

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第3期

Vol.36 No.3

2015

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

重庆市 PM _{2.5} 浓度空间分异模拟及影响因子	吴健生, 廖星, 彭建, 黄秀兰 (759)
2012~2013 年间北京市 PM _{2.5} 中水溶性离子时空分布规律及相关性分析	杨懂艳, 刘保献, 张大伟, 陈圆圆, 周健楠, 梁云平 (768)
南京地区大气 PM _{1.1} 中 OC、EC 特征及来源解析	姜文娟, 郭照冰, 刘凤玲, 芮茂凌, 石磊, 曾钢, 郭子研 (774)
太原市大气 PM _{2.5} 中碳质组成及变化特征	张桂香, 闫雨龙, 郭利利, 何秋生, 陈来国 (780)
朔州市市区 PM _{2.5} 中元素碳、有机碳的分布特征	刘凤娟, 彭林, 白慧玲, 牟玲, 刘效峰, 李丽娟, 刘欣 (787)
中国 2013 年 1 月 PM _{2.5} 重污染过程卫星反演研究	薛文博, 武卫玲, 付飞, 王金南, 韩宝平, 雷宇 (794)
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	廖晓农, 孙兆彬, 唐宜西, 蒲维维, 李梓铭, 卢冰 (801)
重庆缙云山降水中不同形态汞的含量及其沉降量	覃蔡清, 王永敏, 彭玉龙, 王定勇 (809)
海南五指山大气气态总汞含量变化特征	雷育涛, 刘明, 陈来国, 谢东海, 林道征, 赵明江, 张毅强, 孙家仁 (817)
树叶烟尘中的有机碳和元素碳	陈惠雨, 刘刚, 徐慧, 李久海, 吴丹 (824)
介质阻挡放电对氯苯的降解特性及其产物分析	姜理英, 曹书岭, 朱润晔, 陈建孟, 苏飞 (831)
长江口及浙江近岸海域表层沉积物中多环芳烃分布、来源与风险评价	母清林, 方杰, 邵君波, 张庆红, 王晓华, 黄备 (839)
河流沉积物对典型 PPCPs 的吸附特性及其影响因素	王凯, 李侃竹, 周亦圆, 刘振鸿, 薛罡, 高品 (847)
岩溶地下河表层沉积物多环芳烃的污染及生态风险研究	蓝家程, 孙玉川, 师阳, 梁作兵 (855)
岩溶地下河系统多介质中多环芳烃污染特征及来源解析	卢丽, 王喆, 裴建国 (862)
两江交汇处水体溶解性有机质的吸收和荧光光谱特征: 以渠江-嘉陵江、涪江-嘉陵江为例	闫金龙, 江韬, 高洁, 魏世强, 卢松, 刘江 (869)
三峡库区典型农业小流域土壤溶解性有机质的紫外-可见及荧光特征	王齐磊, 江韬, 赵铮, 木志坚, 魏世强, 闫金龙, 梁俭 (879)
夏、冬季降雨中溶解性有机质 (DOM) 光谱特征及来源辨析	梁俭, 江韬, 魏世强, 卢松, 闫金龙, 王齐磊, 高洁 (888)
南水北调丹江口水库原水有机物分子组成规律及其强化混凝处理的效能对比	程拓, 徐斌, 朱贺振, 夏圣骥, 楚文海, 胡广新 (898)
夏季大辽河河口区水体反硝化及其影响因素	杨丽标, 雷坤, 孟伟 (905)
太湖入湖河流溶解性有机碳来源及碳水化合物生物可利用性	叶琳琳, 吴晓东, 孔繁翔, 刘波, 闫德智 (914)
汉丰湖夏季浮游植物群落与环境因子的典范对应分析	王宇飞, 赵秀兰, 何丙辉, 黄琪 (922)
三峡蓄水期间汉丰湖消落区营养状态时间变化	黄祺, 何丙辉, 赵秀兰, 王宇飞 (928)
太湖水华期营养盐空间分异特征与赋存量估算	金颖薇, 朱广伟, 许海, 朱梦圆 (936)
贝江浮游藻类群落特征及富营养化风险分析	苟婷, 马千里, 许振成, 王丽, 李杰, 赵学敏 (946)
物理和摇蚊幼虫组合扰动对内源磷再生和形态转化的协同作用	史晓丹, 李大鹏, 王忍, 黄勇 (955)
磷限制下光照和温度对水华鱼腥藻生长动力学的影响	殷志坤, 李哲, 王胜, 郭劲松, 肖艳, 刘静, 张萍 (963)
矿物基多孔颗粒材料净化石英纯化废水研究	王恩文, 雷绍民, 张世春, 黄腾 (969)
PAA 改性纳米铁强化还原降解水中亚甲基蓝	和婧, 王向宇, 王培, 刘坤乾 (980)
微球负载双核锰配合物作为新型非均相 CWPO 催化剂对活性蓝 P-3R 的脱色应用	宋敏, 张琳萍, 钟毅, 徐红, 毛志平 (989)
生物合成施氏矿物作为类芬顿反应催化剂降解甲基橙的研究	汪快兵, 方迪, 徐峙晖, 施瑛, 郑冠宇, 周立祥 (995)
污泥厌氧产酸发酵液作碳源强化污水脱氮除磷中试研究	罗哲, 周光杰, 刘宏波, 聂新宇, 陈宇, 翟丽琴, 刘和 (1000)
高含固污泥水热预处理中碳、氮、磷、硫转化规律	卓杨, 韩芸, 程瑶, 彭党聪, 李玉友 (1006)
MBR 与 SMBR 脱氮除磷特性及膜污染控制	郭小马, 赵焱, 王开演, 赵阳国 (1013)
基质 COD 浓度对单室微生物电解池产甲烷的影响	滕文凯, 刘广立, 骆海萍, 张仁铎, 符诗雨 (1021)
天然沸石中离子交换平衡的离子特异性研究	何云华, 李航, 刘新敏, 熊海灵 (1027)
开封城市土壤重金属污染及潜在生态风险评价	李一蒙, 马建华, 刘德新, 孙艳丽, 陈彦芳 (1037)
不同种植模式对土壤团聚体及有机碳组分的影响	邱晓蕾, 宗良纲, 刘一凡, 杜霞飞, 罗敏, 汪润池 (1045)
种植花椒对喀斯特石漠化地区土壤有机碳矿化及活性有机碳的影响	张文娟, 廖洪凯, 龙健, 李娟, 刘灵飞 (1053)
江西铜矿及冶炼厂周边土壤和农作物稀土元素含量与评价	金姝兰, 黄益宗, 王斐, 徐峰, 王小玲, 高柱, 胡莹, 乔敏, 李季, 向猛 (1060)
镉与 S-异丙甲草胺对斜生栅藻的联合毒性作用	章小强, 胡晓娜, 陈彩东, 刘惠君 (1069)
高寒灌丛退化演替过程对生态系统呼吸温度敏感性的影响	李东, 罗旭鹏, 曹广民, 吴琴, 胡启武, 卓玛措, 李惠梅 (1075)
黄土高原纸坊沟流域不同植物叶片及枯落物的生态化学计量学特征研究	李鑫, 曾全超, 安韶山, 董扬红, 李娅芸 (1084)
单斜相纳米氧化钴基低温 SCR 催化剂脱硝机制研究	叶飞, 刘荣, 管昊, 贡湘君, 季凌晨 (1092)
不同有机物料中的磷形态特征研究	邓佳, 胡梦坤, 赵秀兰, 倪九派, 谢德体 (1098)
北京电动出租车与燃油出租车生命周期环境影响比较研究	施晓清, 孙赵鑫, 李笑诺, 李金香, 杨建新 (1105)
燃煤电厂排放细颗粒物的水溶性无机离子特征综述	段雷, 马子轸, 李振, 蒋靖坤, 叶芝祥 (1117)
菌根真菌金属耐性机制研究进展	陈保冬, 孙玉青, 张莘, 伍松林 (1123)
亚硝酸盐型甲烷厌氧氧化微生物特性研究进展	沈李东 (1133)
《环境科学》征订启事 (830) 《环境科学》征稿简则 (846) 信息 (838, 861, 913, 935)	

