

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第10期

Vol.37 No.10

2016

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目 次

北京地区空气重污染下雾凇和偏东风对 $PM_{2.5}$ 清除作用	孙兆彬, 廖晓农, 王占山, 李梓铭, 赵秀娟, 花丛 (3679)
降雨对不同粒径气溶胶粒子碰撞清除能力	董群, 赵普生, 陈一娜 (3686)
北京冬季雾霾频发期 VOCs 源解析及健康风险评价	刘丹, 解强, 张鑫, 王海林, 闫志勇, 杨宏伟, 郝郑平 (3693)
浙江省制鞋行业挥发性有机物污染特征及其排放系数	徐志荣, 姚轶, 蔡卫丹, 李嫣, 许明珠, 王浙明 (3702)
2014 年 APEC 期间北京市 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 氧化性损伤能力研究	郭茜, 邵龙义, 王文华, 侯聪, 赵承美, 幸娇萍, 马施民 (3708)
武汉市洪山区夏季 $PM_{2.5}$ 浓度、水溶性离子与 PAHs 成分特征及来源分析	孙焰, 祁士华, 张莉, 邢新丽, 杨丹, 胡天鹏, 瞿程凯 (3714)
基于快速聚类方法分析常州市区 $PM_{2.5}$ 的统计特性	王振, 余益军, 徐圆青, 李艳萍, 夏京, 殷磊 (3723)
$PM_{2.5}$ 在线水溶性离子与滤膜采集-实验室检测的比对分析	杨懂艳, 刘保献, 石爱军, 张大伟, 丁萌萌, 周健楠, 富佳明, 景宽 (3730)
树木模拟燃烧排放烟尘中水溶性离子的组成	刘刚, 黄柯, 李久海, 徐慧 (3737)
轻型汽油车排放颗粒物数浓度和粒径分布特征	樊筱筱, 蒋靖坤, 张强, 李振华, 何立强, 吴烨, 胡京南, 郝吉明 (3743)
基于台架测试的我国船用柴油机废气排放因子	邢辉, 段树林, 黄连忠, 韩志涛, 刘勤安 (3750)
西安城区地表灰尘中邻苯二甲酸酯分布、来源及人群暴露	张文娟, 王利军, 王丽, 史兴民, 卢新卫 (3758)
生活垃圾焚烧厂垃圾的汞含量与汞排放特征研究	段振亚, 苏海涛, 王凤阳, 李智坚, 李韶璞, 王书肖 (3766)
三峡库区消落带土壤中硫酸盐还原菌对汞甲基化作用的影响	陈瑞, 陈华, 王定勇, 向玉萍, 申鸿 (3774)
城市化进程对地下河中溶解态正构烷烃来源的影响	廖昱, 孙玉川, 沈立成, 梁作兵, 王尊波 (3781)
基于 PMF 模型的长江流域水体中多环芳烃来源解析及生态风险评价	王成龙, 邹欣庆, 赵一飞, 李宝杰 (3789)
贡嘎山地区地表水化学特征及水环境质量评价	何晓丽, 吴艳宏, 周俊, 邴海健 (3798)
多元数理统计法研究太子河本溪城市段水体 DOM 紫外光谱特征	钱锋, 吴婕, 于会彬, 宋永会, 张美, 孔令昊, 何孟常 (3806)
地下水中溶解性有机物的垂直分布特征及成因	何小松, 张慧, 黄彩红, 李敏, 高如泰, 李丹, 席北斗 (3813)
昆明市不同功能区排水管道沉积物性质	常海东, 金鹏康, 付博文, 李雪兵, 贾锐珂 (3821)
滇池水生植物分布对沉积物间隙水磷浓度的影响	丁帅, 王圣瑞, 张蕊, 肖焱波, 焦立新, 李乐, 王忠诚, 尹诗诗 (3828)
紫色母岩覆盖层控制底泥磷释放的效果及机制	黄雪娇, 石纹豪, 倪九派, 李振轮 (3835)
排水循环灌溉下稻田磷素时空分布特征	焦平金, 许迪, 朱建强, 于颖多 (3842)
快速高效去除微囊藻的 GO/QPEI 复合纳米材料	李洁, 肖琳 (3850)
一体式生物净化-沉淀池对微污染水体污染物的强化去除性能	王文东, 刘荟, 马翠, 韩雨, 常妮妮 (3858)
生物粉末活性炭-超滤组合工艺对微污染水源水中臭味物质的去除效能及其微生物特性	宣雍祺, 周丽, 邓慧萍, 蔡宙, 李大鹏, 刘刚 (3864)
聚硅酸对不同形态铝沉积行为的影响	赵园园, 张玥, 李素英, 石宝友, 李贵伟, 孙改清 (3870)
典型南方水源氨基酸浓度变化与去除	刘伟, 蔡广强, 卢小艳, 刘丽君, 张金松, 刘嘉祺, 曲莹 (3877)
O_3 /UV 降解含氮杂环化合物喹啉	陈傲蕾, 常凤民, 汪翠萍, 徐恒, 吴静, 左剑恶, 王凯军 (3884)
蒽醌-2-磺酸钠促进 <i>Klebsiella oxytoca</i> GS-4-08 脱色产氢机制与产能分析	胡金梅, 虞磊, 黄天寅 (3891)
2-丁烯醛生产废水中溶解性有机物的分级解析	孙秀梅, 宋广清, 席宏波, 周岳溪, 牛远方 (3899)
不同缺氧段硝酸盐氮浓度条件下连续流单污泥污水处理系统 PHA、TP 代谢	王晓玲, 员东丹, 白莉, 李紫棋, 余勇, 秦旭东, 张晓旭, 赵可 (3906)
长江口邻近海域沉积物中厌氧氨氧化细菌分布特征研究	付璐璐, 甄毓, 贺惠, 张玉, 米铁柱 (3914)
焦化废水活性污泥细菌菌群结构分析	蒙小俊, 李海波, 曹宏斌, 盛宇星 (3923)
黄土高原不同植被类型下土壤细菌群落特征研究	刘洋, 黄懿梅, 曾全超 (3931)
苯酚对活性污泥活性及微型动物群落结构的影响	胡小兵, 饶强, 唐素兰, 姜晶, 谢瑞桃, 郝文静, 钟梅英 (3939)
城市生活污水和生活垃圾渗滤液抗生素抗性基因污染的比较研究	黄福义, 李虎, 安新丽, 欧阳纬莹, 苏建强 (3949)
菌株 <i>Desulfovibrio</i> sp. CMX 的 DNRA 性能和影响因素	谢柄柯, 张玉, 王晓伟, 孙超越, 周集体 (3955)
生活污水灌溉对麦秸还田稻田氨挥发排放的影响	徐珊珊, 侯朋福, 范立慧, 薛利红, 杨林章, 王绍华, 李刚华 (3963)
模拟氮沉降对重庆缙云山马尾松林土壤呼吸和酶活性的季节性影响	曾清苹, 何丙辉, 李源, 夏力文, 杨龙龙, 邓雪梅, 李川 (3971)
生物炭添加和灌溉对温室番茄地土壤反硝化损失的影响	张文娟, 余冬立, Gamareldawla H. D. Agbna, 夏永秋 (3979)
土壤质地对自养固碳微生物及其同化碳的影响	王群艳, 吴小红, 祝贞科, 袁红朝, 隋方功, 葛体达, 吴金水 (3987)
土壤-作物系统中重金属元素吸收、迁移和积累过程模拟	施亚星, 吴绍华, 周生路, 王春辉, 陈浩 (3996)
组配改良剂对稻田系统 Pb、Cd 和 As 生物有效性的协同调控	王英杰, 邹佳玲, 杨文强, 周航, 廖柏寒 (4004)
几种有机物料对设施菜田土壤 Cd、Pb 生物有效性的影响	周贵宇, 姜慧敏, 杨俊诚, 张建峰, 张水勤, 梁雷 (4011)
蒙脱石对有机物料施入土壤磷形态和有效性的影响	宋贤威, 赵秀兰, 张进忠, 胡梦坤, 徐艳昭, 王明禹 (4020)
不同镉浓度及 pH 条件下纳米沸石对土壤镉形态及大白菜镉吸收的影响	秦余丽, 熊仕娟, 徐卫红, 赵婉伊, 王卫中, 陈永勤, 迟荪琳, 陈序根, 张进忠, 熊治庭, 王正银, 谢德体 (4030)
黑麦草和牵牛花对铬耐受能力和积累效果的指标表征研究	董冰冰, 陈友媛, 惠红霞, 陆维佳, 杨秀卿, 刘逸凡 (4044)
挥发性甲基硅氧烷的体外代谢行为	黎敏丹, 郑国贸, 万伟, 胡建英 (4054)
中药渣与城市污泥好氧共堆肥的效能	宿程远, 郑鹏, 阮祁华, 覃菁菁, 卢宇翔, 李俊兵 (4062)
《环境科学》征订启事 (3827)	《环境科学》征稿简则 (4053)
信息 (3736, 3930, 4043)	

