

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第6期

Vol.38 No.6

2017

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

PM _{2.5} 浓度空间分异模拟模型对比:以京津冀地区为例	吴健生,王茜,李嘉诚,涂媛杰(2191)
北京地区近35年大气污染扩散条件变化	郭淳薇,孙兆彬,李梓铭,张小玲,杨慧玲(2202)
北京市典型区域夏季降水及其对大气污染物的影响	韩力慧,张海亮,向欣,张鹏,程水源,魏巍(2211)
北京山谷风环流特征分析及其对PM _{2.5} 浓度的影响	董群,赵普生,王迎春,苗世光,高健(2218)
北京市建筑施工扬尘排放特征	薛亦峰,周震,黄玉虎,王堃,聂滕,聂磊,秦建平(2231)
生物质成型燃料锅炉挥发性有机物排放特征	吴昌达,张春林,白莉,沈丽冉,王伯光,刘军,杨立辉(2238)
广州番禺大气成分站复合污染过程VOCs对O ₃ 与SOA的生成潜势	邹宇,邓雪娇,李菲,殷长泰(2246)
南京北郊大气臭氧周末效应特征分析	王俊秀,安俊琳,邵平,邹嘉南,林旭,张玉欣(2256)
亚热带稻区大气氨/铵态氮污染特征及干湿沉降	王杰飞,朱潇,沈健林,曾冠军,王娟,吴金水,李勇(2264)
宣威肺癌高发区燃煤排放颗粒物中铁的价态及其氧化性	王强翔,谭正莹,赵慧,李继华,田林玮,王青曜,米持真一,吕森林(2273)
垃圾焚烧厂区二噁英污染及厂区工人呼吸暴露评估	杜国勇,汪倩,张姝琳,张素坤,邓春萍,张洪铭,朱盟翔,蒋昕,朱成旺,任燕玲(2280)
重庆市新型干法水泥厂汞排放特征	张成,张雅惠,王永敏,王定勇,罗程钟,徐凤,何秀清(2287)
轻型汽油车简易瞬态工况法与定容全流稀释采样法(CVS)的排放相关性	王鸿宇,黄成,胡馨遥,李莉,陈勇航,徐健(2294)
不同排放标准公交车燃用生物柴油颗粒物排放特性	楼狄明,赵成志,徐宁,谭丕强,胡志远(2301)
西江水氢氧同位素组成的空间变化及环境意义	许琦,李建鸿,孙平安,何师意,于爽(2308)
基于SWAT与DNDC模型对比研究亚热带流域氮淋溶与输出过程	韩宁,陈维梁,高扬,郝卓,于贵瑞(2317)
三峡库区澎溪河与磨刀溪电导率等水质特征与水华的关系比较	姜伟,周川,纪道斌,刘德富,任豫霜,Douglas Haffner,谢德体,张磊(2326)
滇池草海间隙水与上覆水氮磷时空变化特征	王一茹,王圣瑞,焦立新,张云,高秋生,杨枫(2336)
香溪河沉积物、间隙水的磷分布特征及释放通量估算	罗玉红,聂小倩,李晓玲,戴泽龙,胥焘,黄应平(2345)
大冶湖表层水和沉积物中重金属污染特征与风险评价	张家泉,田倩,许大毛,占长林,刘婷,姚瑞珍,刘先利,肖文胜(2355)
海水淡化低温多效蒸馏工艺(LT-MED)沿程溴代消毒副产物的生成	齐菲,孙迎雪,杨哲,胡春芳,常学明,胡洪营(2364)
两种水体铜配合容量测试方法的适用性比较及应用	王晨烨,姜括,谢文龙,汪磊(2373)
高地下水位地区透水铺装控制径流污染的现场实验	金建荣,李田,时珍宝(2379)
稳定型纳米零价铁去除地下水中2,4-二氯苯酚	张永祥,常杉,李飞,徐毅,高维春(2385)
超声、紫外增强H ₂ O ₂ /KI降解磺胺甲基嘧啶	魏红,孙博成,杨小雨,李克斌(2393)
不同铅负载量改性膨润土对水中磷酸盐吸附作用的对比	姜博汇,林建伟,詹艳慧,邢云青,黄宏,储鸣,王星星(2400)
铁炭内电解垂直流人工湿地对污水厂尾水深度脱氮效果	郑晓英,朱星,周翔,徐亚东,王菊,韦诚,高雅洁,周橄(2412)
组合生物滤池对养殖废水的净化效率及影响因素分析	张世羊,张胜花,张翔凌,王广军(2419)
温度对聚磷菌活性及基质竞争的影响	张玲,彭党聪,常蝶(2429)
海洋厌氧氨氧化菌的富集培养及其脱氮特性	冯莉,于德爽,李津,单晓静,杨振琳(2435)
不同生物过滤系统铵态氮转化速率及生物膜特性分析	周洪玉,韩梅琳,仇天雷,高敏,孙兴滨,王旭明(2444)
磷酸盐对厌氧氨氧化活性污泥脱氮效能的影响	周正,刘凯,王凡,林兴,李祥,黄勇,顾澄伟(2453)
碳源胁迫下脱氮除磷颗粒污泥性能变化及其机制	秦诗友,陈威,马兆瑞,刘小英,陈晓国,余文韬,夏媛媛,黄健(2461)
外源Ca ²⁺ 对SBR启动期活性污泥胞外多聚物的动态影响	任丽飞,杨新萍,张雯雯(2470)
膨胀污泥中丝状菌的分离鉴定与特性分析	张崇森,牛全睿,徐丽梅,王陇梅,王岱,武少华(2477)
反硝化悬浮填料适用性及其微生物群落结构解析	谭阳,李激,徐巧,付磊,尤世界,王硕(2486)
硫代硫酸钠对排硫硫杆菌固碳能力的影响及其作用机制	李欢,王磊,王亚楠(2496)
关帝山森林土壤真菌群落结构与遗传多样性特征	乔沙沙,周永娜,柴宝峰,贾彤,李鑫(2502)
基于受体模型与地统计的城市居民区土壤重金属污染源解析	陈秀端,卢新卫(2513)
基于蒙特卡罗模拟的土壤环境健康风险评价:以PAHs为例	佟瑞鹏,杨校毅(2522)
Eh、pH和铁对水稻土钾释放的影响机制	钟松雄,尹光彩,陈志良,林亲铁,黄润林,刘德玲,彭焕龙,黄玲,王欣,蒋晓璐(2530)
典型土壤不同提取态Cd与水稻吸收累积的关系	陈齐,邓潇,陈珊,侯红波,彭佩钦,廖柏寒(2538)
复合改良剂对Cd污染稻田早晚稻产地修复效果	陈立伟,杨文骏,辜娇峰,周航,高子翔,廖柏寒(2546)
两种钝化剂对土壤Pb、Cd、As复合污染的菜地修复效果	田桃,雷鸣,周航,杨文骏,廖柏寒,胡立琼,曾敏(2553)
大豆和小麦根系对非的吸持作用及其生物有效性	王红菊,李倩倩,沈羽,顾若尘,盛好,占新华(2561)
源自腐殖土的溶解性有机质组分对棕壤和黑土吸附苯并三唑的影响	杨宁伟,毕二平(2568)
地形、树种和土壤属性对喀斯特山区土壤胞外酶活性的影响	罗攀,陈浩,肖孔操,杨利琼,文丽,李德军(2577)
长期定位有机物料还田对关中平原冬小麦-玉米轮作土壤N ₂ O排放的影响	郝耀旭,刘继璇,袁梦轩,周应田,杨学云,顾江新(2586)
基于大气被动式采样的人体头发中类二噁英多氯联苯暴露的途径	袁浩东,白瑶,李秋旭,王英,金军(2594)
广西刁江野生鱼类重金属积累特征及其健康风险评价	王俊能,马鹏程,张丽娟,陈棉彪,黄楚珊,柳晓琳,胡国成,许振成(2600)
活性炭在中高温条件下对玉米秸秆厌氧发酵的影响	甘荣,葛明民,刘勇迪,贾红华,闫志英,雍晓雨,吴夏荒,周俊(2607)
工艺过程源和溶剂使用源挥发性有机物排放成分谱研究进展	王红丽,杨肇勋,景盛翱(2617)
《环境科学》征稿简则(2452) 《环境科学》征订启事(2560) 信息(2201, 2230, 2384)	

北京地区近35年大气污染扩散条件变化

郭淳薇^{1,2}, 孙兆彬^{1,2*}, 李梓铭², 张小玲², 杨慧玲³

(1. 中国气象局北京城市气象研究所, 北京 100089; 2. 京津冀环境气象预报预警中心, 北京 100089; 3. 中国科学院大气物理研究所, 北京 100029)