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

廖晓农^{1,2}, 孙兆彬², 唐宜西², 蒲维维², 李梓铭², 卢冰¹

(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)

摘要: 在北京地区, 有一类高污染产生在 850 hPa 以上为偏北风的背景下. 利用气象观测资料、NCEP 再分析资料和地面 PM_{2.5} 浓度监测结果分析了环境气象条件在这类污染过程形成中的作用. 结果表明, 在污染物浓度逐渐升高的过程中, 环境大气并不总是处在层结稳定状态, 有利于污染物累积的气象条件来自垂直运动和散度在垂直方向上的“分层”结构. 从地面到对流层中层, 垂直速度呈上升-下沉-上升的分布, 而且散度呈辐合-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, 上升运动则将它们送向空中. 但是, 叠置在其上空的、长时间维持的下沉气流层却阻止了污染物继续向上运动, 从而导致近地面层的污染浓度不断升高. 垂直运动出现“分层”是由于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, 冷空气太弱或者没有冷空气活动是高空偏北风不能到达近地层的主要原因. 而下沉气流层的形成则与其上空的空气辐合有关, 该辐合层源自偏北气流中的风速脉动. 因此, 环境大气动力作用是高空偏北气流型空气污染过程形成的关键机制. 关注对流层中下层温度 24 h 变化、垂直速度和散度的垂直分布将有助于提高此类高污染过程的诊断分析和预报能力.

关键词: 高空偏北气流; 高污染; 动力作用; 下沉气流层; 低层辐合; 风速脉动

中图分类号: X51 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)03-0801-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.2015.03.007

Meteorological Mechanism for the Formation of a Serious Pollution Case in Beijing in the Background of Northerly Flow at Upper Levels

LIAO Xiao-nong^{1,2}, SUN Zhao-bin², TANG Yi-xi², PU Wei-wei², LI Zi-ming², LU Bing¹

(1. Institute of Urban Meteorology, China Meteorological Administration, Beijing 100089, China; 2. Environment Meteorology Forecast Center of Beijing-Tianjin-Hebei, China Meteorological Administration, Beijing 100089, China)

Abstract: There is a kind of serious air pollution case occurring in the situation of northerly flow at the levels above 850 hPa in Beijing area. Meteorological data, NCEP reanalysis data and PM_{2.5} concentration survey were used to analyze the roles of meteorological mechanism in this kind of air pollution case. The results showed that the stable stratification did not exist all the time during the gradual increase of PM_{2.5} concentration. The favorable meteorological conditions in PM_{2.5} accumulation came from the layered structure of vertical speed and convergence in vertical direction. From the surface to the middle level of troposphere, the vertical velocity showed an updraft-downdraft-updraft distribution. And the divergence displayed a convergence-divergence-convergence structure. The convergence at lower levels led to the gathering of the polluted air from the surrounding and the ascending current brought it upwards. However, the polluted air could not go further up due to the prolonged downdraft layer above. As the result, PM_{2.5} near the surface was concentrated gradually. The vertical speed in layer structure was attributed to the high level northerly flow without invading into the boundary layer. In such case, the wind was still in southerly direction or kept calm at the surface. The weak cold air or no cold air at all was the main reason that the northerly flow could not hit the surface. The developed downdraft layer was relative to the convergence above which was resulted from the wind speed pulses in the northerly flow at upper levels. In conclusion, the air dynamical effect played a key role in the pollution type of northerly flow at upper levels. Therefore, it will be beneficial to enhance our capability in the analysis and forecasting of this kind of pollution case by focusing on 24 hours temperature variation at the middle and lower troposphere as well as the vertical distribution of vertical velocity and divergence.

Key words: northerly flow at upper levels; serious air pollution event; dynamic effect; downdraft layer; underlying convergence; wind speed pulses

大气污染与气象条件关系密切. 高污染一般出现在近低层空气流动性较差的阶段^[1~14], 而且稳定层结这种与大气热力结构有关的条件也非常重要^[15~20]. 当大气处于稳定状态时, 通常会有逆温层或等温层, 底层气块受到某种强迫后上升达到逆温层或等温层底时, 就会因存在负浮力或正浮力减小而开始减速, 并可能最终不能顺利通过稳定层. 这

样, 逆温层或等温层就对底层空气的垂直上升运动起到了“抑制”作用. 由于污染物主要聚集在地面附近, 上述“抑制”作用实际上也限制了污染物向空中

收稿日期: 2014-09-09; 修订日期: 2014-11-03

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)

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

扩散. 因此, 稳定层结是一种由大气热力学特征决定的不利于污染物垂直扩散的条件. 上述不利于污染物扩散的气象条件通常出现在特定的环流背景下. 地面形势主要有均压场、鞍型场、高压控制、高压底部、高压后部、冷锋低压等几类; 高空则多为平直的东西气流、暖高压脊、西太平洋副高边缘等^[3,15,21~33]. 当台风或热带低压靠近时, 其中心环流的近周边和远周边气流也有利于污染物的积累^[21,26]. 此外, 华北地区的污染还可以发生在槽后脊前^[32]. 然而, 目前关于污染环流型的研究多侧重于揭示其中的统计规律, 对于在某种大气环流背景下污染产生的机制也限于对“静稳”等热力条件的讨论, 却很少涉及大气在垂直方向上的动力作用.

研究表明, 整层的偏北风特别是近地面层明显的北风是北京地区重要的空气污染清除条件^[24,27,34~38]. 当近地层北风增大时, 不仅改善了水平扩散条件, 而且与北风相伴的、接地的下沉运动也会破坏之前的稳定层结. 由于目前业务数值天气预报模式输出的主要是标准等压面产品, 垂直分辨率较低, 特别是边界层内的信息非常少, 而且模式对于边界层以上高度的位势高度和风等的预报准确性高于地面, 因此预报人员习惯于根据 500~850 hPa 层次内有偏北风、850 hPa 受下沉区控制来预测近地面层的扩散条件. 然而, 在实际预报中发现, 当数值模式准确地预报了上述气象条件时, 有时空气质量预报仍然有很大偏差. 究其原因高空的北风和下沉运动并没有到达近地层, 地面的扩散条件未改善, 从而导致污染物浓度仍然维持在较高的水平, 这是一类发生在高空偏北风背景下的污染. 统计表明, 2005 年以来北京地区此类重污染占 9.7%. 本研究遴选了发生在 2013 年 3 月的典型个例, 利用常规气象观测资料、NCEP 再分析资料和地面 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度监测结果通过分析细颗粒物浓度增长过程中对流层中下层垂直速度、散度等的垂直结构, 揭示了环境大气的动力作用对污染物积累的作用, 并且讨论了这种动力因素形成的机制. 最后, 给出了高空偏北气流背景下高污染过程形成机制的概念模型. 本研究表明加强对大气垂直动力结构的分析、进一步丰富数值模式对流层中下层特别是边界层的预报信息, 将有助于提高空气质量预报的准确性.