北京地区空气重污染下雾凇和偏东风对 $\text{PM}_{2.5}$ 清除作用

孙兆彬^{1,2}, 廖晓农², 王占山³, 李梓铭², 赵秀娟², 花丛⁴

(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. 北京市环境保护监测中心, 北京 100048; 4. 国家气象中心, 北京 100081)

摘要: 为了研究空气重污染过程期间雾凇和偏东风对北京地区 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的影响, 利用2015年12月19~27日山区和平原多站 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度数据、常规气象数据、风廓线数据、激光雷达气溶胶消光系数资料, 分析了雾凇和偏东风对 $\text{PM}_{2.5}$ 的清除机制。结果表明: ① 雾凇对 $\text{PM}_{2.5}$ 的清除是不同于偏北风和降水天气的一种清除机制, 在过冷却的条件下, 雾滴触碰树枝、电线后凝结为固体, 形成雾凇, $\text{PM}_{2.5}$ 浓度下降; ② 偏东风是北京地区一类特殊风系, 当偏东风随高度减小时, 能够形成较强的上升运动, 将 $\text{PM}_{2.5}$ 从近地层抬升至高层, 随着高层较大的西风, 被带入下游而清除掉; 当偏东风随高度增大时, 容易形成弱的下沉运动, 而当此下沉运动不能够抵达地面时, 近地层对 $\text{PM}_{2.5}$ 容量变小, 有利于 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的升高; ③ 偏东风对 $\text{PM}_{2.5}$ 的清除能力取决于两点, 一是偏东风所形成的上升运动的强度与发展的程度, 二是偏东风所形成上升运动的起始高度, 上升运动的起始高度越低对 $\text{PM}_{2.5}$ 的清除效果越明显; ④ 偏东风出现后, 伴随着上升运动达到 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的量级, 混合层高度升高至1 200~1 800 m, $\text{PM}_{2.5}$ 被抬升至高层清除。

关键词: $\text{PM}_{2.5}$; 雾凇; 偏东风; 上升运动; 风切变

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)10-3679-07 DOI: 10.13227/j.hjxx.2016.10.001

Scavenging Effect of Rime and East Wind on $\text{PM}_{2.5}$ Under Air Heavy Pollution in Beijing

SUN Zhao-bin^{1,2}, LIAO Xiao-nong², WANG Zhan-shan³, LI Zi-ming², ZHAO Xiu-juan², HUA Cong⁴

(1. Institute of Urban Meteorology, China Meteorological Administration, Beijing 100089, China; 2. Environment Meteorology Forecast Center of Beijing-Tianjin-Hebei, Beijing 100089, China; 3. Beijing Municipal Environmental Monitoring Center, Beijing 100048, China; 4. National Meteorological Center, Beijing 100081, China)

Abstract: In order to study the scavenging effect of rime and east wind on the concentrations of $\text{PM}_{2.5}$ in Beijing during the air heavy pollution, $\text{PM}_{2.5}$ concentration data of some mountains and plains stations was used, together with meteorological data, wind profile data, aerosol extinction coefficient radar data collected during December 19 to 27, 2015, to analyze the clearance mechanisms of rime and east wind on $\text{PM}_{2.5}$. The results showed that ① the removal of $\text{PM}_{2.5}$ by rime was a different mechanism from that by the north wind and rainy weather, in the cooling conditions, the droplets touched the branches, wire for solid condensation, leading to formation of rime, and the concentration of $\text{PM}_{2.5}$ decreased; ② the east wind is a special kind of wind in Beijing area, when easterly wind decreased with height, a strong upward motion could be formed, and the $\text{PM}_{2.5}$ was uplifted from the surface layer to the top, while with larger westerly wind in top, it was removed into downstream and cleaned; when east wind increased with height, a weak downward movement was easy to form, and when this sinking motion could not reach the ground, the surface layer of $\text{PM}_{2.5}$ capacity became small, which was beneficial to increase the concentration of $\text{PM}_{2.5}$; ③ the $\text{PM}_{2.5}$ scavenging ability of east wind depended on two points, one was the strength and development of upward movement of the height formed by the east wind, and the second was the initial height of uplifted motion formed by east wind, the lower the origin of the ascending motion height, the more obvious the removal of $\text{PM}_{2.5}$; ④ after occurrence of east wind, along with the ascending motion to $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ magnitude, the mixed layer height increased to 1 200-1 800 meters, and $\text{PM}_{2.5}$ was uplifted to top layer and cleaned.

Key words: $\text{PM}_{2.5}$; rime; east wind; upward movement; wind shear

关于北京地区空气重污染的相关研究已经有较多成果^[1~7]。北京地区三面环山, 特有的地形条件, 使此地区的气象条件易受偏东风影响^[8~14]。已有学者关注到风的垂直切变对污染物浓度的影响^[15], 偏东风是北京地区一类特殊风系, 而北京地区气溶胶的理化特征也会随着偏东风的影响而改变, 偏东风影响北京时, 由于西部为山区, 会形成上升运动, 但上升运动的层次、强度往往与偏东风的厚度、风速

随高度的变化直接相关, 进而影响边界层内气溶胶的浓度。

收稿日期: 2016-03-30; 修订日期: 2016-05-04

基金项目: 国家科技支撑计划项目(2014BAC16B04, 2014BAC23B03, 2014BAC23B01); 中国气象局预报员专项(CMAYBY2016-003); 国家电网公司总部科技项目(8KE000M15011)

作者简介: 孙兆彬(1985~), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为空气重污染形成机制及大气污染对人体健康影响评估, E-mail: szb850804@163.com

北京地区近年来重污染天气事件频发,但对偏东风与气溶胶之间关系的研究较为稀少,这导致边界层内气溶胶对不同强度偏东风的响应机制尚不清晰,与其他风向相比,偏东风对边界层气溶胶浓度的影响有几点不同. 第一,由于偏东风并非地方性风,它的出现常带有突发性;第二,偏东风风速的大小,风速随高度的变化,偏东风的薄厚均会形成完全迥异的大气动力条件. 本研究选择 2015 年 12 月 19 ~ 27 日雾凇和偏东风影响下的边界层内污染物超标的个例作为代表,来揭示北京地区边界层内雾凇和偏东风对气溶胶不同的清除机制.