摘要: 本文使用 NCEP(National Center for Environmental Prediction)再分析月平均数据(2.5°×2.5°)、1980~2015年北京地区(54511 站点)的探空数据及温、压、湿、风、降水数据,分析了近35年来北京地区大气污染扩散条件的变化。主要结论有:1980~2015年,大气不断增温,1990年以后逆温明显,大气较为稳定,冷空气到达北京上空后对下层的影响减弱,3级以上偏北风频率减少,近地层辐合。同时,2000年以后中高层下沉运动位置不断下压,低层上升运动加强,低层上升运动被限制在边界层以内,这样会导致垂直扩散条件转差。1980~1989年大气容量指数较为稳定,1990~1999年大气容量指数出现波动,而2000~2015年大气容量指数呈现明显减小的趋势。总体来看,近35年大气自身的容纳能力呈现一个平缓的下降趋势。1980~1989年春季和冬季大气容量指数较大,1990~1999年春季和夏季大气容量指数较大,但是2000年以后,无论哪个季节,大气自身的容纳能力都是在减弱的,季节性差异变小。边界层高度在这30多年来都是春季和夏季较高,秋季和冬季明显降低。

关键词: 污染扩散条件;较大偏北风;垂直运动;大气容量指数;边界层高度

中图分类号: X51 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)06-2202-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.201610149

Change of Atmospheric Pollution Diffusion Conditions in Beijing in Recent 35 Years

GUO Chun-wei^{1,2}, SUN Zhao-bin^{1,2*}, LI Zi-ming², ZHANG Xiao-ling², YANG Hui-ling³

(1. Institute of Urban Meteorology, China Meteorological Administration, Beijing 100089, China; 2. Environmental Meteorology Forecast Center of Beijing-Tianjin-Hebei, Beijing 100089, China; 3. Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China)

Abstract: In this paper, the monthly average of NCEP(National Center for Environmental Prediction) reanalysis data (2.5°×2.5°), the sounding data, and conventional observation data in Beijing (54511 station) were used to analyze the atmospheric pollution diffusion conditions in Beijing in recent 35 years. The main conclusions were: in 1980~2015, the whole layer was warmer. After 1990, the temperature inversion phenomenon was obvious, and the whole air was stable. The cold air's less effect on the lower layer, lower frequency of great north wind speed and surface layer's convergence led to the rising of pollution concentration. The location of sink motion at the high level was lower and that of the ascending motion at the low level was higher. This led to the constriction of the ascending motion below the boundary layer, worsening the pollution diffusion condition. In 1980~1989, the atmospheric capacity index was steady, while in 1990-1999, it fluctuated obviously and after 2000, it declined. In general, the atmospheric capacity presented a gentle decline. In spring and winter of 1980-1989, as well as spring and summer of 1990-2015, the atmospheric capacity was better. After 2000, the atmospheric capacity was decreasing compared to the last 20 years no matter in which season, and the difference of atmospheric capacity in seasons diminished. The boundary layer was higher in spring and summer, and lower in fall and winter in recent 35 years.

Key words: pollution diffusion conditions; great north wind speed; vertical motion; atmospheric capacity index; boundary layer height

自从1978年改革开放以来,中国经济迅速发展。在中国,特大城市群尤其是京津冀、长三角、珠三角地区产生巨大的能源消耗。1960年以来,中国区域CO₂排放经历了缓升阶段(1961~1980年)、显著上升阶段(1981~2000年)以及急剧上升阶段(2001~2012年),CO₂排放的不断增加也意味中国工业和城市在这50多年来的迅速发展^[1]。经济的发展,人口的膨胀,城市化越来越显著导致空气污染问题日益凸显。刘小宁等^[2]对西安市的霾日进行了统计,截止到2005年,47年来年均霾天数高达99 d

以上。Che等^[3]在分析了中国31个省会城市后发现,1980~2005年中国东部城市霾日呈现上升趋势。吴兑等^[4,5]研究发现,21世纪以后中国东部大部分地区霾日超过100 d,其中大城市超过150 d,北

收稿日期: 2016-10-22; 修订日期: 2017-01-17

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目(41605110); 国家重点研发计划项目(2016YFC0208902, 2016YFC0208905); 国家科技支撑计划项目(2014BAC23B01, 2014BAC23B03); 北京市科技计划首都蓝天行动培育专项(Z141100001014013)

作者简介: 郭淳薇(1987~),女,博士,工程师,主要研究方向为大气污染、云降水物理, E-mail: guochunwei871120@163.com

* 通信作者, E-mail: szb850804@163.com

京及华北地区霾日季节分布突出的特点是除去采暖季有较多的霾日外,在盛夏季节霾日也明显偏多。Zhang 等^[6]根据 681 个自动气象站数据分析得到中国霾高发的地区为京津冀、长江三角洲、珠江三角洲以及西南地区。

一个城市的空气质量由以下两个方面决定,一是污染源的空间分布和排放强度^[7~11],一个是大气自身的扩散能力^[12~17]。Zhao 等^[18]在分析华北平原冬季一次雾-霾天气时,认为本地及外来排放源、特殊的地形条件和静稳的天气背景是造成污染天气的重要原因。谭承好等^[19]认为霾日的不断增加与人为排放的增强和东亚季风的减弱有着密切的关系。有研究表明,在污染源相对稳定的时间内,城市大气污染的程度主要取决于大气自身的扩散条件^[20]。范绍佳等^[21]根据珠江三角洲的地理环境、气候背景和边界层气象特征建立了大气边界层珠江三角洲大气边界层概念模型,它可以解释珠江三角洲地区环境空气质量变化的原因,有助于促进珠江三角洲地区大气污染扩散能力分析、气流停滞区或霾天气的预测预报研究。王跃思等^[22]在分析了 2013 年元月京津冀地区 5 次强雾-霾过程后认为天气系统弱、强冷空气活动少和极不利于空气污染物扩散的局地气象条件是造成几次严重污染的主要原因。王宏等^[23]分析过福州 PM_{10} 的逐日资料后发现, PM_{10} 浓度的突变与大陆高压的位置、切变线和辐合系统有关。唐宜西等^[24]分析了 2013 年 1 月北京一次持续性雾-霾天气过程后发现平直的纬向环流,小风速,较大的相对湿度和较差的边界层扩散能力是污染物得以积累的主要原因。程念亮等^[25]分析了 2014 年 10 月北京 4 次重污染过程后发现,这 4 次过程均发生在大气层结稳定、逆温层明显,风速小,湿度大,不利于空气污染物扩散的气象条件当中。

以往的研究成果多集中于某次空气重污染过程的污染物浓度变化的趋势、边界层结构和天气背景的分析,若暂时不讨论排放源及污染物浓度的变化,某一地区多年来气象扩散条件及大气对污染物的容纳能力本身到底发生了什么变化,很少有人研究。基于上述原因,本文将针对污染排放显著上升和急剧增长的 1980~2015 年,讨论北京地区大气污染扩散条件,以及大气容纳能力变化的情况。

1 材料与方法

本文采用 NCEP (National Center for Environmental Prediction) 再分析月平均数据(2.5°

×2.5°)、1980~2015 年北京地区(54511 站点)探空数据以及温度、气压、相对湿度、风速风向、降水数据进行分析。将 1980~2015 年分为 3 个时间段,第一阶段为 1980~1989 年,第二阶段为 1990~1999 年,第三阶段为 2000~2015 年。首先以 40°N 为中心,沿经向做垂直剖面,分析温度、比湿、垂直速度的年代距平(年代平均与 35 年平均的差值)随高度的分布特征。并计算大气容量指数、边界层高度等能代表大气自身容纳能力参数的年代际变化。大气容量指数 A 是表征大气自身对污染物容纳能力的重要的物理量,计算方法为 $A = \pi VH/2$,式中, H 为混合层厚度, V 表示平均风速,混合层厚度与降水、下垫面的性质等有着密切的关系。本文在用 A 值法计算大气污染源强分布初估场时,采用国标(GB/T 3840-91)中的区域大气容量指数的长期平均值^[26]。边界层高度使用 NCEP 数据,计算方法见文献[27]。

2 结果与讨论

2.1 大气污染扩散条件年代际变化

北京地区(经纬度范围 115.7°~117.4°E, 39.4°~41.6°N)大气污染扩散条件的变化与大尺度热、动力特征有着非常密切的联系,下面以 40°N 为中心,沿经向做垂直剖面,分析各种气象要素的垂直方向上的年代变化。