1 个例与资料

1.1 个例

遴选个例的标准: 北京地区 500 hPa 为偏北气

流控制, 而且北风区至少向下伸展到 700 hPa 以下, 近地面层则是偏南风或者风速小于 $2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的弱风, 上述形势维持 48 h 以上. 其间, 地面 $\text{PM}_{2.5}$ 最大日均浓度超过 $115 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 小时平均浓度峰值超过 $200 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. 本研究普查了 2005 年以来 $\text{PM}_{2.5}$ 日均浓度和气象资料, 其中符合上述标准的污染过程共 14 个(49 d), 本研究将出现在 2013 年 3 月 13~15 日的污染过程作为主要分析对象.

1.2 资料

考虑到温湿风廓线的分辨率, 本研究采用 6 h 间隔、水平分辨率为 1° 、垂直分辨率为 25~50 hPa 的 NCEP 再分析资料、地面观测和气象探空等资料来研究相关的气象条件, 并取 116°E , 40°N 格点代表北京. 由于此次污染事件主要发生在平原地区, 因此选择了海淀区的宝联、朝阳、大兴这 3 个监测站为代表考察细颗粒物浓度. 对比分析表明, 3 个监测站 $\text{PM}_{2.5}$ 小时平均浓度变化趋势一致, 浓度值相近. 为了与 NCEP 再分析资料格点匹配, 本研究选择大兴站的细颗粒物浓度表征污染的程度和演变情况.

2 污染过程的大气动力结构及形成机制

2.1 污染物浓度的演变特征

污染过程主要发生在 2013 年 3 月 13 日入夜以后(图 1). 13 日 20:00~14 日 02:00 细颗粒物浓度在 6 h 内增加了 $50 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 左右, 最大小时平均浓度接近 $100 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的第二个峰值出现在 14 日 14:00, 为 $116 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. 14 日 20:00 后, 浓度迅速上升, 并在 15 日 14:00 达到最高值 $267 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. 15 日 14:00~20:00 浓度下降. 可将此次高污染过程细颗粒物浓度的演变特点概括为: 呈波动式上升, 中后期陡增; 有 3 个峰值, 最后一个峰值也是浓度的最大值.

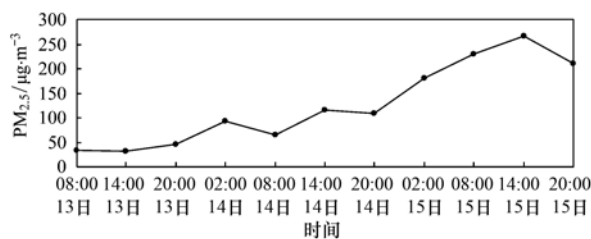
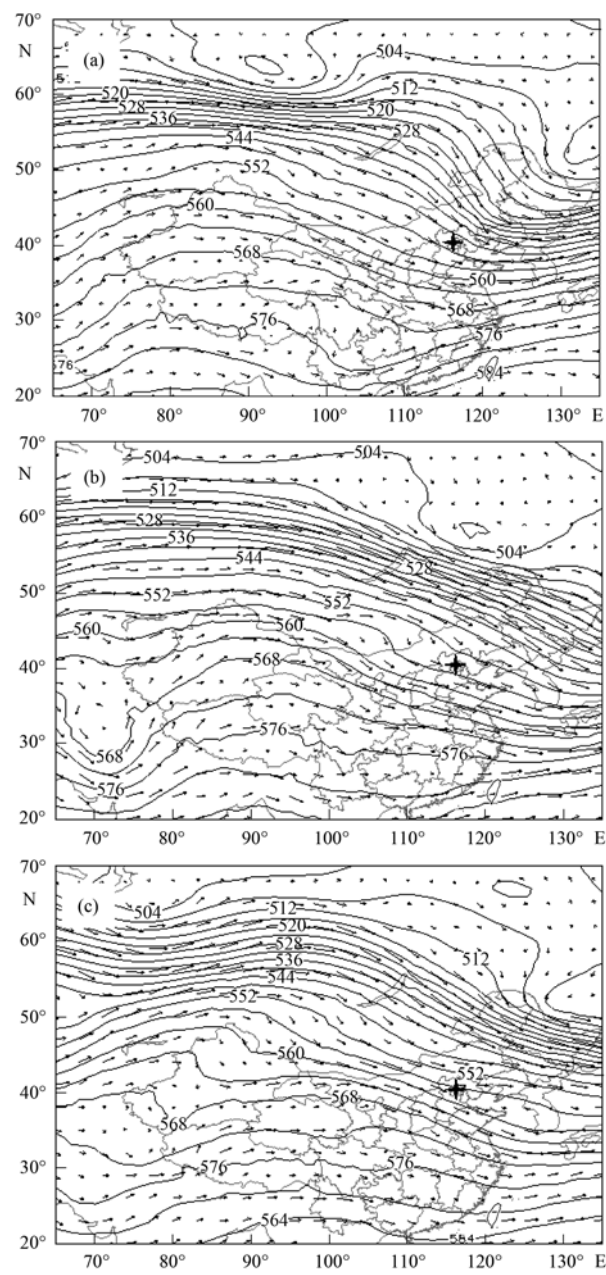


图 1 2013 年 3 月 13~15 日 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度时序

Fig. 1 Time series of the $\text{PM}_{2.5}$ concentration from March 13 to 15, 2013

2.2 高空大气环流背景

高污染产生在高空偏北气流背景下(图 2). 13 日 08:00 亚欧中纬度地区为一槽一脊型, 脊线在



(a)2013 年 3 月 13 日 08:00; (b)2013 年 3 月 14 日 08:00;
(c)2013 年 3 月 15 日 08:00; 十字星指示北京的位置

图 2 500 hPa 环流形势图

Fig. 2 Weather charts of 500 hPa

表 1 2013 年 3 月 13 日 08:00 ~ 15 日 20:00 北京 500 hPa 和 700 hPa 高度上的温度/℃

Table 1 Temperature of 500 hPa and 700 hPa in Beijing from 08:00 BLT on Mar. 13 to 20:00 BLT on Mar. 15, 2013/℃

高度/hPa	13 日 08:00	13 日 14:00	13 日 20:00	14 日 02:00	14 日 08:00	14 日 14:00	14 日 20:00	15 日 02:00	15 日 08:00	15 日 14:00	15 日 20:00
500	-27.3	-28.2	-28.5	-28.1	-27.7	-27.1	-26.0	-23.8	-23.3	-21.9	-21.3
700	-11.2	-11.3	-10.2	-10.8	-10.1	-8.8	-8.4	-7.2	-7.9	-7.0	-6.1

表 2 高空西北风下污染过程不同高度平均 24 h 变温/℃

Table 2 The 24 hours average temperature variation at different heights in the typical pollution cases/℃

高度/hPa	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
500	-1.1	1.8	1.4	0.1	1.9	0.6	0.9	1.6	-1.5	-3.1	1.8	2.4	5.0
700	0.5	2.7	1.6	-0.9	1.1	1.2	0.0	1.4	-0.6	-2.5	1.2	1.6	4.3
850	1.0	-0.2	1.2	0.1	0.8	1.7	0.2	0.0	0.8	1.1	2.8	2.5	4.8
925	1.1	0.2	0.8	0.4	1.0	2.5	0.1	0.1	0.5	1.3	0.5	1.1	3.1

85°E 附近,槽控制着中国东北地区,北京上空为槽后西北气流. 14 日 08:00 脊线东移到 95°E,中国东北也脱离了高空槽的影响,东部大部分地区 500 hPa 都是西北风. 24 h 后,110°E 以东、40°~55°N 范围内的环流形势没有明显改变. 700 hPa 的位势高度分布和风场与 500 hPa 相近(图略). 因此,在污染累积的过程中,700~500 hPa 层次内盛行西北风.