1 材料与方法

1.1 资料

本研究采用的气象数据来自于北京观象台的地面观测、风廓线雷达资料及中国科学院大气物理研究所铁塔分院内(39°58' N, 116°22' E)铁塔资料,所用铁塔数据包括风、湿度、温度资料^[16~18],激光雷达数据为 EV-LINAR 型微脉冲激光雷达来进行垂直方向的观测^[19].

1.2 混合层高度计算方法

本研究根据罗氏法计算混合层厚度^[20~22],计算公式如下:

$$H = \frac{121}{6}(6 - P)(T - T_d) + \frac{0.169P(u_z + 0.257)}{12f \ln(z/z_0)} \quad (1)$$

式中, T 为地面气温, T_d 为地面露点温度, u_z 为 z 高度处的平均风速, z_0 为地面粗糙度, f 为柯氏参数, $f = 2 \Omega \sin \Phi$, Ω 为地转角速度, Φ 为地理纬度, P 为帕斯圭尔稳定度级别(大气稳定度级别为 A ~ F 时, P 值依次为 1 ~ 6). 由于目前气象部门取消了夜间云的观测,为了保持全天计算结果的一致性,帕斯圭尔稳定度级别中的云量数据采用了静止气象卫星 FY-2E 的反演结果. 对比分析表明,帕斯圭尔稳定度级别与使用人工观测云量的计算结果一致.

2 结果与讨论

2.1 $PM_{2.5}$ 质量浓度的演变过程

2015 年 12 月 19 ~ 26 日北京地区经历了一次重污染天气的过程(图 1). 此次重污染过程中, $PM_{2.5}$ 浓度出现了 3 次明显下降,对应这 3 种不同的清除机制. $PM_{2.5}$ 浓度第一次下降出现在 12 月 22 日

夜间,由 $371.2 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 下降为 $200.0 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 浓度下降了 $171.3 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$; 浓度第二次下降出现在 12 月 23 日夜间,由 $235.7 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 下降为 $79.9 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 浓度下降了 $155.8 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$; 浓度第三次下降主要出现在 12 月 26 日,由 $408.3 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 下降为 $33.8 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 浓度下降了 $374.5 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 空气质量为优.

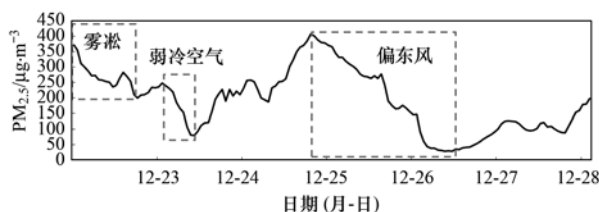


图 1 北京地区地面 12 月 23 ~ 28 日 $PM_{2.5}$ 浓度变化趋势

Fig. 1 Variation trend of $PM_{2.5}$ concentration in Beijing area during December 23-28

2.2 雾凇和弱冷空气对 $PM_{2.5}$ 清除过程

当过冷水滴碰撞到同样低于冻结温度的物体时,便会形成雾凇,它是由于雾中无数零摄氏度以下而尚未结冰的雾滴随风在树枝等物体上不断积聚冻粘的结果. 雾凇出现,吸附微粒沉降,具有一定的净化空气作用. 雾凇形成有两种方式,第一种情况是在微风严寒的天气里,水汽在物体表面凝华而成的针状雾凇,呈枝状的白色晶体,质地松散,容易振落;第二种情况是在微寒、浓雾、有风的天气,过冷雾滴在物体上冻结形成雾凇^[23],本研究属于第二种情况.

有研究表明,高湿、逆温、低温是雾凇形成的重要条件^[24~26]. 北京地区在 12 月 22 日夜间至 23 日早晨,由图 2 可见 320 m 以下大气相对湿度均在 90% 以上,且在 50 ~ 250 m 之间出现了明显逆温. 由图 3 可见,入夜后大部分时间地面风速小于 $1.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,地面相对湿度均在 95% ~ 100% 之间,地面气温在 0 ~ 3℃ 之间,均具备雾凇形成条件. 由于大气湿度的增大,小液滴在各种并合过程中长大成雾滴,在过冷却状态下,冷雾滴在树枝、电线等物体表面撞冻或凝华形成冰晶沉积物,就是雾凇, $PM_{2.5}$ 浓度随之下降.

12 月 23 日夜间 20:00 至 24 日上午 10:00,受弱冷空气影响,出现偏北风,从 12 月 23 日 20:00 至 24 日 10:00,相对湿度由 83% 下降到 51%,气温由低于 0℃ 上升至 1.9℃, $PM_{2.5}$ 第二次明显下降,关于冷空气对大气污染物的清除研究成果较多,此处不作赘述.

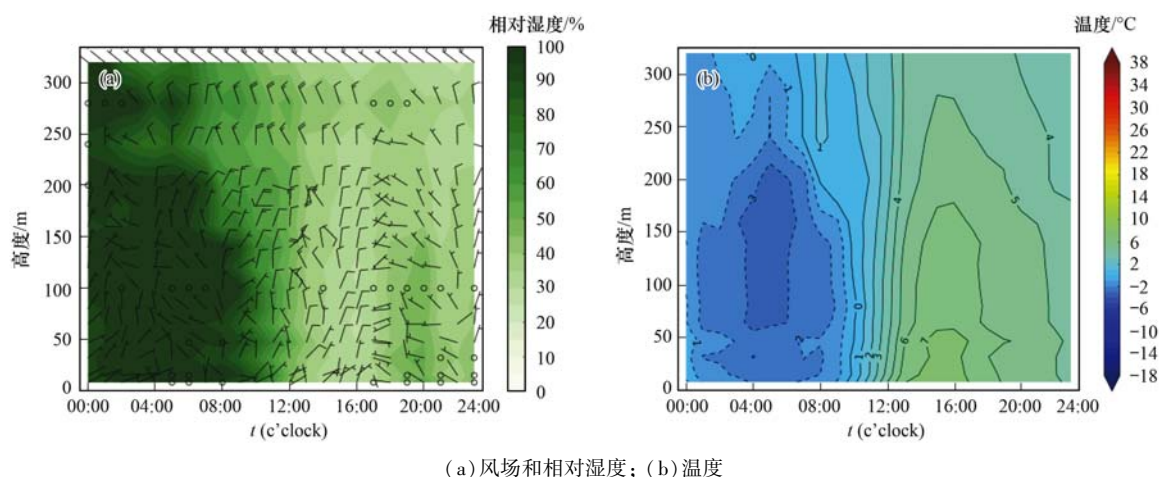


图 2 北京地区中国科学院大气物理研究所 320 m 铁塔数据

Fig. 2 320 m tower data in Beijing provided by Chinese Academy of Sciences Institute of Atmospheric Physics