2.1.1 热力结构层结变化

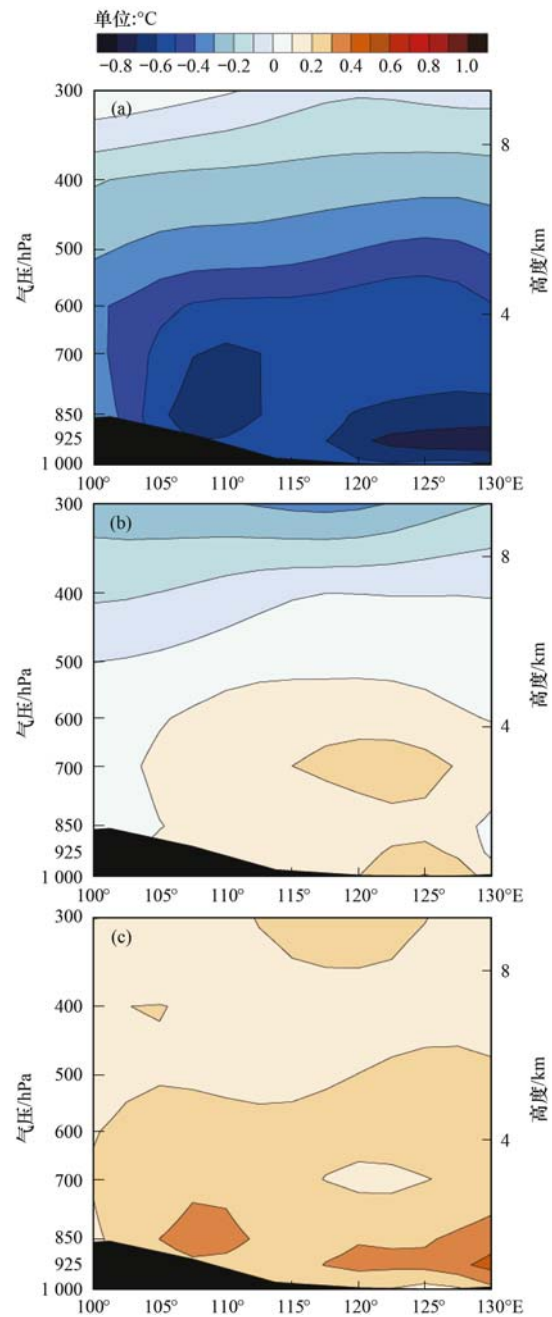
从图 1(a)可以看到,1980~1989 年,华北地区(110°~120°E)从近地面到 600 hPa 温度比多年平均值低 0.5℃左右,925 hPa 上下年代平均温度较多年平均值低 0.7℃左右。总体来说,从近地面到高空呈现出温度负距平的分布,说明冷空气整体较为活跃。

从图 1(b)可以看到,1990~1999 年,北京及周边地区从近地面到 500 hPa 温度平均值出现正距平,600 hPa 以下整体增温 0.2℃,整层大气出现了暖化的趋势。在华北地区上空 700 hPa 附近和 925 hPa 以下出现了 0.3℃的增温,这样在 115°~120°E 之间就形成了一个比较弱的“距平逆温”。从图 1(c)可以看到,2000~2015 年,平流层以下整层大气增温明显,500 hPa 以下出现温度正距平,距平为 0.3℃,相比于上一个年代大气增温更加明显,在 925 hPa 附近出现了 0.4℃的正距平,“距平逆温”的高值中心由上一个年代的 700 hPa 下降至 925 hPa,在近地面以上形成了比较明显的“距平逆温”。从图

2 可知,90 年以后(925 hPa 的观测是从 1992 年开始)每年 850 hPa 以下逆温出现的频率都在 13% ~ 20%, 总体趋势频率稍有减少. 经过分层计算,这 20 多年来 925 ~ 850 hPa 逆温频率基本维持不变,但是 1 000 ~ 925 hPa 逆温出现的频率稍有减少,这与近年来城市热岛效应导致近地面温度升高有关系. 总体来看 1990 年以后,逆温一直保持着比较高的频率,大气垂直结构比较稳定,不利于空气污染物的扩散.

冷空气对北京地区大气污染扩散条件的改善作用多体现在偏北风先达到高层,之后侵入到边界层内,进而到达近地层,上空的空气辐合导致近地层下沉气流层的形成,出现明显的下沉辐散运动,并伴随着偏北风的增大. 如果冷空气太弱,高空偏北风并没有侵入到边界层内,近地层仍然维持偏南风或小风,散度从高层到低层呈现辐合-辐散-辐合的结构. 近地层的辐合导致周边的污染物向本地汇集,导致污染物浓度升高^[28,29]. 通过计算冷空气出现的频次可以发现,90 年代后,850 hPa 出现降温而 925 hPa 未出现降温的频次增多(图 2),说明冷空气到达北京上空后,对下层的影响减弱或是冷空气强度不够,这样可能会导致高空偏北风无法侵入到边界层底部,近地层仍然维持动力辐合,不利于空气污染物的扩散. 有研究表明,近地面 3、4 级风速条件下 $\text{PM}_{2.5}$ 扩散能力大大增强,污染物浓度明显降低^[31]. 通过统计 1980 年以后近地面 $3.4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 以上的北风(3 级以上)出现的频率,可以发现,在 1980 ~ 1989 年,3 级以上北风出现的频率普遍都在 14% 左右,1990 ~ 1999 年前期出现的频率较大,中后期维持在 10% 左右,而在 2000 年以后出现的频率逐渐减小,最小的是 2014 年,3 级以上北风出现的频率刚刚超过 6% (图 3). 总体来看,1980 年以后,冷空气到达北京上空后,对下层的影响减弱或是冷空气强度不够导致近地面北风风速减小,近地面污染扩散能力有所减弱.

从图 4(a) 可以看到,1980 ~ 1989 年,北京地区近地面到 850 hPa 平均比湿值较多年平均值高出 $0.04 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 以上,整层的比湿要比多年平均高,但是增湿不是十分明显. 1990 ~ 1999 年,在对流层以下,华北及周边地区在 600 hPa 以下呈现出较多年平均更湿的情况,并且随着高度的下降,增湿更加明显,尤其是在 $115^{\circ} \sim 120^{\circ}\text{E}$ 地区,850 hPa 到近地面比湿距平可以达到 $0.18 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ [图 4(b)],整层湿度的增加,导致气溶胶吸湿增长明显,云量增多,到



(a) 1980 ~ 1989 年; (b) 1990 ~ 1999 年;
(c) 2000 ~ 2015 年; 黑色为山脉

图 1 年代温度距平随高度的变化

Fig. 1 Change of temperature anomaly with height

达近地面的太阳短波辐射减小,地面长波辐射被限制在云层以内,大气稳定度增强,不利于空气污染物的扩散. 2000 ~ 2015 年,华北地区整层比湿表现出负距平的情况,并且随着高度的下降负距平数值越大,850 hPa 以下 $115^{\circ} \sim 120^{\circ}\text{E}$ 区域比湿距平可以达到 $-0.16 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ [图 4(c)]. 大气整层明显变干,水汽减少,这意味着气溶胶不能得以充分增长,云量减少,大气稳定度有所减弱. 通过前面逆温的计算分

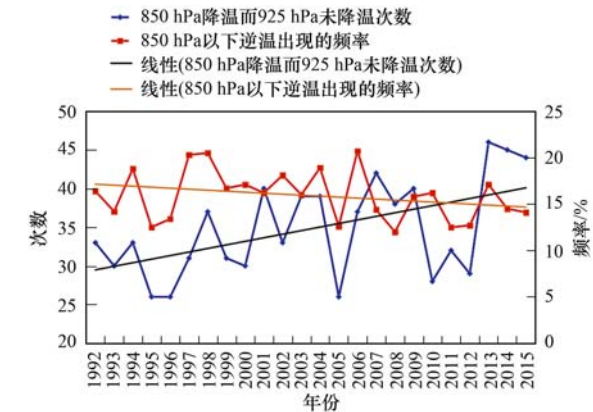


图2 90年代后北京地区850 hPa降温而925 hPa未降温的频次以及850 hPa以下逆温出现的频率

Fig. 2 Frequency of drop in temperature on 850 hPa while not on 925 hPa and temperature inversion since 1992