高空为深厚的西北气流一般出现在冷气团中,而在冷气团控制下的扩散条件通常良好,那么为何还会出现高污染呢? 从北京上空水平风的垂直分布可知(图 3),西北风只向下影响到 800 hPa 左右的高度,800~1 000 hPa 基本上是偏南风或者为风速在 $1\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的东风和东北风. 因此,高空的西北风没有“接地”是本文分析的个例污染物浓度能够逐渐升高的重要环境气象因素,这是一类不同于以往研究成果的污染过程.

为了分析西北风没有“接地”的原因,分别考察了 500 hPa 和 700 hPa 的温度(表 1). 在 500 hPa 高度上,13 日 08:00~20:00 温度降低了 $1.2\text{ }^{\circ}\text{C}$,说明该期间有冷空气沿着西北气流南下. 但是,700 hPa 的温度波动却只有 $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$,冷空气的影响已经很弱. 此后,500 hPa 的温度一直在上升,而且 700 hPa 也基本如此. 从图 2 可以看到,13 日北京位于等高线的密集带边缘,还没有完全脱离冷空气的影响,而 14 日和 15 日 $120^{\circ}\sim 130^{\circ}\text{E}$ 范围内的密集带已经移到 45°N 以北,北京从槽后转为脊前,说明西北气流的性质发生了转变.

对 2005 年以来另外 13 个相似污染过程几个层次 24 h 变温平均值的分析表明(表 2),边界层内只有 1 个个例为负变温,其余 12 个均是正变温,而且 700 hPa 和 500 hPa 也多为正变温. 尽管个例 9 和个例 10 在对流层中上层都有明显的负变温,但是冷空气没有侵入到边界层内. 因此,尽管高空是偏北风,

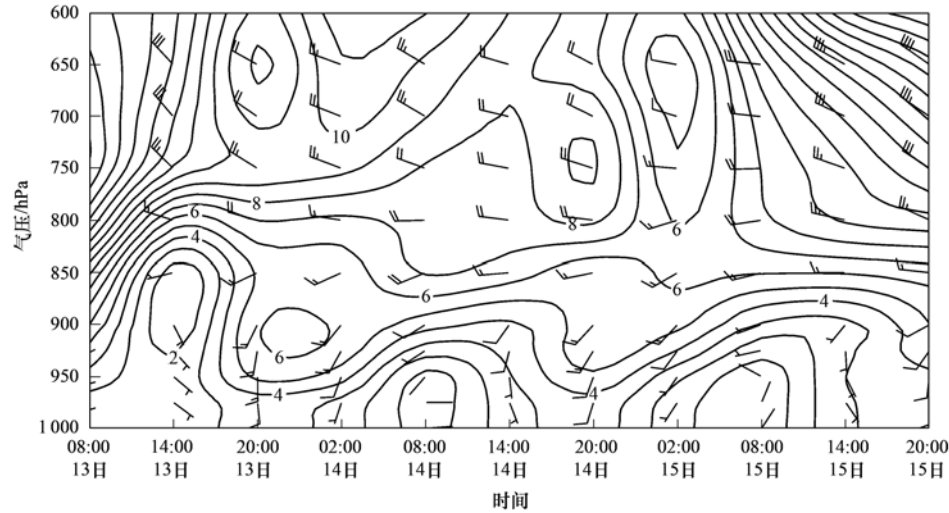


图 3 2013 年 3 月 13 日 08:00 ~ 15 日 20:00 北京上空水平风时间-气压图

Fig. 3 Time series of the wind in Beijing from 08:00 BLT on Mar. 13 to 20:00 BLT on Mar. 15, 2013

但是由于高空西北气流不具有冷的特征或者对应的冷空气势力太弱不能侵入到对流层底层,才出现了高空是西北风而边界层内却是偏南风或弱风的情况,从而导致地面附近的细颗粒物能够逐渐累积并最终出现高污染。

2.3 决定污染物浓度变化的关键气象条件

地面长时间维持低于 $2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的弱风是一种不

利于污染物水平扩散的气象条件. 在本研究分析的污染过程中,尽管 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度上升期间的有些时次地面风速的确较小,有利于污染物的累积,但是在 14 日 14:00 和 15 日 14:00 浓度出现峰值时地面的南风分别达到 $6\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 和 $3\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (表 3),说明在此次污染过程中地面扩散条件起了一定的作用,但是还应该有其他的影响因素。

表 3 2013 年 3 月 13 日 08:00 ~ 15 日 20:00 北京观象台地面风速

Table 3 Surface wind speed at ancient observatory of Beijing from 08:00 BLT on Mar. 13 to 20:00 BLT on Mar. 15, 2013

项目	13 日 08:00	13 日 14:00	13 日 20:00	14 日 02:00	14 日 08:00	14 日 14:00	14 日 20:00	15 日 02:00	15 日 08:00	15 日 14:00	15 日 20:00
风向	东北	东北	南	西南	东北	西南	西南	东南	东北	南	东南
风速/ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	4	3	2	2	2	6	2	1	1	3	1

多数研究者认为逆温层的存在是阻止污染物垂直扩散的必要条件. 此外,夏季在没有逆温层的情况下,当大气处于对流性稳定状态时,也会导致污染物在近地面层累积^[39]. 然而,本文分析的污染过程环境大气的垂直稳定性特征并不十分明显(图 4). 13 ~ 15 日期间早晨 08:00 前后有逆温,但是持续时间短,与污染物浓度持续上升没有很好的对应关系,多数时段边界层内大气处于静力不稳定状态. 而且,由于 3 月属于北京地区的春季,低层大气湿度小,与夏季有本质差别,因此讨论对流抑制能量没有意义. 所以,基于经典的、由热力作用形成稳定层结导致污染加重的理论不能完全解释本文分析的污染个例。

对 2013 年 3 月 13 ~ 16 日垂直速度分布特征的分析表明,污染物浓度上升与垂直速度的分布有关(图 5). 13 日 14:00 在 790 ~ 660 hPa 层内有一个下沉气流层,此后其下边界下降至 880 hPa 高度附近,

并基本稳定. 下沉气流层的上、下是上升运动,与发生在台风外围下沉气流中的高污染不同^[40]. 而且,14 日 02:00、14 日 14:00 和 15 日 14:00 地面附近分别有上升速度中心,其中以 15 日 14:00 最强,达到 $-0.7\text{ Pa}\cdot\text{s}^{-1}$. 上述 3 个时次也正是高污染过程 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的峰值出现的时刻,而且浓度水平与上升运动的强度正相关. 近地面层的上升运动则是由地面辐合产生的(图 6),即浓度上升与地面气流辐合有关。

垂直速度和散度的上述分布导致污染物累积的主要原因在于:一般来讲,细颗粒物主要分布在近地面层^[41~44],因此源自地面的上升气流会将它们送向空中,使得地面附近的浓度降低. 在浓度一定的前提下,上升气流越深厚,则垂直扩散效果越好. 而图 5 中的下沉气流层起到了抑制底层上升气流向上伸展的作用,它将污染物“抑制”在大气的低层,而且在