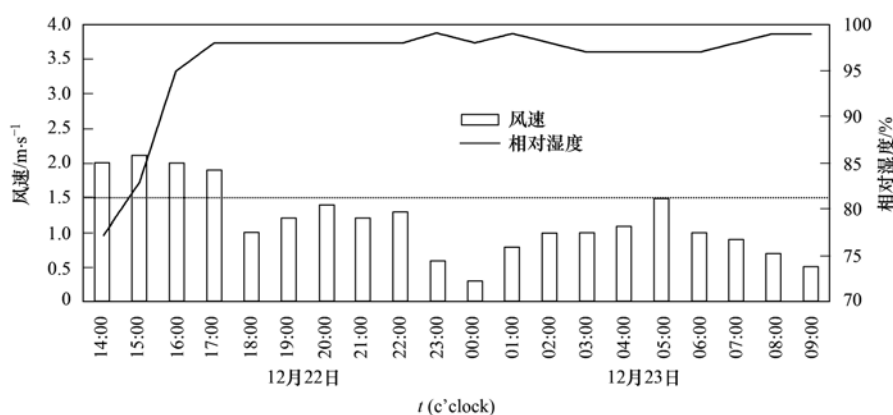


图 3 北京地区 10 m 风速和 2 m 相对湿度

Fig. 3 The 10 m wind speed and 2 m relative humidity in Beijing area

2.3 偏东风对 $\text{PM}_{2.5}$ 清除过程

2.3.1 偏东风对污染物清除的动力学机制

在 σ 坐标系下:

$$\zeta = \sigma = \frac{P}{P_s}$$

式中, P_s 为地面气压:

$$P_s = P_s(x, y, t)$$

在 σ 坐标系下的连续方程为:

$$\frac{d}{dt}(\ln P_s) + \nabla_{\sigma} \cdot \mathbf{V} + \frac{\partial \dot{\sigma}}{\partial \sigma} = 0$$

由于 P 不随 σ 变化:

$$\frac{\partial P_s}{\partial \sigma} = 0$$

因此上式写为:

$$\frac{\partial P_s}{\partial \sigma} = -\nabla \cdot (P_s \mathbf{V}) - \frac{\partial}{\partial \sigma}(P_s \dot{\sigma})$$

其中 $\dot{\sigma}$ 为垂直速度, 边界条件为:

当 $\sigma = 1$ (地面), $\dot{\sigma} = 0, u = u_0(t) < 0$

当 $\sigma = 0$ (大气顶), $\dot{\sigma} = 0, u = 0$.

如果仅仅对一定高度的大气积分, 例如从 $\sigma = 0$ 到 σ_0 积分, 可以得到 σ_0 高度处的垂直速度 $\dot{\sigma}$ 的方程:

$$\sigma \frac{\partial P_s}{\partial t} + \int_0^{\sigma_0} \nabla \cdot (P_s \mathbf{V}) d\sigma = -P_s \dot{\sigma}$$

在 12 月 25 日夜间偏东风影响时段, 查阅实况数据后发现, P_s 可以近似为一个常量, 因此假设它不随时间变化, $\partial P_s / \partial t = 0$, 上式简化为:

$$-\int_0^{\sigma_0} (\nabla \cdot \mathbf{V}) d\sigma = \dot{\sigma}$$

不考虑气流在 y 方向上的变化, 理想化风场只存在于 x 方向, 即:

$$\nabla \cdot \mathbf{V} = \frac{\partial u}{\partial x}$$

有研究将浅薄的偏东风在垂直方向上近似为随高度线性减弱^[27], 本研究便于讨论也采用此假设,

同时实况显示偏东风也随高度减弱,而且未超过北京西部太行山的高度,由上边界条件可知:

$$u(x, \sigma, t) = u_0(t) [1 - \sigma(x)/\sigma_0]$$

则:

$$\nabla \cdot \mathbf{V} = \frac{\partial u}{\partial x} = -\frac{u_0}{\sigma_0} \frac{\partial \sigma}{\partial x}$$

代入连续方程后,得到:

$$\dot{\sigma} = \int_0^{\sigma_0} \left(\frac{u_0}{\sigma_0} \frac{\partial \sigma}{\partial x} \right) d\sigma$$

当偏东风之时 $u_0 < 0$, 在迎风坡 $\partial \sigma / \partial x < 0$, 因此 $\dot{\sigma} > 0$, 存在上升运动. 地形迎风坡的上升运动取决于低空最大东风层的风速大小和山体的坡度, 由图 4 中的阶段 1 可见北京 300 m 以下均为偏东风, 300 m 以上为明显的偏西风, 偏东风随高度减小, $\dot{\sigma} > 0$, 对应着风廓线数据中的上升运动; 阶段 3 中 500 m 以下为偏东风, 500 m 以上为偏西风, 此阶段偏东风随高度增大, 最大东风层就位于 400 ~ 500 m 的高度上, 上升运动最大值也位于此高度上, 在阶段 3 中 500 m 以上为偏西风, 500 m 以下为偏东风, 上升运动发展至 1 000 m 以上的高度, 上升运动最大强度超过 $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

对于阶段 2 的偏东风随高度增大的相关讨论, 下面给出动力学解释.

假设偏东风随高度线性增大^[27], 边界条件为:

当 $\sigma = 1$ (地面), $\dot{\sigma} = 0$, $u = u_0(t) < 0$; 当 $\sigma = 0$ (大气顶), $\dot{\sigma} = 0$, $u = U(t)$, $U(t) < u_0 < 0$.

得到风速为:

$$u(x, t) = u_0(t) - \frac{u_0(t) - U(t)}{\sigma_0} \sigma(x)$$

则:

$$\nabla \cdot \mathbf{V} = \frac{\partial u}{\partial x} = \frac{(U - u_0)}{\sigma_0} \frac{\partial \sigma}{\partial x}$$

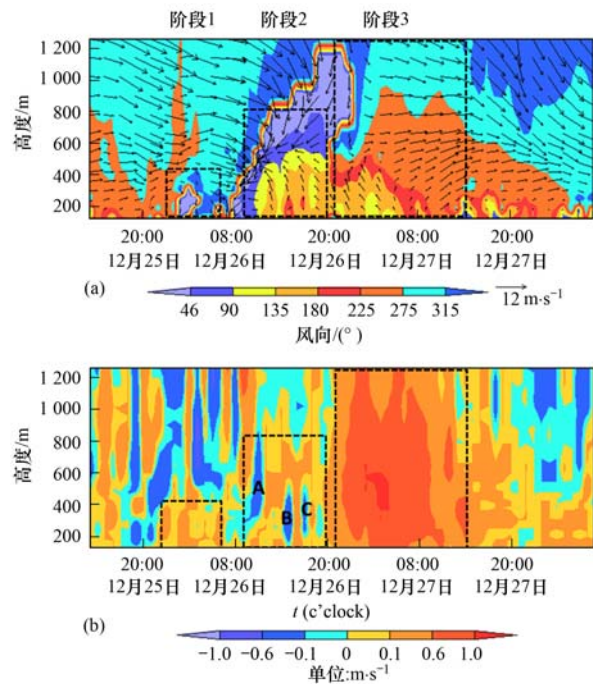
代入:

$$-\int_0^{\sigma_0} (\nabla \cdot \mathbf{V}) d\sigma = \dot{\sigma}$$

中有:

$$\dot{\sigma} = -\int_0^{\sigma_0} \left(\frac{(U - u_0)}{\sigma_0} \frac{\partial \sigma}{\partial x} \right) d\sigma$$

说明在偏东风风速随高度线性增加过程中, 在迎风坡 $U - u_0 < 0$, $\partial \sigma / \partial x < 0$, 水平辐散, 出现下沉运动, 下沉运动的强度与偏东风垂直风切变大小有关, 切变越大下沉运动越强, 因此从图 4 的第二阶段可见在偏东风垂直切变最强的 300 ~ 600 m 高度上出现了 A、B、C 这 3 个下沉中心.