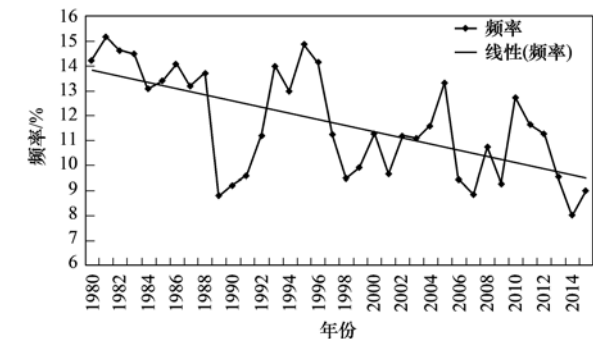


图3 1980年开始大于3.4 m·s⁻¹以上北风出现的频率

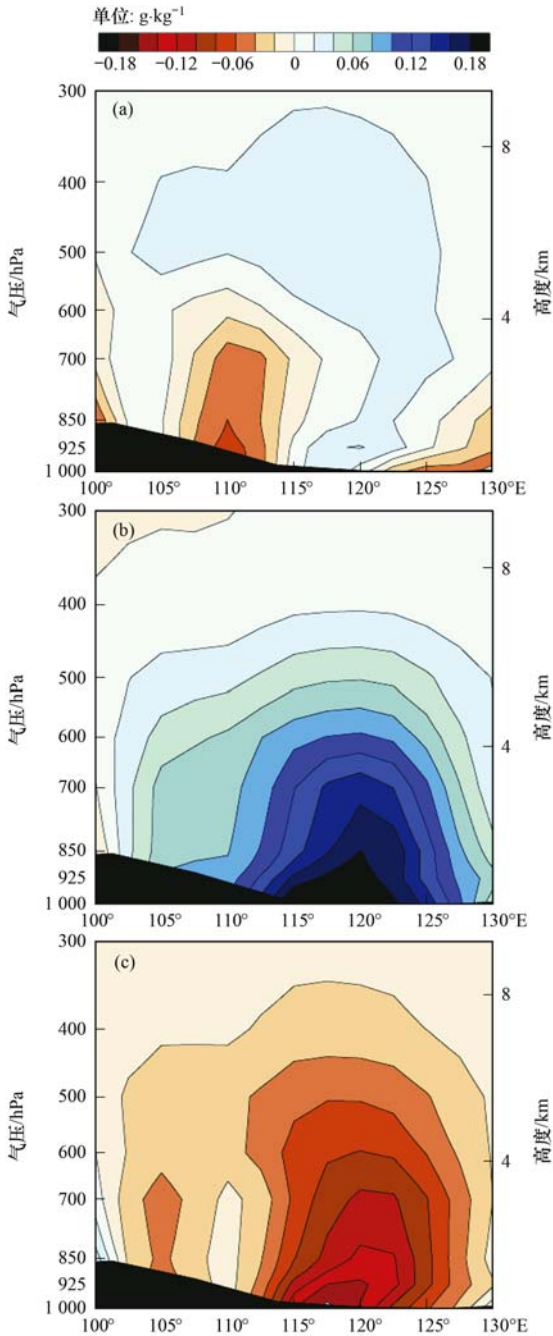
Fig. 3 Frequency of north wind speed greater than 3.4 m·s⁻¹ since 1980

析得知,1990年以后逆温出现的频率一直比较高,大气稳定度一直比较强,但是2000年以后整层湿度减小使得大气稳定度相对减弱.

综合来看,1980~2015年,大气不断增温,1990年以后逆温明显,大气较为稳定,冷空气到达北京上空后对下层的影响减弱,3级以上北风减少,近地层辐合,污染物浓度升高.但是2000~2015年,由于湿度减小,大气稳定度相比于1990~1999年稍有减弱.

2.1.2 垂直运动的年代变化

如图5(a),1980~1989年,北京地区近地面垂直速度与多年平均相比基本一致,但是中高层大气较多年平均相比表现出较明显的“下沉”运动.1990~1999年,相对于多年平均垂直速度,华北地区近地面表现出“下沉”运动,而中高层为“上升”运动,这一阶段是大气污染扩散条件由有利扩散向不利扩散形势的转折阶段[图5(b)].2000~2015年,北京地区700 hPa以下相对于多年平均表现为“上升”运动,但是600~200 hPa之间则表现为“下沉”运



(a)1980~1989年;(b)1990~1999年;
(c)2000~2015年;黑色为山脉

图4 年代比湿距平随高度的变化
Fig. 4 Change of specific humidity anomaly with height

动,这种高低空垂直气流的配置有利于水汽和大气污染物在低层大气积累[图5(c)].这里需要指出的是,天气尺度的上升运动的数量级为cm·s⁻¹,而近地层污染物浓度的辐合数量级为m·s⁻¹,所以想要依靠天气尺度的上升运动将污染物带入高空而降低近地层浓度在区域空气重污染的背景下较难实现.只有中小尺度的对流系统^[29],和对北京地区边界层结构有特殊影响的偏东风^[28],能够形成几十

$\text{cm} \cdot \text{s}^{-1} \sim \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的上升运动才能够将近地层污染物浓度抬升至高层清除。

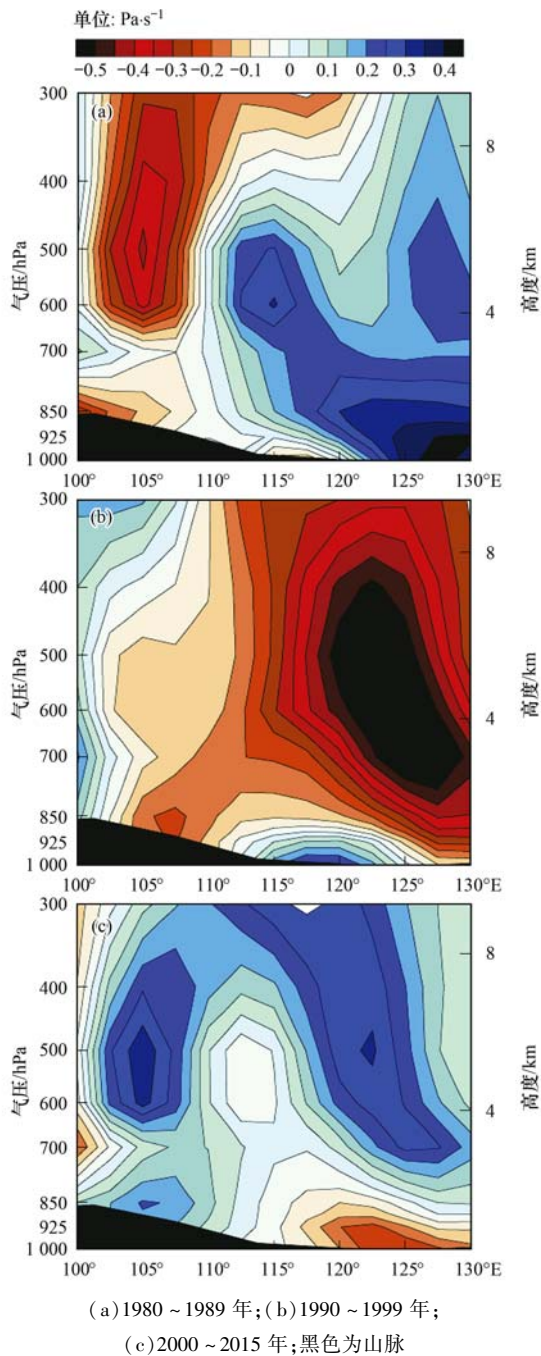


图 5 年代垂直速度距平随高度的变化

Fig. 5 Change of vertical velocity anomaly with height

2.2 大气自身容纳能力的变化

大气容量指数能够指示大气污染的变化趋势. 气象条件是判断环境大气对污染物容纳能力的关键因素. 大气容量指数是一个综合表征这种能力的指标, 它与近地面层空气的流动性、大气在垂直方向上的稳定性、稳定层的厚度以及是否有降水天气等有关. 其值越小, 则大气对污染物的容纳能力越低.

大气流过地面时, 地面上各种粗糙元, 如草、沙粒、庄稼、树木、房屋等会使大气流动受阻, 这种摩擦阻力由于大气中的湍流而向上传递, 并随高度的增加而逐渐减弱, 达到某一高度后便可忽略. 此高度称为大气边界层厚度, 它随气象条件、地形、地面粗糙度而变化, 大致为 300 ~ 1 000 m.