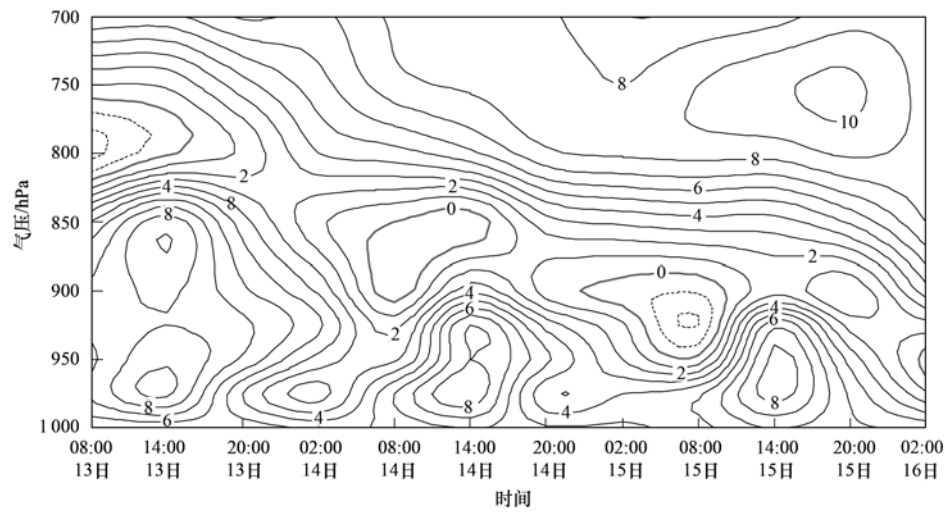


图4 2013年3月13日~16日北京的 dt/dp 时间-气压图

Fig. 4 Time series variation of the vertical structure of temperature inversion in Beijing from Mar. 13 to 16, 2013

污染过程初期下沉层的下边界明显降低,大气的容量体积减小,导致单位体积内的污染物浓度增大.观测表明,13~16日北京周边也有污染,因此地面的气流辐合同时也是污染物的汇集,这就是细颗粒物浓度峰值与地面辐合有较好的对应关系的原因.此外,空中的下沉中心与近地面层的上升中心基本上是成对的(图5),即强的上升气流上空往往有强的下沉气流,该特点在15日14:00表现得最为清晰.因此,尽管地面辐合加强导致上升速度加大,但是由于空中的下沉气流也同时加强,“压制力”加大,上升气流和下沉气流的这种动态平衡使得垂直速度的结构得以维持,从而有利于污染物的不断累积.15日20:00,下沉层消失,PM_{2.5}浓度降低.上述分析表

明,垂直速度呈现分层结构和近地面层辐合加强等环境大气的动力作用是决定本研究的高污染过程细颗粒物浓度的关键气象因素.

2.4 导致垂直速度出现分层结构的机制讨论

通常,下沉气流与冷空气活动密切相关.但是,在本研究中下沉层维持期间700 hPa及以下并没有明显的冷空气活动,温度呈现上升趋势.而且,下沉层内有气流辐散(图6),在其上方750~600 hPa是一个辐合层.14日和15日的02:00~14:00分别有辐合中心,15日14:00在650 hPa高度上的辐合最强.根据质量连续定理,当某气层内出现辐合时就会导致空气的垂直运动,从而达到新的质量平衡.因此,790~660 hPa出现下沉层与其上方空气辐合有

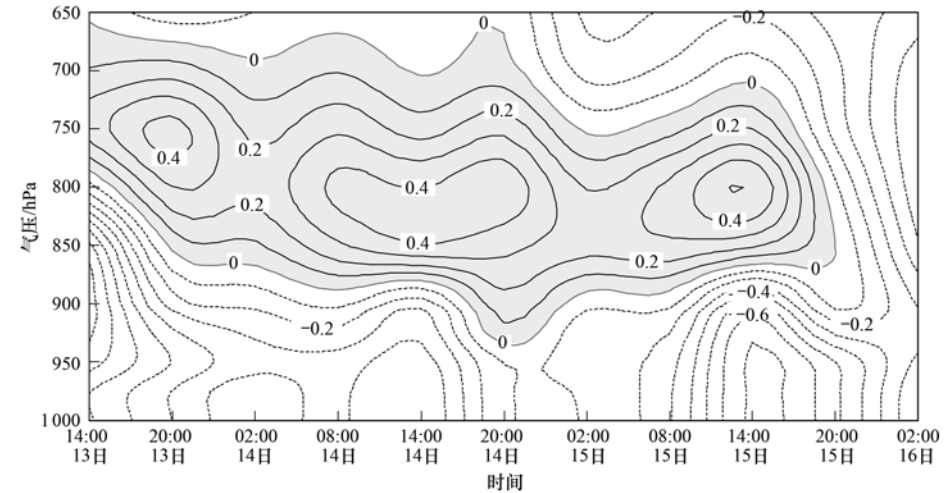
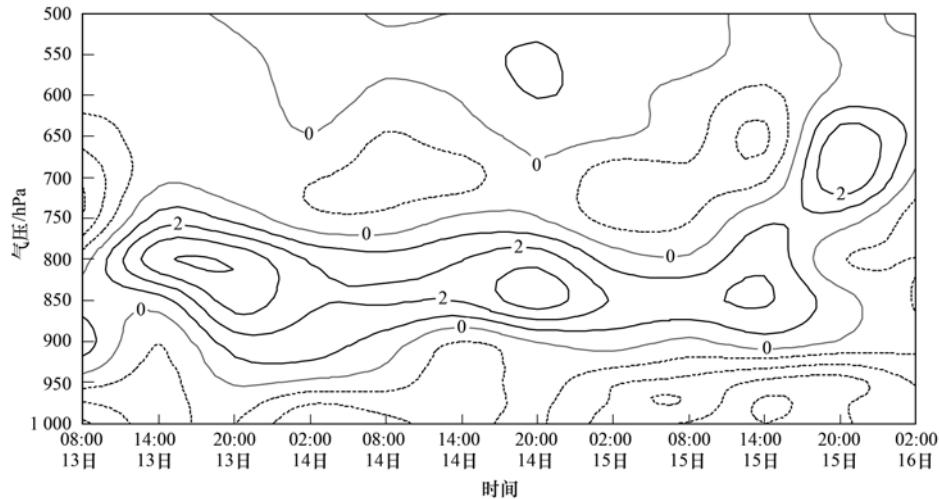


图5 2013年3月13日~16日北京的垂直速度时间-气压

Fig. 5 Time series variation of the vertical velocity in Beijing from Mar. 13 to 16, 2013



图中负值表示辐合,单位: $\times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$

图 6 2013 年 3 月 13 日 ~ 16 日北京的散度时间-气压

Fig. 6 Time series variation of the divergence in Beijing from Mar. 13 to 16, 2013

14:00 下沉速度最大可能是 650 hPa 高度上辐合最强的结果. 15 日 20:00 以后散度的垂直分布特征发生了变化, 辐合层从地面一直伸展到 700 hPa, 700 hPa 以上则转为辐散, 下沉层形成的条件不再存在. 因此, 垂直速度分层与冷暖空气活动没有密切的关系, 而是空气动力作用的结果.

为了分析空中辐合形成的机制, 计算了 700 ~

600 hPa 北京以及上游两个格点 (115°E , 40°N 和 115°E , 41°N) 的平均风速 (图 7). 13 ~ 16 日, 尽管从温度变化中看不到冷空气活动的迹象, 但是偏北气流中仍然有风速的脉动, 它反映的是具有高动量的空气的运动特征. 当空中风速出现脉动时, 上游的风速会大于北京, 于是明显的辐合就出现在每次风速的脉动之后.