(a) 风场, 阴影为风向; (b) 垂直速度

图 4 北京地区风廓线数据

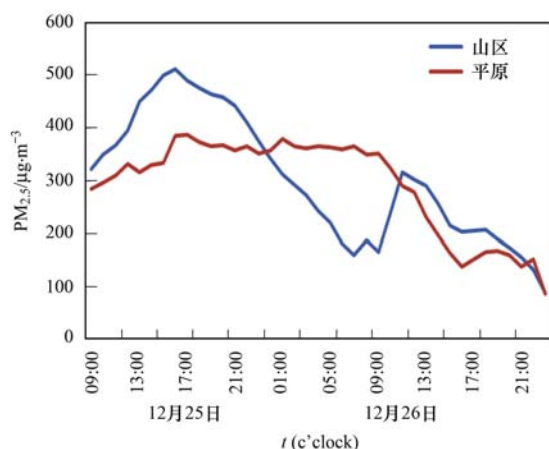
Fig. 4 Wind profile data in Beijing area

有研究表明气溶胶通常在一定高度 $Z_{\max}$ 以下浓度最高, 而此高度以上大气非常清洁, 第一种分类是 $Z_{\max}$ 高度以下, 气溶胶的垂直分布为高斯型, 在 $Z_{\max}$ 以下为高斯分布, $Z_{\max}$ 以上为自然气溶胶, 为指数分布; 第二种分布称为指数型, 在整个高度, 气溶胶的浓度随高度指数分布, 此种分布对应于不稳定天气条件; 第三种为均匀型, 在 $Z_{\max}$ 以下均匀分布, 而 $Z_{\max}$ 以上仍为自然气溶胶^[28], 所以无论气溶胶在 $Z_{\max}$ 以下以何种形式分布, 一旦较强的上升运动冲破 $Z_{\max}$ 高度, $Z_{\max}$ 以下的气溶胶将被带入更高层大气, 所以从空气污染物清除的角度看, 上升运动的起始高度最好源于地面或者在较低层次, 此外上升运动的强度要强, 如果仅仅达到天气尺度系统的上升速度 $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$ 量级, 是不足以明显降低近地层大气污染物浓度.

2.3.2 偏东风作用下沿山区和平原地区 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度变化

偏东风的作用, 300 m 以下整层大气出现了上升运动, 由 2.3.1 节可知北京地区处于山前, 受地形影响较大的地区对偏东风的作用会更加敏感, 因此受偏东风抬升作用影响, 山区 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度自中午开始出现明显下降, 城区 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度变化不大 (图 5 和图 6), 12 月 26 日北京地区白天受下沉气流影响, 与第一阶段比, 偏东风层次变厚、风速变大, 对 $\text{PM}_{2.5}$ 影

响主要有两点: 第一伴随着平原地区污染物浓度下降, 变厚的偏东风会将平原地区污染物向沿山地区输送; 第二, 下沉气流的出现会压缩边界层底层的大气容积, 降低大气对污染物的容纳能力. 廖晓农等^[29]研究成果表明, 地面到高空, 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. 本研究从动力学的角度揭示了东风切变产生的下沉运动, 600 m 以上的大气的偏东风较快增大, 相当于出现风速脉动, 这与以往的分析结果相一致. 当上升运动强度, 高度都逐渐增强、增高后山区和城区的污染物浓度均呈现一致下降趋势.



山区: 怀柔、平谷、石景山; 平原: 昌平、
观象台、大兴、朝阳、房山、海淀

图 5 北京地区 12 月 25 ~ 26 日山区和平原的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度演变

Fig. 5 Evolution of $\text{PM}_{2.5}$ concentration of mountain area
and plain during December 25-26 in Beijing

2.3.3 偏东风作用下山区和平原地区 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度变化

激光雷达对获取气溶胶的垂直高度信息具有独特的优势^[30-34], 从图 7 可见 12 月 19 ~ 22 日白天 1 km 以上大气消光系数, 尤其是近地层的消光系数明显升高, 大气污染物浓度逐渐升高, 受 12 月 22 日夜间雾凇和 12 月 24 日白天弱冷空气的清除作用影响, 气溶胶消光系数明显下降, 垂直方向扩散条件转好, 12 月 24 日午后至 25 日傍晚前后大气污染物再次

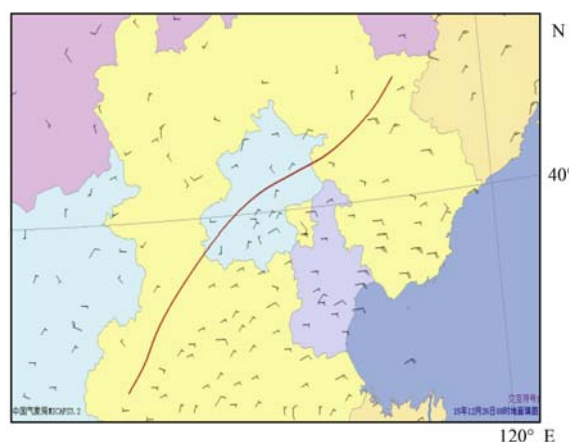


图 6 12 月 26 日 08:00 的地面风场

Fig. 6 Surface wind field at 08:00 on December 26th

累积, 气溶胶消光系数增大, 12 月 25 日夜间至 26 日受偏东风较强的抬升作用影响, 1 ~ 2 km 高度的气溶胶消光系数明显增大, 而近地层的气溶胶消光系数显著降低, 近地层气溶胶消光系数的变化趋势与图 1 中 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的变化趋势相一致.