2.2.1 年代际变化

图 6(a) 计算了北京地区大气容量指数和年总降水量随时间的变化. 可以看到, 1980 ~ 1989 年大气容量指数比较平稳, 都维持在 1.2 ~ 1.3 之间, 只有 1983 年超过了 1.5. 从降水量的年变化上可以看到, 1980 ~ 1989 年, 年总降水量呈现出明显的逐渐上升的趋势, 尤其是 1985 ~ 1988 年, 年总降水量都明显多于 600 mm, 对空气污染物有明显的清除作用. 大部分年份 3 级以上北风出现的频率都在 13% 以上 (图 3), 有利于空气污染物的扩散. 除了 1987 年边界层高度稍低, 其他时间年均边界层高度都在 600 ~ 650 m 左右 [图 6(b)], 有利于空气污染物在垂直方向上的混合. 各种条件显示, 1980 ~ 1989 年, 气象条件总体比较平稳, 整体扩散条件较好, 大气自身容纳能力比较稳定.

1990 ~ 1999 年, 大气容量指数波动较大, 1990 年和 1992 年大气容量指数都小于 1, 而 1997 年达到 1.5 以上, 1998 年大气容量指数则大于 2, 其他时间都在 1.2 左右. 在这 10 年中, 降水量也呈现出分布不均匀的趋势, 1991、1994 和 1998 年, 年总降水量都超过了 700 mm, 而在 1999 年, 年总降水量却只有不到 300 mm [图 6(a)]. 1990 ~ 1999 年前期, 较大北风 (3 级以上北风) 频率不断增加, 但是后期明显下降 (图 3), 说明前期对空气污染物的扩散比较有利. 1990 ~ 1999 年边界层高度在 600 ~ 650 m 左右, 但是 1999 年达到了 750 m 以上 [图 6(b)]. 1992 年大气容量指数低与降水量不够多, 较大北风出现的频率低有明显关系, 而 1997 年大气容量指数较大则与边界层高度较高有利于污染物的垂直混合有关, 1998 年指数较大则与罕见的较大降水量有着明显的关系. 从这里可以看出, 1990 ~ 1999 年大气自身容纳能力整体较好, 但是出现了明显的波动性, 各年变化较大. 而大气自身的容纳能力与降水、风速、边界层高度等都有一定的关系, 单独某一个要素不能够决定大气自身容纳能力的强弱.

2000 年开始的前 5 年, 大气容量指数比较稳定, 都在 1.2 ~ 1.3 之间, 但是之后则表现为明显的下降趋势, 尤其是 2013 年开始, 大气容量指数出现

了小于 1 的情况. 这 15 年年均降水量前期较少, 不超过 500 mm, 但 2008 年以后降水明显增多, 2011 年, 2012 年都超过了 700 mm[图 6(a)]. 2000 年以后, 较大北风出现的频率越来越低, 都在 13% 以下, 证明由于较大风速导致的有利于空气污染物扩散的条件越来越不明显[图 6(b)]. 2000 年以后前期边界层高度出现明显波动, 2000、2002、2005 两年都在 700 m 以上, 2005 ~ 2009 年边界层高度上升, 2009 年以后又不断下降[图 6(b)]. 总体来看, 2000 ~ 2015 年各年降水量和边界层高度出现明显波动, 较大北风出现频率减小, 大气自身容纳能力整体减弱.

从图 6(a) 大气容量指数趋势线上可以看到, 这 30 多年来大气自身的容纳能力呈现一个平缓的下降趋势.

表 1 显示了每个年代大气容量指数、边界层高度、降水量和较大北风出现频率的平均值. 可以看到, 1980 ~ 1989 年和 1990 ~ 1999 年大气容量指数均值基本一致, 都在 1.3 左右, 与 35 年平均值相比均增长了 5% ~ 6%. 可以明显看出, 近 35 年中前 20 年相比于大气自身容纳平均能力是较强的. 这与前 20 年年平均降水量 548.3 mm 和 601 mm 分别较多年平均持平 and 明显增加, 较大北风出现的频率 13.8% 和 11.7% 较多年平均值 11.9% 增加和持平有着密切的关系. 2000 ~ 2015 年, 大气容量指数平均值为 1.12, 相比于 35 年平均值下降了 11.8%, 降水量和较大北风出现的频率较多年平均下降了 10% 左右. 这 3 个阶段边界层高度平均值比较稳定, 没有较大的变化. 总体来看最近 15 年大气自身容纳能力较差.

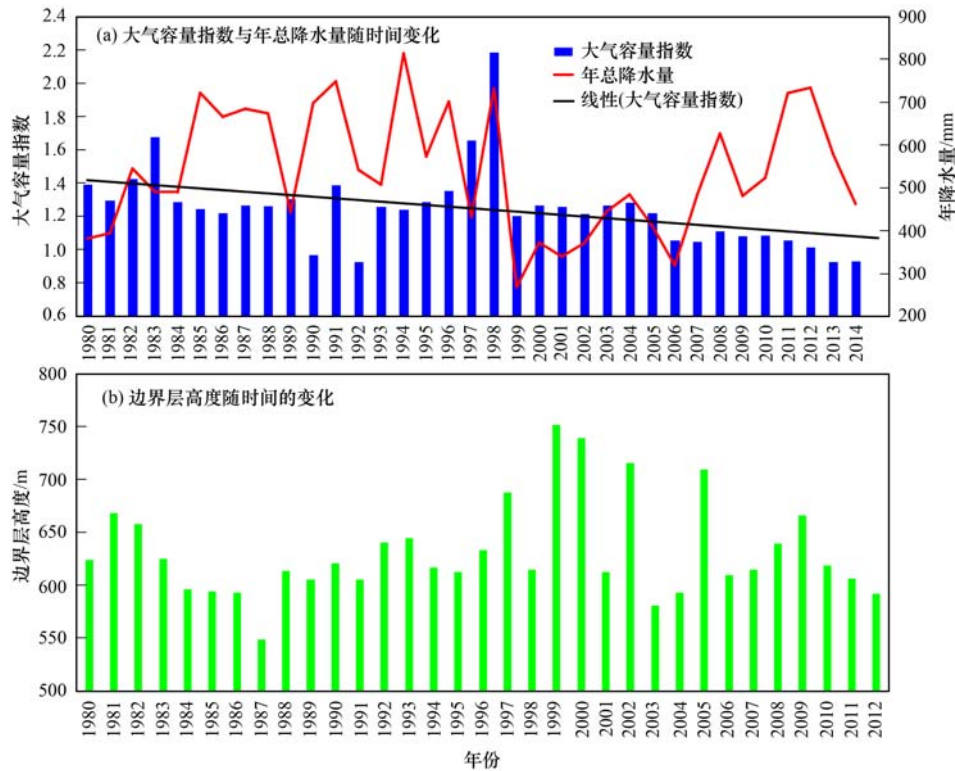


图 6 大气容量指数、年总降水量、边界层高度随时间的变化

Fig. 6 Change of atmospheric capacity index, annual total precipitation and boundary layer height with time

表 1 大气容量指数、边界层高度、年均降水量、较大北风出现频率年代平均值比较

Table 1 Comparison of atmospheric capacity index, boundary layer height, total average precipitation and wind speed greater than $3.4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

年份	大气容量 指数	与多年 平均相比/%	边界层高度 /m	与多年 平均相比/%	年均降水量 /mm	与多年 平均相比/%	较大北风 出现频率/%	与多年 平均相比/%
1980 ~ 1989	1.34	5.5	612.7	-2.9	548.3	0.4	13.8	23.8
1990 ~ 1999	1.35	6.3	642.9	1.8	601.0	10	11.7	-2.2
2000 ~ 2015	1.12	-11.8	638.4	0.2	490.0	-10.4	10.6	-10.8
1980 ~ 2015	1.27	—	631.3	—	546.3	—	11.9	—

2.2.2 季节变化

由前文分析可知,近 15 年来北京地区大气自身的容纳能力相比于多年平均是较差的,那么究竟是哪个季节大气容纳能力较差,下面进行分析。

进一步计算每个年代 4 个季节大气容量指数和边界层高度,如图 7(a)。可以发现,在 1980~1989 年,春季和冬季大气容量指数比较高,夏季和秋季大气容量指数较低。一般来说,春季和夏季大气自身的扩散能力是比较好的,因为春季北风大,夏季降水多,但是这 10 年却与人们固有的认知有着比较明显的差异。这是因为 1980~1989 年期间春季和冬季较大北风出现的频率较多,并且春季边界层高度还比较高([图 7(b)])。1990~1999 年和 2000~2015 年,大气容量指数都表现为春季、夏季较高,秋季、冬季较低,并且无论哪个年代,春季都是大气容量指数最高的季节,这与较大北风频率高,边界层高度较高有着密切的关系。而随着年代的变化,春季的大气容量指数又在不断降低,1980~1989 年和 1990~1999 年都在 1.6 以上,而 2000~2015 年小于 1.6。夏季大气容量指数总体较春季明显减小,1980~1989 年和 2000~2015 年,夏季大气容量指数都在 1.1 上下,1990~1999 年达到 1.3,这应该与这 10 年中某些年份降水量较大、较大北风出现频率较多导致大气容量指数平均值整体较大有关。秋季大气容量指数也是在 1990~1999 年最高,1980~1989 年次之,最小的是 2000~2015 年,平均大气容量指数不到 1。冬季大气容量指数年代变化呈现下降的