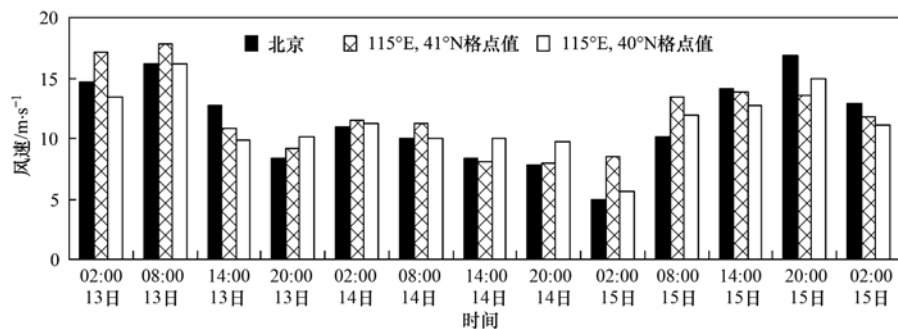


图 7 2013 年 3 月 13 日 ~ 16 日 700 ~ 600 hPa 层内平均风速时序

Fig. 7 Time series variation of the average wind speed between 700 hPa and 600 hPa from Mar. 13 to 16, 2013

2.5 概念模型

根据上述分析得到了高空偏北风背景下高污染过程的形成机制概念模型 (图 8): 边界层顶以上是深厚的西北风, 边界层内为偏南气流或风速小于 $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的弱风. 垂直运动呈现分层结构, 边界层顶到 700 hPa 之间有下沉气流层, 它阻止了底层的污染物向高空扩散, 同时近地面层为辐合上升, 气流辐合导致周边地区的污染物向本地聚集, 上述配置长时间维持为高污染创造了关键的环境气象条件. 下沉层的上空是一个辐合层, 该层次内的气流辐合在其下

方的下沉层形成中起了关键性的作用. 西北风带中的速度脉动是导致该层次内产生辐合的机制. 因此, 这是一类主要由空气的动力作用而形成的高污染.

3 讨论

本研究针对发生在北京地区的一类不同于以往研究结果的污染过程展开了讨论. 由于在污染物累积的过程中底层盛行偏南风, 而河北省中南部是我国污染比较严重的地区之一, 因此除环境大气的动力作用外, 污染物的区域输送也可能是浓度上升的

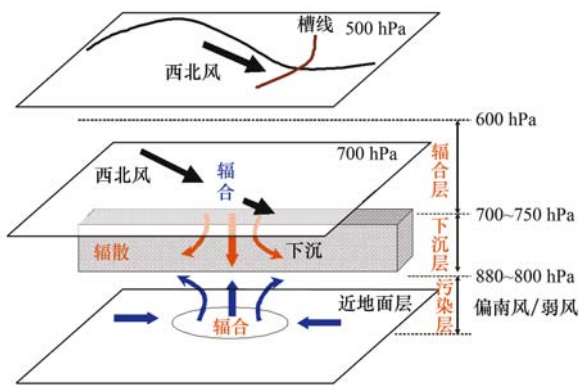


图8 偏北风背景下高污染形成机制概念模型

Fig. 8 Conceptual model of the pollution formation mechanism in the background of north flow

原因之一。然而,依靠观测资料分析却很难将两者的作用完全剥离,需要通过数值模拟试验来做进一步的研究。

4 结论

(1)2005 年以来,北京地区的高污染日中产生在高空偏北风背景下的占 9.7%。环境大气的动力作用是此类污染过程的关键影响因素。本研究表明,尽管在污染物累积的过程中没有明显的逆温层,但是对流层中下层空气的垂直运动呈现上升-下沉-上升、散度呈辐合-辐散-辐合的“分层”结构,中间的下沉气流层阻止了底层因空气辐合而不断累积的污染物的垂直向上扩散,其作用与逆温层类似。当该动力结构长时间维持并且下沉层底部高度呈现逐渐下降趋势,就为形成重污染创造了条件。

(2)空气垂直运动分层结构形成的机制之一在于高空的偏北风没有侵入边界层,近地面层维持偏南风或者小风。此种情况一般出现在冷空气势力弱或北京脱离冷空气影响转入高压脊前西北气流控制。地面 ~850 hPa 为正变温是重要的预报判据。

(3)对污染物累积起着关键作用的下沉气流层也是大气动力作用的结果。在下沉层的上方是一个因风速脉动而形成的辐合层,根据质量连续原理空气的辐合必然产生垂直运动,因此下沉层的形成正是这种垂直运动的体现。

参考文献:

- [1] 吴兑,廖碧婷,吴晨,等. 2010 年广州亚运会期间灰霾天气分析[J]. 环境科学学报,2012,32(3):521-527.
- [2] 刘咸德,李军,赵越,等. 北京地区大气颗粒物污染的风向因素研究[J]. 中国环境科学,2010,30(1):1-6.
- [3] 杨欣,陈义珍,刘厚凤,等. 北京 2013 年 1 月连续强霾过程的污染特征及成因分析[J]. 中国环境科学,2013,34(2):282-

288.

- [4] 王莉莉,王跃思,吉东升,等. 天津滨海新区秋冬季大气污染特征分析[J]. 中国环境科学,2011,31(7):1077-1086.
- [5] 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(1):113-126.
- [6] 谢付莹,王自发,王全喜. 2008 年奥运会期间北京地区 PM₁₀ 污染天气形势和气象条件特征研究[J]. 气候环境研究,2010,15(5):584-594.
- [7] 吴蒙,范绍佳,吴兑,等. 广州地区灰霾与清洁天气变化特征及影响因素分析[J]. 中国环境科学,2013,32(8):1409-1415.
- [8] 隋珂珂,王自发,杨军,等. 北京 PM₁₀ 持续污染及与常规气象要素关系[J]. 环境科学研究,2007,20(6):77-82.
- [9] 陈敏,马雷鸣,魏海平,等. 气象条件对上海世博会期间空气质量影响[J]. 应用气象学报,2013,24(12):140-150.
- [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(自然科学版),2011,50(6):130-134.
- [11] 朱佳雷,王体健,邢莉,等. 江苏省一次重霾污染天气的特征和机理分析[J]. 中国环境科学,2011,31(12):1943-1950.
- [12] 邓利群,钱俊,廖瑞雪,等. 2009 年 8~9 月成都市颗粒物污染及其与气象条件的关系[J]. 中国环境科学,2012,32(8):1433-1438.
- [13] 李颖敏,范绍佳,张人禾. 2008 年秋季珠江三角洲污染气象分析[J]. 中国环境科学,2011,31(10):1585-1591.
- [14] 刘晓慧,朱彬,王红磊,等. 北京大气颗粒物数浓度粒径分布特征及与气象条件的相关性[J]. 中国环境科学,2012,33(7):1153-1159.
- [15] 王丛梅,范引琪,张海霞. 京津冀采暖季大气污染天气特征[J]. 气象科技,2010,38(6):689-694.
- [16] 高健,张岳翀,王淑兰,等. 北京 2011 年 10 月连续灰霾过程的特征与成因初探[J]. 环境科学研究,2012,25(11):1201-1207.
- [17] 李霞,杨静,麻军,等. 乌鲁木齐重污染日的天气分型和边界层结构特征研究[J]. 高原气象,2012,31(5):1414-1423.
- [18] 龙时磊,曾建荣,刘可,等. 逆温层在上海市空气颗粒物积聚过程中的作用[J]. 环境科学与技术,2013,36(S1):104-109.
- [19] 殷达中,洪钟祥. 北京地区严重污染状况下的大气边界层结构与参数研究[J]. 气候与环境研究,1999,4(3):303-307.
- [20] 段凤魁,贺克斌,马永亮. 北京 PM_{2.5} 多种环芳烃的污染特征及来源研究[J]. 环境科学学报,2009,29(7):1363-1371.
- [21] 任阵海,苏福庆,陈朝晖,等. 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,2008,32(4):741-751.
- [22] 王明洁,张蕾,陈垣昭,等. 大运会期间深圳重度灰霾天气特征及环流形势[J]. 广东气象,2010,32(3):5-8.
- [23] 苏福庆,杨明珍,钟继红,等. 华北地区天气型对区域大气污染的影响[J]. 环境科学研究,2004,17(3):16-20.
- [24] 范青,程水源,苏福庆,等. 北京夏季典型环境污染过程个例分析[J]. 环境科学研究,2007,20(5):12-19.
- [25] 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.