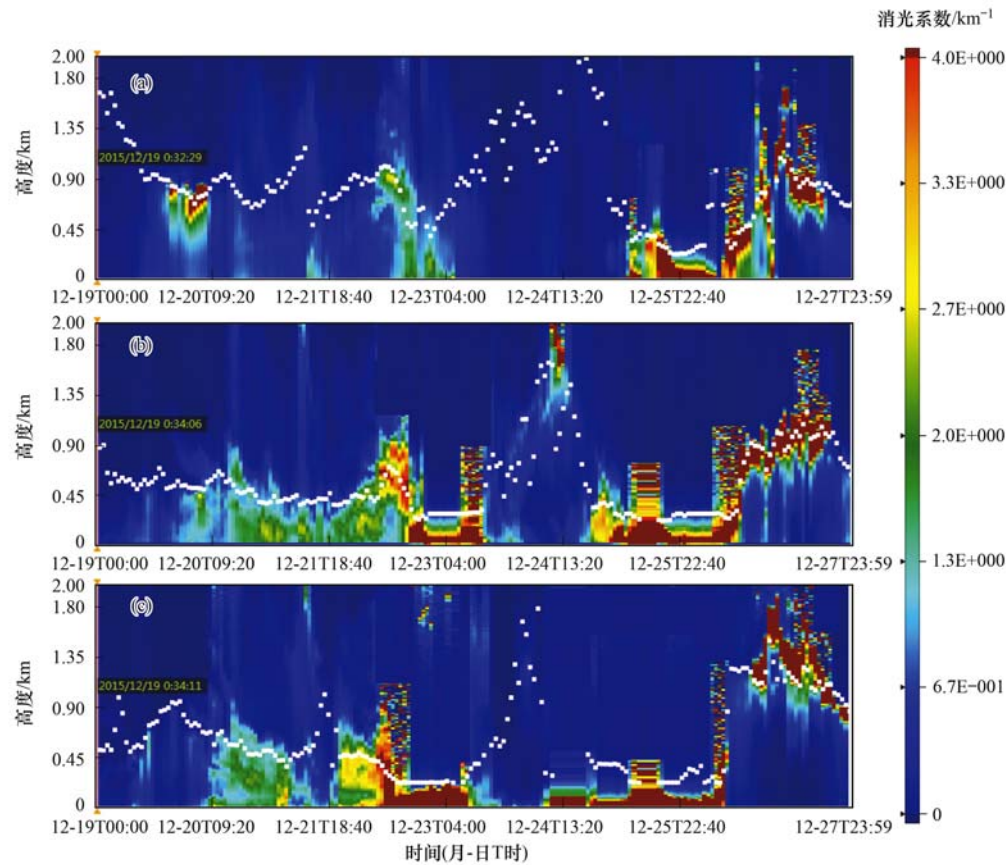
2.3.4 混合层高度变化

由图 8 可见, 12 月 19 ~ 23 日混合层高度逐渐降低, 夜间混合层高度可降低至 100 m 以下, 大气垂直方向扩散条件较差, $\text{PM}_{2.5}$ 浓度持续上升, 12 月 23 日夜间至 24 日上午受弱冷空气影响, 混合层高度短时升高至 1 000 m 以上, 12 月 25 日受近地层偏东风影响, 混合层高度上升至 1 000 m 左右的高度, $\text{PM}_{2.5}$ 浓度开始下降, 12 月 26 日白天北京上空出现弱的下沉运动 (图 4), 而且下沉运动并未抵达地面, 近地层对 $\text{PM}_{2.5}$ 容积变小, 同时在偏东风的地形辐合作用下, 山区 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度有所上升, 平原地区 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度变化不大, 12 月 26 日入夜后上升运动强度增大, 发展的高度增强, 混合层高度发展至 1 200 ~ 1 800 m, $\text{PM}_{2.5}$ 浓度显著下降.

3 结论

(1) 雾凇对 $\text{PM}_{2.5}$ 的清除是不同于偏北风和降水天气的一种清除机制, 伴随着雾凇的出现, $\text{PM}_{2.5}$ 浓度随之下降.

(2) 偏东风是北京地区一类特殊风系, 当偏东风随高度减小时, 能够形成较强的上升运动将 $\text{PM}_{2.5}$ 从近地层抬升至高层而清除; 当偏东风随高度增大时, 容易形成弱的下沉运动, 当下沉运动不能抵达地面时, 近地层大气对 $\text{PM}_{2.5}$ 容量变小, 有利于 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的升高.



(a) 定陵; (b) 永乐店; (c) 琉璃河

图 7 北京地区定陵、永乐店、琉璃河激光雷达气溶胶消光系数

Fig. 7 Radar aerosol extinction coefficient in Dingling, Yongledian and Liulihe of Beijing

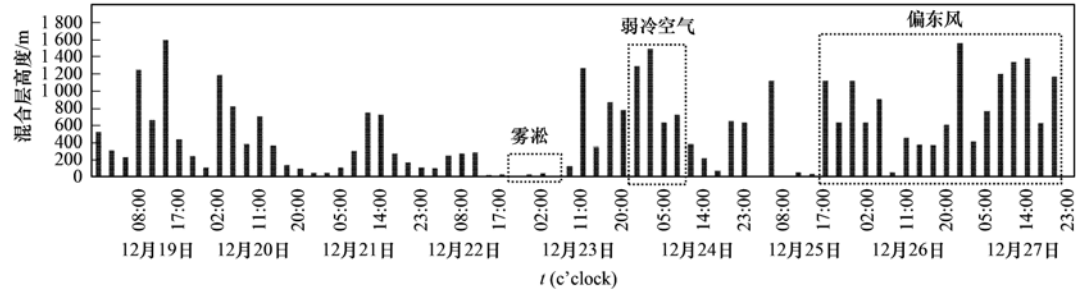


图 8 北京混合层高度变化趋势

Fig. 8 Variation trend of mixed layer height in Beijing

(3) 偏东风对 $PM_{2.5}$ 的清除能力取决于两点, 一是偏东风所形成的上升运动的强度与发展的程度; 二是此偏东风所形成上升运动的起始高度。

(4) 混合层高度与 $PM_{2.5}$ 具有较好的对应关系, 当混合层高度明显降低时, $PM_{2.5}$ 浓度显著升高; 偏东风出现后, 伴随着上升运动达到 $m \cdot s^{-1}$ 的量级, 混合层高度升高至 1 200 ~ 1 800 m, $PM_{2.5}$ 浓度也随之下降。

参考文献:

[1] 徐祥德, 丁国安, 卞林根, 等. BECAPEX 科学试验城市建筑

群落边界层大气环境特征及其影响[J]. 气象学报, 2004, 62(5): 663-671.
[2] 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.
[3] 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.
[4] 刘树华, 刘振鑫, 李炬, 等. 京津冀地区大气局地环流耦合效应的数值模拟[J]. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2009, 39(1): 88-98.
[5] 任阵海, 万本太, 虞统, 等. 不同尺度大气系统对污染边界层的影响及其水平场输送[J]. 环境科学研究, 2004, 17