趋势,可以看到,1980~1989 年 1 月,2 月,12 月的大气容量指数分别为 1.8,1.5,1.4,1990~1999 年都在 1.2 附近,而 2000 年以后在 1 以下。总体来看,1980~1989 年春季和冬季大气自身容纳能力较好,1990~1999 年春季和夏季大气自身容纳力较强,2000 年以后,无论哪个季节,大气自身的容纳能力都是在减弱的,季节差异性变小。从这 30 多年月平均边界层高度可以看到,春季和夏季大部分时间边界层高度都在 600 m 以上,而秋季和冬季大部分时间不足 500 m(表 2)。总体看来,边界层高度在这 35 年来都是春季和夏季较高,秋季和冬季明显降低,各个年代边界层高度变化不大。

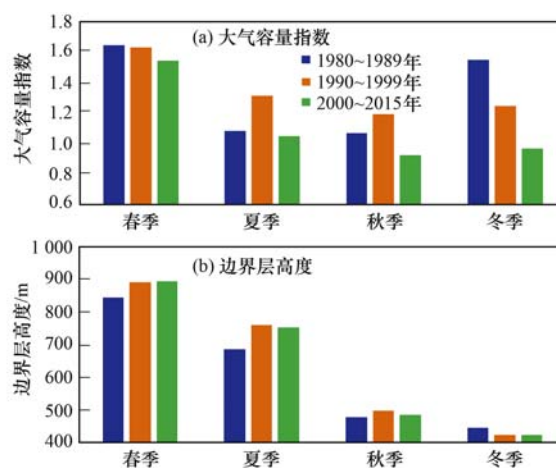


图 7 四季大气容量指数和边界层高度的变化

Fig. 7 Change of atmospheric capacity index and boundary layer height in four seasons

表 2 年代月平均大气容量指数、边界层高度的变化

Table 2 Month average of atmospheric capacity index and boundary layer height

年份	项目	月份											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1980 ~ 1989	A	1.8	1.5	1.6	1.84	1.5	1.3	1.0	0.9	1.1	1.0	1.1	1.4
	U	414.5	521.5	695.9	882.2	951.4	904.1	652.4	497.4	483.4	502.1	449.6	397.9
1990 ~ 1999	A	1.2	1.3	1.5	1.4	1.9	1.5	1.2	1.2	1.2	1.1	1.2	1.2
	U	376.8	519.1	708.4	943.2	1021.2	997.9	737.2	548	526.5	520	444.5	371.9
2000 ~ 2015	A	0.9	1.0	1.5	1.6	1.5	1.1	1.0	1.0	1.0	0.9	0.9	1.0
	U	385.3	469.7	760.3	922.5	999.5	966.3	726.6	561.9	516.7	500.1	440.4	411.9

1) A 表示大气容量指数, U 表示边界层高度, m

3 结论

(1)从热力条件来看,1980~2015 年,大气不断增温,1990 年以后逆温明显,大气较为稳定,冷空气到达北京上空后对下层的影响减弱,3 级以上偏北风频率减少,近地层辐合,不利于空气污染物扩散。但是 2000~2015 年,由于湿度减小,大气稳定度相

比于 1990~1999 年稍有减弱。

(2)2000 年以后,中高层下沉运动位置不断下压,低层上升运动加强,由于天气尺度的上升运动的数量级远小于近地层污染物浓度的辐合数量级,所以低层上升运动被限制在边界层以内,这样会导致污染物积聚。

(3)大气容量指数能够反映大气自身对污染物

的容纳能力. 大气容量指数与降水量,较大风速出现频率、混合层高度等都有着明显的关系,是多种要素综合作用的结果. 1980~1989年大气自身容纳能力较为稳定,1990~1999年大气容量指数出现波动,而2000~2015年大气容量指数呈现明显减小的趋势. 总体来看,近35年大气自身的容纳能力呈现一个平缓的下降趋势.

(4)1980~1989年春季和冬季大气自身容纳能力较好,1990~1999年春季和夏季大气自身容纳力较强,但是2000年以后,无论哪个季节,大气自身的容纳能力都是在减弱的,季节性差异变小.

(5)边界层高度在这35年来都是春季和夏季较高,秋季和冬季明显降低,各个年代边界层高度变化不大.

参考文献:

- [1] 徐祥德, 王寅钧, 赵天良, 等. 中国大地形东侧霾空间分布“避风港”效应及其“气候调节”影响下的年代际变异[J]. 科学通报, 2015, **60**(12): 1132-1143.
- Xu X D, Wang Y J, Zhao T L, *et al.* “Harbor” effect of large topography on haze distribution in eastern China and its climate modulation on decadal variations in haze[J]. Chinese Science Bulletin, 2015, **60**(12): 1132-1143.
- [2] 刘小宁, 张洪政, 李庆祥, 等. 我国大雾的气候特征及变化初步解释[J]. 应用气象学报, 2005, **16**(2): 220-230.
- Liu X N, Zhang H Z, Li Q X, *et al.* Preliminary research on the climatic characteristics and change of fog in China[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2005, **16**(2): 220-230.
- [3] Che H Z, Zhang X Y, Li Y, *et al.* Haze trends over the capital cities of 31 provinces in China, 1981—2005[J]. Theoretical and Applied Climatology, 2009, **97**(3-4): 235-242.
- [4] 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.
- Wu D, Wu X J, Li F, *et al.* Temporal and spatial variation of haze during 1951-2005 in Chinese mainland[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2010, **68**(5): 680-688.
- [5] 吴兑, 廖碧婷, 吴蒙, 等. 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[J]. 环境科学学报, 2014, **34**(1): 1-11.
- Wu D, Liao B T, Wu M, *et al.* The long-term trend of haze and fog days and the surface layer transport conditions under haze weather in North China[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2014, **34**(1): 1-11.
- [6] Zhang X Y, Wang Y Q, Niu T, *et al.* Atmospheric aerosol compositions in China: spatial/temporal variability, chemical signature, regional haze distribution and comparisons with global aerosols[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2012, **12**(2): 779-799.
- [7] Streets D G, Gupta S, Waldhoff S T, *et al.* Black carbon emissions in China[J]. Atmospheric Environment, 2001, **35**(25): 4281-4296.
- [8] Zhang Q, Streets D G, Carmichael G R, *et al.* Asian emissions in 2006 for the NASA INTEX-B mission[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2009, **9**(14): 5131-5153.
- [9] Wu Q Z, Wang Z F, Gbaguidi A, *et al.* Numerical study of contributions to air pollution in Beijing during CARE Beijing-2006[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2011, **11**(12): 5997-6011.
- [10] 王喜全, 杨婷, 王自发. 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, 2011, **16**(6): 690-696.
- Wang X Q, Yang T, Wang Z F. Impact of dust-haze episode from one air pollution control region to the other-one case study[J]. Climatic and Environmental Research, 2011, **16**(6): 690-696.
- [11] 赵伟, 范绍佳, 谢文彰, 等. 烟花燃放对珠三角地区春节期间空气质量的影响[J]. 环境科学, 2015, **36**(12): 4358-4365.
- Zhao W, Fan S J, Xie W Z, *et al.* Influence of Burning fireworks on air quality during the spring festival in the pearl river delta[J]. Environmental Science, 2015, **36**(12): 4358-4365.
- [12] 任阵海, 苏福庆. 大气输送的环境背景场[J]. 大气科学, 1998, **22**(4): 454-459.
- Ren Z H, Su F Q. Environment background field of atmospheric transportation[J]. Scientia Atmospherica Sinica, 1998, **22**(4): 454-459.
- [13] 张蕾, 赵淑艳, 金永利. 北京地区低空风、温度层结对大气污染物垂直分布影响初探[J]. 应用气象学报, 2002, **13**(S1): 153-159.
- Zhang Q, Zhao S Y, Jin Y L. A preliminary study of impacts of wind in low level and temperature stratification on vertical distribution of atmospheric pollutants in Beijing area[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2002, **13**(S1): 153-159.
- [14] 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.
- Zhang X Y, Sun J Y, Wang Y Q, *et al.* Factors contributing to haze and fog in China[J]. Chinese Science Bulletin, 2013, **58**(13): 1178-1187.
- [15] 张人禾, 李强, 张若楠. 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.
- Zhang R H, Li Q, Zhang R N. Meteorological conditions for the persistent severe fog and haze event over eastern China in January 2013[J]. Science China Earth Sciences, 2014, **57**(1): 26-35.
- [16] 王自发, 李杰, 王哲, 等. 2013年1月我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.
- Wang Z F, Li J, Wang Z, *et al.* Modeling study of regional severe hazes over Mid-Eastern China in January 2013 and its implications on pollution prevention and control[J]. Science China Earth Sciences, 2014, **57**(1): 3-13.
- [17] 毛卓成, 马井会, 许建明, 等. 上海地区持续东风系统控制下污染扩散条件分析[J]. 气象, 2015, **41**(7): 890-898.
- Mao Z C, Ma J H, Xu J M, *et al.* Comparative analysis of pollution diffusion conditions under the control of sustained easterly system in Shanghai[J]. Meteorological Monthly, 2015, **41**(7): 890-898.
- [18] Zhao X J, Zhao P S, Xu J, *et al.* Analysis of a winter regional haze event and its formation mechanism in the North China Plain[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2015, **13**(11):