- [26] 王全喜,齐彦斌,王自发,等. 造成北京 PM_{10} 重污染的二类典型天气形势[J]. 气候与环境研究,2007,12(1):81-86.
- [27] 孟燕军,程从兰. 影响北京大气污染物变化的天气形势分析[J]. 气象,2002,28(4):42-47.
- [28] 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.
- [29] 王宏,冯宏芳,隋平,等. 福州市灰霾气象要素场特征分析[J]. 气象科技,2009,37(6):670-675.
- [30] 王建国,王业宏,盛春岩,等. 济南市霾气候特征分析及其与地面形势的关系[J]. 热带气象学报,2008,24(3):303-306.
- [31] 邓雪娇,黄坚,吴兑,等. 深圳地区典型带污染过程分析[J]. 中国环境科学,2006,26(suppl.):7-11.
- [32] 王莉莉,王跃思,王迎红,等. 北京夏末秋初不同天气形势对大气污染浓度的影响[J]. 中国环境科学,2010,30(7):924-930.
- [33] 杨欣,陈义珍,刘厚凤,等. 北京2013年1月连续强霾过程的污染特征及成因分析[J]. 中国环境科学,2013,34(2):282-288.
- [34] 徐晓峰,李青春,张小玲. 北京一次局地重污染过程气象条件分析[J]. 气象科技,2005,33(6):543-547.
- [35] 蒲维维,赵秀娟,张小玲. 北京地区夏末秋初气象要素对 $\text{PM}_{2.5}$ 污染的影响[J]. 应用气象学报,2011,22(6):716-723.
- [36] 张晓勇,张裕芬,冯银厂,等. 天气类型对天津大气 PM_{10} 污染的影响分析[J]. 环境科学研究,2010,23(9):1115-1121.
- [37] 杨素英,赵秀勇,刘宁微. 北京秋季一次重污染天气过程的成因分析[J]. 气象与环境学报,2010,26(5):13-16.
- [38] 周兆媛,张时煌,高庆先,等. 京津冀地区气象要素对空气质量的影响及未来变化趋势分析[J]. 资源科学,2014,36(1):191-199.
- [39] 廖晓农,张小玲,王迎春,等. 北京地区冬夏季持续性雾-霾发生的环境气象条件对比分析[J]. 环境科学,2013,35(6):2031-2044.
- [40] 夏冬,吴志权,莫伟强,等. 一次热带气旋外围下沉气流造成的珠三角地区连续灰霾天气过程分析[J]. 气象,2013,39(6):759-767.
- [41] 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.
- [42] 徐婷婷,秦艳,耿福海,等. 环上海地区干霾气溶胶垂直分布的季节变化特征[J]. 环境科学,2012,33(7):2165-2171.
- [43] 陈鹏飞,张蔷,权建农,等. 北京地区3 500 m 高空内污染物的时空分布特征[J]. 中国环境科学,2012,32(10):1729-1735.
- [44] 刘琼,耿福海,陈永航,等. 上海不同强度干霾期间气溶胶垂直分布特征[J]. 中国环境科学,2012,32(2):207-213.