- (1): 7-13.
- [6] 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, 40.
- [7] Zhang W, Capps S L, Hu Y, *et al.* Development of the high-order decoupled direct method in three dimensions for particulate matter: enabling advanced sensitivity analysis in air quality models[J]. *Geoscientific Model Development*, 2012, **5**(2): 355-368.
- [8] 赵思雄, 孙建华, 陈红, 等. 北京“12·7”降雪过程的分析研究[J]. 气候与环境研究, 2002, **7**(1): 7-21.
- [9] 孙建华, 赵思雄. 华北地区“12·7”降雪过程的数值模拟研究[J]. 气候与环境研究, 2003, **8**(4): 387-401.
- [10] 董林, 符娇兰, 宗志平. 2011 年隆冬北京初雪成因分析[J]. 气象, 2012, **38**(8): 913-920.
- [11] 王婷婷, 王迎春, 陈明轩, 等. 北京地区干湿雷暴形成机制的对比分析[J]. 气象, 2011, **37**(2): 142-155.
- [12] 张文龙, 崔晓鹏, 王迎春, 等. 对流层低层偏东风对北京局地暴雨的作用[J]. 大气科学, 2013, **37**(4): 829-840.
- [13] 马翠平, 吴彬贵, 李云川, 等. 冀中南连续 12 天大雾天气的形成及维持机制[J]. 高原气象, 2012, **31**(6): 1663-1674.
- [14] 马翠平, 吴彬贵, 李江波, 等. 一次持续性大雾边界层结构特征及诊断分析[J]. 气象, 2014, **40**(6): 715-722.
- [15] 刘建, 吴兑, 范绍佳. 珠江三角洲区域污染分布及其垂直风场特征[J]. 环境科学, 2015, **36**(11): 3989-3998.
- [16] 薛敏, 王跃思, 孙扬, 等. 北京市大气中 CO 的浓度变化监测分析[J]. 环境科学, 2006, **27**(2): 200-206.
- [17] 赵亚南, 王跃思, 张凯, 等. 工作日、双休日和春节期间 PM_{10} 中水溶性离子浓度变化特征[J]. 环境科学研究, 2008, **21**(5): 150-153.
- [18] 胡波, 王跃思, 刘广仁. 北京城市紫外辐射变化特征及经验估算方程[J]. 高原气象, 2007, **26**(3): 511-518.
- [19] 王占山, 李云婷, 孙峰, 等. 2014 年 10 月上旬北京市大气重污染分析[J]. 中国环境科学, 2015, **35**(6): 1654-1663.
- [20] 马福建. 用常规地面气象资料估算大气混合层深度的一种方法[J]. 环境科学, 1984, **5**(1): 11-14.
- [21] 李宗恺, 潘云仙, 孙润桥. 空气污染气象学原理及应用[M]. 北京: 气象出版社, 1985.
- [22] 童志权. 大气环境影响评价[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1988.
- [23] 顾钧禧. 大气科学词典[M]. 北京: 气象出版社, 1994.
- [24] 顾光芹, 田国强, 梁秀慧, 等. 河北省雾凇和雨凇气候特征及气象条件分析[J]. 气象, 2012, **38**(5): 561-568.
- [25] 吴有训, 陈健武, 杨保桂, 等. 黄山冬季气温分类及雪、雨凇和雾凇的气候分析[J]. 气象学报, 2000, **58**(3): 376-384.
- [26] 吴息, 胡欣欣, 王彬滨, 等. 贵州地区导线覆冰的混合凇覆冰模型[J]. 自然灾害学报, 2014, **23**(3): 125-131.
- [27] 孙继松. 气流的垂直分布对地形雨落区的影响[J]. 高原气象, 2005, **24**(1): 62-69.
- [28] 田文寿, 陈长和. 兰州冬季气溶胶光学特性的参数化[J]. 大气科学, 1996, **20**(2): 235-242.
- [29] 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.
- [30] 陶宗明, 张寅超, 岑岗, 等. 激光雷达探测污染气体最小浓度的估算方法[J]. 光学学报, 2004, **24**(5): 602-604.
- [31] 胡欢陵, 吴永华, 谢晨波, 等. 北京地区夏冬季颗粒物污染边界层的激光雷达观测[J]. 环境科学研究, 2004, **17**(1): 59-66, 73.
- [32] 董云升, 刘文清, 刘建国, 等. 激光雷达在城市交通污染中应用研究[J]. 光学学报, 2010, **30**(2): 315-320.
- [33] 汪少林, 谢品华, 胡顺星, 等. 车载激光雷达对北京地区边界层污染监测研究[J]. 环境科学, 2008, **29**(3): 562-568.
- [34] 杨婷, 王自发, 张柏, 等. 基于激光雷达数据的奥运大气污染控制效果评估[J]. 科学通报, 2010, **55**(10): 931-936.

