHAO Yuan, *et al.* (2294)

Culture Medium Based on Biogas Slurry and Breeding of Oil Chlorella ····· ZHAO Feng-min, MEI Shuai, CAO You-fu, *et al.* (2300)

Microbial Diversity and Ammonia-Oxidizing Microorganism of a Soil Sample Near an Acid Mine Drainage Lake ····· LIU Ying, WANG Li-hua, HAO Chun-bo, *et al.* (2305)

Effects of *Corbicula fluminea* Bioturbation on the Community Composition and Abundance of Ammonia-Oxidizing Archaea and Bacteria in Surface Sediments ····· WANG Xue, ZHAO Da-yong, ZENG Jin, *et al.* (2314)

Methanogenic Activity and Methanogen Diversity in Marine Gas Field Sediments ····· TIAN Qi, WANG Jia, FAN Xiao-lei, *et al.* (2322)

Effect of the Potential on Bacterial Community Under Illumination by DGGE and T-RFLP ····· WU Yi-cheng, DENG Huan, XIAO Yong, *et al.* (2328)

Isolation and Characterization of Two Bacteria with Heavy Metal Resistance and Phosphate Solubilizing Capability ····· TIAN Jiang, PENG Xia-wei, LI Xia, *et al.* (2334)

Identification and Denitrification Characteristics of a Psychrotolerant Facultative Basophilic Aerobic Denitrifier ····· WANG Zhao-yang, CHEN Guo-yao, JIANG Ke, *et al.* (2341)

Effects of Ryegrass and Arbuscular Mycorrhiza on Activities of Antioxidant Enzymes, Accumulation and Chemical Forms of Cadmium in Different Varieties of Tomato ····· JIANG Ling, YANG Yun, XU Wei-hong, *et al.* (2349)

Response of Active Nitrogen to Salinity in a Soil from the Yellow River Delta ····· LI Ling, QIU Shao-jun, CHEN Yin-ping, *et al.* (2358)

Variation of Soil Nitrogen During *in situ* Mineralization Process Under Different Grasslands in the Mountainous Area of Southern Ningxia, Northwest China ····· JIANG Yue-li, ZHAO Tong, YAN Hao, *et al.* (2365)

Effects of Long-Term Application of Pig Manure Containing Residual Tetracycline on the Formation of Drug-Resistant Bacteria and Resistance Genes ····· ZHANG Jun, YANG Xiao-hong, GE Feng, *et al.* (2374)

Long-Term Effects of Tillage Methods on Heavy Metal Accumulation and Availability in Purple Paddy Soil ····· CHANG Tong-ju, CUI Xiao-qiang, RUAN Zhen, *et al.* (2381)

Environmental Geochemical Baseline of Heavy Metals in Soils of the Ili River Basin and Pollution Evaluation ····· ZHAO Xin-ru, Telajin Nasier, CHENG Yong-yi, *et al.* (2392)

Distribution Patterns and Pollution Assessments of Heavy Metals in the *Spartina alterniflora* Salt-Marsh Wetland of Rudong, Jiangsu Province ····· ZHANG Long-hui, DU Yong-fen, WANG Dan-dan, *et al.* (2401)

Temporal-Spatial Distribution of Agricultural Diffuse Nitrogen Pollution and Relationship with Soil Respiration and Nitrification ····· OUYANG Wei, CAI Guan-qing, HUANG Hao-bo, *et al.* (2411)

Soil Respiration and Carbon Balance in Wheat Field Under Conservation Tillage ····· ZHANG Sai, WANG Long-chang, HUANG Zhao-cun, *et al.* (2419)

Comparison of Soil Respiration in Natural *Castanopsis carlesii* Forest and Plantation Forest ····· WU Jun-jun, YANG Zhi-jie, WENG Fa-jin, *et al.* (2426)

Influences of Hydraulic Retention Time on the Ethanol Type Fermentation Hydrogen Production System in a Hybrid Anaerobic Baffled Reactor ··· LIU Xiao-ye, ZHANG Hong, LI Yong-feng (2433)

《环境科学》第 6 届编辑委员会

主　编：欧阳自远

副主编：赵景柱　郝吉明　田　刚

编　委：（按姓氏笔画排序）

万国江　王华聪　王凯军　王绪绪　田　刚　田　静　史培军

朱永官　刘志培　汤鸿霄　陈吉宁　孟　伟　周宗灿　林金明

欧阳自远　赵景柱　姜　林　郝郑平　郝吉明　聂永丰　黄　霞

黄　耀　鲍　强　潘　纲　潘　涛　魏复盛

环 境 科 学

（HUANJING KEXUE）

（月刊　1976 年 8 月创刊）

2014 年 6 月 15 日　第 35 卷　第 6 期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

（Monthly　Started in 1976）

Vol. 35　No. 6　Jun. 15, 2014

主　　管	中国科学院	**Superintended** by	Chinese Academy of Sciences
主　　办	中国科学院生态环境研究中心	**Sponsored** by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协　　办	（以参加先后为序） 北京市环境保护科学研究院 清 华 大 学 环 境 学 院	**Co-Sponsored** by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主　　编	欧 阳 自 远	**Editor-in -Chief**	OUYANG Zi-yuan
编　　辑	《环境科学》编辑委员会 北京市 2871 信箱（海淀区双清路 18 号，邮政编码：100085） 电话：010-62941102，010-62849343 传真：010-62849343 E-mail：hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	**Edited** by	The Editorial Board of Environmental Science（HUANJING KEXUE） P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel：010-62941102, 010-62849343; Fax：010-62849343 E-mail：hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出　　版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街 16 号 邮政编码：100717	**Published** by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	**Printed** by	Beijing Bei Lin Printing House
发　　行	科 学 出 版 社 电话：010-64017032 E-mail：journal@ mail. sciencep. com	**Distributed** by	Science Press Tel：010-64017032 E-mail：journal@ mail. sciencep. com
订　购　处	全国各地邮电局	**Domestic**	All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 （北京 399 信箱）	**Foreign**	China International Book Trading Corporation（Guoji Shudian）, P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号：ISSN 0250-3301 / CN 11-1895/X　　国内邮发代号：2-821

国 内 定 价：90.00 元　　国外发行代号：M 205

国 内 外 公 开 发 行