- 5685-5696.
- [19] 谭成好, 赵天良, 崔春光, 等. 近 50 年华中地区霾污染的特征[J]. 中国环境科学, 2015, **35**(8): 2272-2280.
- Tan C H, Zhao T L, Cui C G, *et al.* Characterization of haze pollution over Central China during the past 50 years[J]. China Environmental Science, 2015, **35**(8): 2272-2280.
- [20] 梅鹏蔚. 稳定气象条件对天津市环境空气质量的影响[J]. 城市环境与城市生态, 2006, **19**(4): 37-39.
- Mei P W. Influence of steady weather conditions to air quality in Tianjin[J]. Urban Environment & Urban Ecology, 2006, **19**(4): 37-39.
- [21] 范绍佳, 王安宇, 樊琦, 等. 珠江三角洲大气边界层特征及其概念模型[J]. 中国环境科学, 2006, **26**(S1): 4-6.
- Fan S J, Wang A Y, Fan Q, *et al.* Atmospheric boundary layer features of Pearl River Delta and its conception model[J]. China Environmental Science, 2006, **26**(S1): 4-6.
- [22] 王跃思, 姚利, 王莉莉, 等. 2013 年元月我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.
- Wang Y S, Yao L, Wang L L, *et al.* Mechanism for the formation of the January 2013 heavy haze pollution episode over central and eastern China[J]. Science China Earth Sciences, 2014, **57**(1): 14-25.
- [23] 王宏, 林长城, 蔡义勇, 等. 福州市 PM₁₀ 突变特征与气象条件的关系研究[J]. 热带气象学报, 2008, **24**(5): 564-568.
- Wang H, Lin C C, Cai Y Y, *et al.* The relationship between mutation characteristics of PM₁₀ and meteorological conditions in Fuzhou city[J]. Journal of Tropical Meteorology, 2008, **24**(5): 564-568.
- [24] 唐宜西, 张小玲, 熊亚军, 等. 北京一次持续霾天气过程气象特征分析[J]. 气象与环境学报, 2013, **29**(5): 12-19.
- Tang Y X, Zhang X L, Xiong Y J, *et al.* Meteorological characteristics of a continuous haze process in Beijing [J]. Journal of Meteorology and Environment, 2013, **29**(5): 12-19.
- [25] 程念亮, 李云婷, 张大伟, 等. 2014 年 10 月北京市 4 次典型空气重污染过程成因分析[J]. 环境科学研究, 2015, **28**(2): 163-170.
- Cheng N L, Li Y T, Zhang D W, *et al.* Analysis about the characteristics and formation mechanisms of serious pollution events in October 2014 in Beijing [J]. Research of Environmental Sciences, 2015, **28**(2): 163-170.
- [26] 朱蓉, 徐大海, 赵珊珊. 第 2 代大气污染物排放源强反演模式 SSIM2 及其在城市规划大气环境影响评价中的应用[J]. 气象科技, 2009, **37**(6): 641-645.
- Zhu R, Xu D H, Zhao S S. Second-generation source-strength inversed model and its application in atmospheric environmental impact assessment for urban planning[J]. Meteorological Science and Technology, 2009, **37**(6): 641-645.
- [27] Hong S Y, Pan H L. Nonlocal boundary layer vertical diffusion in a medium-range forecast model[J]. Monthly Weather Review, 1996, **124**(10): 2322-2339.
- [28] 廖晓农, 孙兆彬, 唐宜西, 等. 高空偏北风背景下北京地区高污染形成的环境气象机制研究[J]. 环境科学, 2015, **36**(3): 801-808.
- Liao X N, Sun Z B, Tang Y X, *et al.* Meteorological mechanism for the formation of a serious pollution case in Beijing in the background of northerly flow at upper levels[J]. Environmental Science, 2015, **36**(3): 801-808.
- [29] 孙兆彬, 廖晓农, 王占山, 等. 北京地区空气重污染下雾凇和偏东风对 PM_{2.5} 清除作用[J]. 环境科学, 2016, **37**(10): 3679-3685.
- Sun Z B, Liao X N, Wang Z S, *et al.* Scavenging effect of rime and east wind on PM_{2.5} under air heavy pollution in Beijing[J]. Environmental Science, 2016, **37**(10): 3679-3685.
- [30] 俞小鼎. 2012 年 7 月 21 日北京特大暴雨成因分析[J]. 气象, 2012, **38**(11): 1313-1329.
- Yu X D. Investigation of Beijing extreme flooding event on 21 July 2012[J]. Meteorological Monthly, 2012, **38**(11): 1313-1329.
- [31] 程念亮, 张大伟, 李云婷, 等. 风向对北京市重污染日 PM_{2.5} 浓度分布影响研究[J]. 环境科学与技术, 2016, **39**(3): 143-149, 161.
- Cheng N L, Zhang D W, Li Y T, *et al.* Effects of wind direction on spatial distribution of PM_{2.5} during heavy pollution days in Beijing[J]. Environmental Science & Technology, 2016, **39**(3): 143-149, 161.