CONTENTS

Scavenging Effect of Rime and East Wind on PM _{2.5} Under Air Heavy Pollution in Beijing	SUN Zhao-bin, LIAO Xiao-nong, WANG Zhan-shan, <i>et al.</i> (3679)
Impact of Collision Removal of Rainfall on Aerosol Particles of Different Sizes	DONG Qun, ZHAO Pu-sheng, CHEN Yi-na (3686)
Source Apportionment and Health Risk Assessment of VOCs During the Haze Period in the Winter in Beijing	LIU Dan, XIE Qiang, ZHANG Xin, <i>et al.</i> (3693)
Pollution Characteristics and Emission Coefficient of Volatile Organic Compounds from Shoe-making Industry in Zhejiang Province	XU Zhi-rong, YAO Yi, CAI Wei-dan, <i>et al.</i> (3702)
Oxidative Capacity of the PM ₁₀ and PM _{2.5} in Beijing During 2014 APEC	GUO Qian, SHAO Long-yi, WANG Wen-hua, <i>et al.</i> (3708)
Concentration, Water-Soluble Ionic and Polycyclic Aromatic Hydrocarbons Composition and Sources of PM _{2.5} During Summer in Hongshan District, Wuhan	SUN Yan, QI Shi-hua, ZHANG Li, <i>et al.</i> (3714)
Statistical Characteristics of Urban Changzhou PM _{2.5} Based on <i>k</i> -means Analysis	WANG Zhen, YU Yi-jun, XU Pu-qing, <i>et al.</i> (3723)
Comparison Test Between On-line Monitoring of Water-soluble Ions and Filter-based Manual Methods for PM _{2.5}	YANG Dong-yan, LIU Bao-xian, SHI Ai-jun, <i>et al.</i> (3730)
Chemical Composition of Water-soluble Ions in Smoke Emitted from Tree Branch Combustion	LIU Gang, HUANG Ke, LI Jiu-hai, <i>et al.</i> (3737)
Number Concentration and Size Distribution of Particles Emitted by Light-duty Gasoline Vehicles	FAN Xiao-xiao, JIANG Jing-kun, ZHANG Qiang, <i>et al.</i> (3743)
Testbed-Based Exhaust Emission Factors for Marine Diesel Engines in China	XING Hui, DUAN Shu-lin, HUANG Lian-zhong, <i>et al.</i> (3750)
Distribution, Source and Human Exposure of Phthalic Acid Esters (PAEs) in Surface Dust in Urban Area of Xi'an City, China	ZHANG Wen-juan, WANG Li-jun, WANG Li, <i>et al.</i> (3758)
Mercury Emission Characteristics and Mercury Concentrations of Municipal Solid Waste in Waste Incineration Plants	DUAN Zhen-ya, SU Hai-tao, WANG Feng-yang, <i>et al.</i> (3766)
Role of Sulfate-Reducing Bacteria in Mercury Methylation in Soil of the Water-Level-Fluctuating Zone of the Three Gorges Reservoir Area	CHEN Rui, CHEN Hua, WANG Ding-yong, <i>et al.</i> (3774)
Impact of Urbanization on the Sources of Dissolved <i>n</i> -alkane in Underground River	LIAO Yu, SUN Yu-chuan, SHEN Li-cheng, <i>et al.</i> (3781)
Source Apportionment and Ecological Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Surface Water from Yangtze River, China; Based on PMF Model	WANG Cheng-long, ZOU Xin-qing, ZHAO Yi-fei, <i>et al.</i> (3789)
Hydro-chemical Characteristics and Quality Assessment of Surface Water in Gongga Mountain Region	HE Xiao-li, WU Yan-hong, ZHOU Jun, <i>et al.</i> (3798)
UV-Visible Spectra Properties of DOM from Taizi River in Benxi City Section by Multivariable Analysis	QIAN Feng, WU Jie-yun, YU Hui-bin, <i>et al.</i> (3806)
Vertical Distribution Characteristics of Dissolved Organic Matter in Groundwater and Its Cause	HE Xiao-song, ZHANG Hui, HUANG Cai-hong, <i>et al.</i> (3813)
Sediment Characteristics of Sewer in Different Functional Areas of Kunming	CHANG Hai-dong, JIN Peng-kang, FU Bo-wen, <i>et al.</i> (3821)
Concentration of Phosphorus in Sediments Interstitial Water as Affected by Distribution of Aquatic Plants in Dianchi Lake	DING Shuai, WANG Sheng-rui, ZHANG Rui, <i>et al.</i> (3828)
Efficiency and Mechanism of Capping with Purple Parent Rocks to Control Phosphorus Release from Sediments	HUANG Xue-jiao, SHI Wen-hao, NI Jiu-pai, <i>et al.</i> (3835)
Temporal and Spatial Distribution of Phosphorus in Paddy Fields Under Cyclic Irrigation of Drainage Water	JIAO Ping-jin, XU Di, ZHU Jian-qiang, <i>et al.</i> (3842)
GO/QPEI Nanocomposite for Fast and High-capacity Removal of <i>M. Aeruginosa</i>	LI Jie, XIAO Lin (3850)
Enhanced Pollutant Removal Performance of an Integrated Biological Settling Tank from Micro-polluted Water Bodies	WANG Wen-dong, LIU Hui, MA Cui, <i>et al.</i> (3858)
Odorants Removal and Microbial Characteristics in Treatment of Micro-polluted Source Water with Biological Powdered Activated Carbon-Ultrafiltration Combined Process	XUAN Yong-qi, ZHOU Li, DENG Hui-ping, <i>et al.</i> (3864)
Effect of Polysilicic Acid on the Deposition Behavior of Different Aluminum Species	ZHAO Yuan-yuan, ZHANG Yue, LI Su-ying, <i>et al.</i> (3870)
Concentration Variation and Removal of Amino Acids in Typical Drinking Sources in the South of China	LIU Wei, CAI Guang-qiang, LU Xiao-yan, <i>et al.</i> (3877)
Degradation of the Nitrogenous Heterocyclic Compound Quinoline by O ₃ /UV	CHEN Ao-lei, CHANG Feng-min, WANG Cui-ping, <i>et al.</i> (3884)
Impact of Anthraquinone-2-sulfonic Acid on the MO Decolorization, Hydrogen Production and Energy Creation During Anaerobic Fermentation of <i>Klebsiella oxytoca</i> GS-4-08 with Sucrose	HU Jin-mei, YU Lei, HUANG Tian-yin (3891)
Classification and Analysis of Dissolved Organic Matter in 2-Buternal Manufacture Wastewater	SUN Xiu-mei, SONG Guang-qing, XI Hong-bo, <i>et al.</i> (3899)
Concentration of Nitrate in Main Anoxic Stage and PHA, TP Metabolism for Nitrogen and Phosphorus Removal in Single Sludge System with Continuous Flow	WANG Xiao-ling, YUAN Dong-dan, BAI Li, <i>et al.</i> (3906)
Distribution Characteristics of Anaerobic Ammonia Oxidation Bacteria in Sediments from the Adjacent Seas of Yangtze Estuary	FU Lu-lu, ZHEN Yu, HE Hui, <i>et al.</i> (3914)
Bacterial Community Composition of Activated Sludge from Coking Wastewater	MENG Xiao-jun, LI Hai-bo, CAO Hong-bin, <i>et al.</i> (3923)
Soil Bacterial Communities Under Different Vegetation Types in the Loess Plateau	LIU Yang, HUANG Yi-mei, ZENG Quan-chao (3931)
Effects of Phenol on Activity and Microfauna Community Structure of Activated Sludge	HU Xiao-bing, RAO Qiang, TANG Su-lan, <i>et al.</i> (3939)
Comparative Investigation of Antibiotic Resistance Genes Between Wastewater and Landfill Leachate	HUANG Fu-yi, LI Hu, AN Xin-li, <i>et al.</i> (3949)
Performance and Influencing Factors of Dissimilatory Nitrate Reduction to Ammonium Process by the Strain <i>Desulfohalobium</i> sp. CMX	XIE Bing-ke, ZHANG Yu, WANG Xiao-wei, <i>et al.</i> (3955)
Effect of Straw Incorporation and Domestic Sewage Irrigation on Ammonia Volatilization from Paddy Fields	XU Shan-shan, HOU Peng-fu, FAN Li-hui, <i>et al.</i> (3963)
Seasonal Effect of Simulated Nitrogen Deposition on Soil Respiration and Soil Enzyme Activity in Masson Pine Forest in Mt. Jinyun, Chongqing, China	ZENG Qing-ping, HE Bing-hui, LI Yuan, <i>et al.</i> (3971)
Effects of Biochar Amendment and Irrigation on Denitrification Losses in Greenhouse Tomato Fields	ZHANG Wen-juan, SHE Dong-li, Gamareldawla H. D. Agbna, <i>et al.</i> (3979)
Effects of Soil Texture on Autotrophic CO ₂ Fixation Bacterial Communities and Their CO ₂ Assimilation Contents	WANG Qun-yan, WU Xiao-hong, ZHU Zhen-ke, <i>et al.</i> (3987)
Simulation of the Absorption, Migration and Accumulation Process of Heavy Metal Elements in Soil-crop System	SHI Ya-xing, WU Shao-hua, ZHOU Sheng-lu, <i>et al.</i> (3996)
Synergetic Control of Bioavailability of Pb, Cd and As in the Rice Paddy System by Combined Amendments	WANG Ying-jie, ZOU Jia-ling, YANG Wen-tao, <i>et al.</i> (4004)
Effects of Different Organic Materials on Bio-availability of Cd, Pb in a Contaminated Greenhouse Soil	ZHOU Gui-yu, JIANG Hui-min, YANG Jun-cheng, <i>et al.</i> (4011)
Effect of Montmorillonite on Fractions and Availability of Phosphorus in Soils Applied with Organic Fertilizer	SONG Xian-wei, ZHAO Xiu-lan, ZHANG Jin-zhong, <i>et al.</i> (4020)
Effect of Nano Zeolite on Chemical Fractions of Cd in Soil and Uptake by Chinese Cabbage at Different Soil pH and Cadmium Levels	QIN Yu-li, XIONG Shi-juan, XU Wei-hong, <i>et al.</i> (4030)
Characterization of Cr Tolerance and Accumulation in <i>Lolium perenne</i> L. and <i>Pharbitis purpurea</i> (L.) Voigt	DONG Bing-bing, CHEN You-yuan, HUI Hong-xia, <i>et al.</i> (4044)
<i>In vitro</i> Metabolism of Volatile Methyl Siloxanes	LI Min-dan, ZHENG Guo-mao, WAN Yi, <i>et al.</i> (4054)
Efficiency of Aerobic Co-composting of Urban Sludge and Chinese Medicinal Herbal Residues	SU Cheng-yuan, ZHENG Peng, RUAN Qi-hua, <i>et al.</i> (4062)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 赵进才

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 刘 毅 汤鸿霄 孟 伟 周宗灿 林金明
赵进才 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)

2016年10月15日 第37卷 第10期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 10 Oct. 15, 2016

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	赵进才	Editor-in -Chief		ZHAO Jin-cai
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	中国国际图书贸易集团有限公司 (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