CONTENTS

Simulation and Influencing Factors of Spatial Distribution of PM _{2.5} Concentrations in Chongqing	WU Jian-sheng, LIAO Xing, PENG Jian, <i>et al.</i> (759)
Correlation, Seasonal and Temporal Variation of Water-soluble Ions of PM _{2.5} in Beijing During 2012-2013	YANG Dong-yan, LIU Bao-xian, ZHANG Da-wei, <i>et al.</i> (768)
Characteristics and Sources Apportionment of OC and EC in PM _{1.1} from Nanjing	JIANG Wen-juan, GUO Zhao-bing, LIU Feng-ling, <i>et al.</i> (774)
Composition and Variation Characteristics of Atmospheric Carbonaceous Species in PM _{2.5} in Taiyuan, China	ZHANG Gui-xiang, YAN Yu-long, GUO Li-li, <i>et al.</i> (780)
Characteristics of Organic Carbon and Elemental Carbon in PM _{2.5} in Shouzhou City	LIU Feng-xian, PENG Lin, BAI Hui-ling, <i>et al.</i> (787)
Satellite Retrieval of a Heavy Pollution Process in January 2013 in China	XUE Wen-bo, WU Wei-ling, FU Fei, <i>et al.</i> (794)
Meteorological Mechanism for the Formation of a Serious Pollution Case in Beijing in the Background of Northerly Flow at Upper Levels	LIAO Xiao-nong, SUN Zhao-bin, TANG Yi-xi, <i>et al.</i> (801)
Concentrations and Deposition Fluxes of Different Mercury Species in Precipitation in Jinyun Mountain, Chongqing	QIN Cai-qing, WANG Yong-min, PENG Yu-long, <i>et al.</i> (809)
Variation Characteristics of Total Gaseous Mercury at Wuzhi Mountain (Wuzhishan) Background Station in Hainan	LEI Yu-tao, LIU Ming, CHEN Lai-guo, <i>et al.</i> (817)
Organic and Element Carbon in Foliar Smoke	CHEN Hui-yu, LIU Gang, XU Hui, <i>et al.</i> (824)
Analysis of Characteristics and Products of Chlorobenzene Degradation with Dielectric Barrier Discharge	JIANG Li-ying, CAO Shu-ling, ZHU Run-ye, <i>et al.</i> (831)
Distribution, Sources and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Surface Sediments of Yangtze Estuary and Zhejiang Coastal Areas	MU Qing-lin, FANG Jie, SHAO Jun-bo, <i>et al.</i> (839)
Adsorption Characteristics of Typical PPCPs onto River Sediments and Its Influencing Factors	WANG Kai, LI Kan-zhu, ZHOU Yi-yuan, <i>et al.</i> (847)
Contamination and Ecological Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Surface Sediment in Karst Underground River	LAN Jia-cheng, SUN Yu-chuan, SHI Yang, <i>et al.</i> (855)
Contamination Characteristics and Source Analysis of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Multimedum in Karst Underground River	LU Li, WANG Zhe, PEI Jian-guo (862)
Characteristics of Absorption and Fluorescence Spectra of Dissolved Organic Matter from Confluence of Rivers; Case Study of Qujiang River-Jialing River and Fujiang River-Jialing River	YAN Jin-long, JIANG Tao, GAO Jie, <i>et al.</i> (869)
Ultraviolet-Visible (UV-Vis) and Fluorescence Spectral Characteristics of Soil Dissolved Organic Matter (DOM) in Typical Agricultural Watershed of Three Gorges Reservoir Region	WANG Qi-lei, JIANG Tao, ZHAO Zheng, <i>et al.</i> (879)
Absorption and Fluorescence Characteristics of Dissolved Organic Matter (DOM) in Rainwater and Sources Analysis in Summer and Winter Season	LIANG Jian, JIANG Tao, WEI Shi-qiang, <i>et al.</i> (888)
Composition of NOM in Raw Water of Danjiangkou Reservoir of South-to-North Water Diversion Project and Comparison of Efficacy of Enhanced Coagulation	CHENG Tuo, XU Bin, ZHU He-zhen, <i>et al.</i> (898)
Denitrification in Water of Daliao River Estuary in Summer and the Effect of Environmental Factors	YANG Li-biao, LEI Kun, MENG Wei (905)
Sources of Dissolved Organic Carbon and the Bioavailability of Dissolved Carbohydrates in the Tributaries of Lake Taihu	YE Lin-lin, WU Xiao-dong, KONG Fan-xiang, <i>et al.</i> (914)
Canonical Correspondence Analysis of Summer Phytoplankton Community and Its Environmental Factors in Hanfeng Lake	WANG Yu-fei, ZHAO Xiu-lan, HE Bing-hui, <i>et al.</i> (922)
Temporal Variation of Trophic Status in Drawdown Area of Hanfeng Lake in the Storage Period of Three Gorges Reservoir in China	HUANG Qi, HE Bing-hui, ZHAO Xiu-lan, <i>et al.</i> (928)
Spatial Distribution Pattern and Stock Estimation of Nutrients During Bloom Season in Lake Taihu	JIN Ying-wei, ZHU Guang-wei, XU Hai, <i>et al.</i> (936)
Phytoplankton Community Structure and Eutrophication Risk Assessment of Beijiang River	GOU Ting, MA Qian-li, XU Zhen-cheng, <i>et al.</i> (946)
Synergistic Effect of Physical and <i>Chironomus plumosus</i> Combined Disturbance on Regeneration and Transformation of Internal Phosphorus	SHI Xiao-dan, LI Da-peng, WANG Ren, <i>et al.</i> (955)
Effect of Light and Temperature on Growth Kinetics of <i>Anabaena flosaquae</i> Under Phosphorus Limitation	YIN Zhi-kun, LI Zhe, WANG Sheng, <i>et al.</i> (963)
Purification of the Wastewater of Quartz Processing by Mineral-based Porous Granulation Material	WANG En-wen, LEI Shao-min, ZHANG Shi-chun, <i>et al.</i> (969)
Enhanced Reductive Decoloration of Methylene Blue by Polyacrylic Acid Modified Zero-valent Iron Nanoparticles	HE Jing, WANG Xiang-yu, WANG Pei, <i>et al.</i> (980)
Decolorization of Reactive Blue P-3R with Microsphere-supported Binuclear Manganese Complex as a Novel Heterogeneous CWPO Catalyst	SONG Min, ZHANG Lin-ping, ZHONG Yi, <i>et al.</i> (989)
Biosynthetic Schwertmannite as Catalyst in Fenton-like Reactions for Degradation of Methyl Orange	WANG Kuai-bing, FANG Di, XU Zhi-hui, <i>et al.</i> (995)
Enhanced Nitrogen and Phosphorus Removal of Wastewater by Using Sludge Anaerobic Fermentation Liquid as Carbon Source in a Pilot-scale System	LUO Zhe, ZHOU Guang-jie, LIU Hong-bo, <i>et al.</i> (1000)
Transformation Characteristics of Carbon, Nitrogen, Phosphorus and Sulfur During Thermal Hydrolysis Pretreatment of Sludge with High Solid Content	ZHUO Yang, HAN Yun, CHENG Yao, <i>et al.</i> (1006)
Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Removal and Control of Membrane Fouling in MBR and SMBR	GUO Xiao-ma, ZHAO Yan, WANG Kai-yan, <i>et al.</i> (1013)
Influence of Substrate COD on Methane Production in Single-chambered Microbial Electrolysis Cell	TENG Wen-kai, LIU Guang-li, LUO Hai-ping, <i>et al.</i> (1021)
Ion Specificity During Ion Exchange Equilibrium in Natural Clinoptilolite	HE Yun-hua, LI Hang, LIU Xin-min, <i>et al.</i> (1027)
Assessment of Heavy Metal Pollution and Potential Ecological Risks of Urban Soils in Kaifeng City, China	LI Yi-meng, MA Jian-hua, LIU De-xin, <i>et al.</i> (1037)
Effects of Different Cultivation Patterns on Soil Aggregates and Organic Carbon Fractions	QIU Xiao-lei, ZONG Liang-gang, LIU Yi-fan, <i>et al.</i> (1045)
Effects of Chinese Prickly Ash Orchard on Soil Organic Carbon Mineralization and Labile Organic Carbon in Karst Rocky Desertification Region of Guizhou Province	ZHANG Wen-juan, LIAO Hong-kai, LONG Jian, <i>et al.</i> (1053)
Rare Earth Elements Content in Farmland Soils and Crops of the Surrounding Copper Mining and Smelting Plant in Jiangxi Province and Evaluation of Its Ecological Risk	JIN Shu-lan, HUANG Yi-zong, WANG Fei, <i>et al.</i> (1060)
Combined Toxicity of Cadmium and S-metolachlor to <i>Scenedesmus obliquus</i>	ZHANG Xiao-qiang, HU Xiao-na, CHEN Cai-dong, <i>et al.</i> (1069)
Effect of Degradation Succession Process on the Temperature Sensitivity of Ecosystem Respiration in Alpine <i>Potentilla fruticosa</i> Scrub Meadow	LI Dong, LUO Xu-peng, CAO Guang-min, <i>et al.</i> (1075)
Ecological Stoichiometric Characteristics in Leaf and Litter Under Different Vegetation Types of Zhifanggou Watershed on the Loess Plateau, China	LI Xin, ZENG Quan-chao, AN Shao-shan, <i>et al.</i> (1084)
Denitration Mechanism of Monoclinic-phase Nano Zirconium Oxide-based Catalysts	YE Fei, LIU Rong, GUAN Hao, <i>et al.</i> (1092)
Characterization of Phosphorus Forms in Different Organic Materials	DENG Jia, HU Meng-kun, ZHAO Xiu-lan, <i>et al.</i> (1098)
Comparative Life Cycle Environmental Assessment Between Electric Taxi and Gasoline Taxi in Beijing	SHI Xiao-qing, SUN Zhao-xin, LI Xiao-nuo, <i>et al.</i> (1105)
Characteristics of Water Soluble Inorganic Ions in Fine Particles Emitted from Coal-Fired Power Plants	DUAN Lei, MA Zi-zhen, LI Zhen, <i>et al.</i> (1117)
Underlying Mechanisms of the Heavy Metal Tolerance of Mycorrhizal Fungi	CHEN Bao-dong, SUN Yu-qing, ZHANG Xin, <i>et al.</i> (1123)
Research Progress on Microbial Properties of Nitrite-Dependent Anaerobic Methane-Oxidising Bacteria	SHEN Li-dong (1133)

《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)

2015年3月15日 第36卷 第3期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 3 Mar. 15, 2015

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: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行