CONTENTS

Comparison of Models on Spatial Variation of PM _{2.5} Concentration; A Case of Beijing-Tianjin-Hebei Region	WU Jian-sheng, WANG Xi, LI Jia-cheng, <i>et al.</i> (2191)
Change of Atmospheric Pollution Diffusion Conditions in Beijing in Recent 35 Years	GUO Chun-wei, SUN Zhao-bin, LI Zi-ming, <i>et al.</i> (2202)
Precipitation and Its Effects on Atmospheric Pollutants in a Representative Region of Beijing in Summer	HAN Li-hui, ZHANG Hai-liang, XIANG Xin, <i>et al.</i> (2211)
Impact of Mountain-Valley Wind Circulation on Typical Cases of Air Pollution in Beijing	DONG Qun, ZHAO Pu-sheng, WANG Ying-chun, <i>et al.</i> (2218)
Fugitive Dust Emission Characteristics from Building Construction Sites of Beijing	XUE Yi-feng, ZHOU Zhen, HUANG Yu-hu, <i>et al.</i> (2231)
Characteristics of Volatile Organic Compounds Emitted from Biomass-pellets-fired Boilers	WU Chang-da, ZHANG Chun-lin, BAI Li, <i>et al.</i> (2238)
Effect of VOCs on O ₃ and SOA Formation Potential During the Combined Pollution Process in Guangzhou Panyu Atmospheric Composition Station	ZOU Yu, DENG Xue-jiao, LI Fei, <i>et al.</i> (2246)
Characteristic Study on the "Weekend Effect" of Atmospheric O ₃ in Northern Suburb of Nanjing	WANG Jun-xiu, AN Jun-lin, SHAO Ping, <i>et al.</i> (2256)
Atmospheric Ammonia/Ammonium-nitrogen Concentrations and Wet and Dry Deposition Rates in a Double Rice Region in Subtropical China	WANG Jie-fei, ZHU Xiao, SHEN Jian-lin, <i>et al.</i> (2264)
Species of Iron in Size-resolved Particle Emitted from Xuanwei Coal Combustion and Their Oxidative Potential	WANG Qiang-xiang, TAN Zheng-ying, ZHAO Hui, <i>et al.</i> (2273)
Dioxin Pollution and Occupational Inhalation Exposure of PCDD/Fs in Municipal Solid Waste Incinerator	DU Guo-yong, WANG Qian, ZHANG Shu-lin, <i>et al.</i> (2280)
Characteristics of Mercury Emissions from Modern Dry Processing Cement Plants in Chongqing	ZHANG Cheng, ZHANG Ya-hui, WANG Yong-min, <i>et al.</i> (2287)
Correlations of Light-duty Gasoline Vehicle Emissions Based on VMAS and CVS Measurement Systems	WANG Hong-yu, HUANG Cheng, HU Qing-yao, <i>et al.</i> (2294)
Emission Characteristics of Particulate Matter from Diesel Buses Meeting Different China Emission Standards Fueled with Biodiesel	LOU Di-ming, ZHAO Cheng-zhi, XU Ning, <i>et al.</i> (2301)
Spatial Variation and Environmental Significance of δ ¹⁸ O and δD Isotope Composition in Xijiang River	XU Qi, LI Jian-hong, SUN Ping-an, <i>et al.</i> (2308)
Comparative Study of SWAT and DNDC Applied to N Leach and Export from Subtropical Watershed	HAN Ning, CHEN Wei-liang, GAO Yang, <i>et al.</i> (2317)
Comparison of Relationship Between Conduction and Algal Bloom in Pengxi River and Modao River in Three Gorges Reservoir	JIANG Wei, ZHOU Chuan, JI Dao-bin, <i>et al.</i> (2326)
Temporal and Spatial Variation Characteristics of Nitrogen and Phosphorus in Sediment Pore Water and Overlying Water of Dianchi Caohai Lake	WANG Yi-ru, WANG Sheng-ru, JIAO Li-xin, <i>et al.</i> (2336)
Distribution and Emission Flux Estimation of Phosphorus in the Sediment and Interstitial Water of Xiangxi River	LUO Yu-hong, NIE Xiao-qian, LI Xiao-ling, <i>et al.</i> (2345)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metals in Water and Sediment from Daye Lake	ZHANG Jia-quan, TIAN Qian, XU Da-mao, <i>et al.</i> (2355)
Formation of Brominated Disinfection By-products in Low Temperature Multi-effect Distillation (LT-MED) Process for Seawater Desalination	QI Fei, SUN Ying-xue, YANG Zhe, <i>et al.</i> (2364)
Applicability Comparison and Application Study of Two Methods for Determination of the Copper Complexing Capacity of Waters	WANG Chen-ye, JIANG Kuo, XIE Wen-long, <i>et al.</i> (2373)
Performance of Applying Scale Permeable Pavements for Control of Runoff Pollution in an Area with High Groundwater Level	JIN Jian-rong, LI Tian, SHI Zhen-bao, <i>et al.</i> (2379)
Removal of 2,4-dichlorophenol in Underground Water by Stabilized Nano Zero-valent Iron	ZHANG Yong-xiang, CHANG Shan, LI Fei, <i>et al.</i> (2385)
Enhancement of Sulfamerazine Degradation Under H ₂ O ₂ /KI System by Ultrasound and UVA Irradiation	WEI Hong, SUN Bo-cheng, YANG Xiao-yu, <i>et al.</i> (2393)
Comparison of Phosphate Adsorption onto Zirconium-Modified Bentonites with Different Zirconium Loading Levels	JINAG Bo-hui, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i> (2400)
Removal of Nitrogen in Municipal Secondary Effluent by a Vertical Flow Constructed Wetland Associated with Iron-carbon Internal Electrolysis	ZHENG Xiao-ying, ZHU Xing, ZHOU Xiang, <i>et al.</i> (2412)
Purification Efficiency and Influencing Factors of Combined Bio-filters for Aquaculture Wastewater	ZHANG Shi-yang, ZHANG Sheng-hua, ZHANG Xiang-ling, <i>et al.</i> (2419)
Effect of Temperature on PAO Activity and Substrate Competition	ZHANG Ling, PENG Dang-cong, CHANG Die, <i>et al.</i> (2429)
Enrichment and Nitrogen Removal Characteristics of Marine Anaerobic Ammonium Oxidizing Bacteria	FENG Li, YU De-shuang, LI Jin, <i>et al.</i> (2435)
Ammonia Removal Rate and Microbial Community Structures in Different Biofilters for Treating Aquaculture Wastewater	ZHOU Hong-yu, HAN Mei-lin, QIU Tian-lei, <i>et al.</i> (2444)
Influence of Phosphate on Nitrogen Removal Efficiency of ANAMMOX Sludge	ZHOU Zheng, LIU Kai, WANG Fan, <i>et al.</i> (2453)
Characteristics and Mechanism of Biological Nitrogen and Phosphorus Removal Granular Sludge Under Carbon Source Stress	QIN Shi-you, CHEN Wei, MA Zhao-nui, <i>et al.</i> (2461)
Evolution of Extracellular Polymeric Substances of the Activated Sludge with Calcium Ion Addition During Set-up Period of Sequencing Batch Reactors	REN Li-fei, YANG Xin-ping, ZHANG Wen-wen, <i>et al.</i> (2470)
Isolation, Identification and Characterization of the Filamentous Microorganisms from Bulking Sludge	ZHANG Chong-miao, NIU Quan-rui, XU Li-mei, <i>et al.</i> (2477)
Applicability and Microbial Community Structure of Denitrification Suspended Carriers	TAN Yang, LI Ji, XU Qiao, <i>et al.</i> (2486)
Effect of Thiosulfate on the Carbon Fixation Capability of <i>Thiobacillus thioparus</i> and Its Mechanism	LI Huan, WANG Lei, WANG Ya-nan, <i>et al.</i> (2496)
Characteristics of Fungi Community Structure and Genetic Diversity of Forests in Guandi Mountains	QIAO Sha-sha, ZHOU Yong-na, CHAI Bao-feng, <i>et al.</i> (2502)
Source Apportionment of Soil Heavy Metals in City Residential Areas Based on the Receptor Model and Geostatistics	CHEN Xiu-duan, LU Xin-wei, <i>et al.</i> (2513)
Environmental Health Risk Assessment of Contaminated Soil Based on Monte Carlo Method; A Case of PAHs	TONG Rui-peng, YANG Xiao-yi, <i>et al.</i> (2522)
Influencing Mechanism of Eh, pH and Iron on the Release of Arsenic in Paddy Soil	ZHONG Song-xiong, YIN Guang-cai, CHEN Zhi-liang, <i>et al.</i> (2530)
Correlations Between Different Extractable Cadmium Levels in Typical Soils and Cadmium Accumulation in Rice	CHEN Qi, DENG Xiao, CHEN Shan, <i>et al.</i> (2538)
Remedying Effects of a Combined Amendment for Paddy Soil Polluted with Cd for Spring and Autumn Rice	CHEN Li-wei, YANG Wen-tao, GU Jiao-feng, <i>et al.</i> (2546)
Effects of Two Amendments on Remedying Garden Soil Complexly Contaminated with Pb, Cd and As	TIAN Tao, LEI Ming, ZHOU Hang, <i>et al.</i> (2553)
Sorption of Phenanthrene to Soybean and Wheat Roots and the Bioavailability of Sorbed Phenanthrene	WANG Hong-ju, LI Qian-qian, SHEN Yu, <i>et al.</i> (2561)
Effects of Dissolved Organic Matter Fractions Extracted from Humus Soil on Sorption of Benzotriazole in Brown Soil and Black Soil	YANG Ning-wei, BI Er-ping, <i>et al.</i> (2568)
Effects of Topography, Tree Species and Soil Properties on Soil Enzyme Activity in Karst Regions	LUO Pan, CHEN Hao, XIAO Kong-cai, <i>et al.</i> (2577)
Effects of Long-term Organic Amendments on Soil N ₂ O Emissions from Winter Wheat-maize Cropping Systems in the Guanzhong Plain	HAO Yao-xu, LIU Ji-xuan, YUAN Meng-xuan, <i>et al.</i> (2586)
Exposure Route of Dioxin-like Polychlorinated Biphenyls in Hair Based on Passive Sampling	YUAN Hao-dong, BAI Yao, LI Qiu-xu, <i>et al.</i> (2594)
Accumulation Characteristics and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Wild Fish Species from Diaojiang River, Guangxi	WANG Jun-neng, MA Peng-cheng, ZHANG Li-juan, <i>et al.</i> (2600)
Effect of Activated Carbon Addition on the Anaerobic Fermentation of Corn Straw in Mesophilic and Thermophilic Conditions	GAN Rong, GE Ming-min, LIU Yong-di, <i>et al.</i> (2607)
Volatile Organic Compounds (VOCs) Source Profiles of Industrial Processing and Solvent Use Emissions; A Review	WANG Hong-li, YANG Zhao-xun, JING Sheng-ao, <i>et al.</i> (2617)