

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, 迟芬琳, 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)	

2014 年 APEC 期间北京市 PM₁₀ 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

(中国矿业大学(北京)地球科学与测绘工程学院, 北京 100083)

摘要: 为评估 APEC 会议期间联防联控措施对北京市大气可吸入颗粒物毒性的影响, 采集 2014 年 APEC 会议前后 3 个月北京市大气 PM₁₀ 和 PM_{2.5} 样品, 应用质粒 DNA 损伤评价法来研究其氧化性损伤能力. 结果表明, APEC 会议期间 PM₁₀ 对 DNA 的损伤率高于 PM_{2.5}, 颗粒物对 DNA 损伤率随剂量的增加而增加. 本研究用 TD30 值来指示颗粒物氧化性损伤能力, TD30 为引起 30% 的 DNA 损伤率所需要的颗粒物剂量(单位为 $\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$), TD30 值越低, 颗粒物氧化性损伤能力越强, APEC 会议前后样品的 TD30 值表现为 APEC 期间(11 月) > APEC 前(10 月) > APEC 后(12 月), 说明氧化能力 APEC 后 > APEC 前 > APEC 期间. 用 PM₁₀ 质量浓度乘上其在 250 $\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$ 剂量下的 DNA 损伤率得到颗粒物暴露毒性指数 TI(toxic index), 与往年具有代表性月份样品的数据对比, TI 大小顺序为 2004 年 > 2014 年 > 2008 年, 说明大气中颗粒物暴露毒性随着政策控制力度的加大而降低.

关键词: PM_{2.5}; APEC 会议; 质粒 DNA 损伤评价法; 氧化性损伤能力; 暴露风险

中图分类号: X171.5; X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)10-3708-06 DOI: 10.13227/j.hjxx.2016.10.005

Oxidative Capacity of the PM₁₀ and PM_{2.5} in Beijing During 2014 APEC

GUO Qian, SHAO Long-yi*, WANG Wen-hua, HOU Cong, ZHAO Cheng-mei, XING Jiao-ping, MA Shi-min

(College of Geoscience and Surveying Engineering, China University of Mining and Technology, Beijing 100083, China)

Abstract: In order to evaluate the effect of the joint air pollution prevention and control program on the toxicity of the airborne particles in Beijing during the APEC conference, we collected the PM₁₀ and PM_{2.5} (particulate matter with aerodynamic diameters of less than 10 μm and 2.5 μm respectively) from October to December in the urban district of Beijing, and analyzed the oxidative capacity of the particles by plasmid scission assay. The results indicated that the oxidative capacity of PM₁₀ was higher than that of PM_{2.5} during the APEC conference, and that the damage rate of supercoiled DNA by the samples increased with their experimental dose levels. The TD30 (toxic dose of PM causing 30% of plasmid DNA damage, unit: $\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$) was used to indicate the oxidative capacity and the lower TD30 values indicated higher oxidative capacity. The TD30 values of the PM samples before, during, and after APEC conference displayed a descending order of during APEC (November) > before APEC (October) > after APEC (December), which indicated a decreasing order of the PM oxidative capacity of after APEC (November) > before APEC (October) > during APEC. The TI (toxic index) was further introduced to represent the human exposure risk of particles, which was represented by the product of the mass concentration of PM ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) and the DNA damage percentages under the PM dose of 250 $\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$ (%). Compared with the TI values of previous years, the TI value of the 2014 APEC PM was lower than that of 2004, but higher than that of the 2008 Olympic Games, suggesting that the exposure risk of airborne particles decreased obviously with the increase of policy control strength.

Key words: PM_{2.5}; APEC conference; plasmid scission assay; oxidative capacity; exposure risk

近年来,随着城市经济的迅猛发展,以 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 为主要污染物的区域性大气重污染事件频发,并且污染范围日益扩大. 由于大气颗粒物会对人体健康^[1~3]、能见度^[4]和气候^[5]产生影响,因而颗粒物污染引发的健康问题受到公众的广泛关注^[6~9]. 目前,国内外对大气颗粒物的关注重点集中在其来源^[10]、转化^[11]、理化性质^[12~14]、健康效应^[7,15~20]等方面. 谢元博等^[21]基于能源环境情景模拟的北京市大气污染对居民健康风险评价研究发现,在不同情景下 PM₁₀ 引起的急性死亡率也远大于 PM_{2.5}. 因此,本研究的对象为 PM_{2.5} 和 PM₁₀,重点分析 PM₁₀

对于分子级别的物质的氧化特性.

特殊时期特殊事件导致大气颗粒物种类及含量出现明显变化时,颗粒物理化特性及其产生的效应可能会和常规时期有所不同. 因此,很多专家学者针对不同季节、特殊事件的大气颗粒物浓度、理化性质、单颗粒形貌等进行了深入的研究^[22]. 如邵龙

收稿日期: 2016-03-14; 修订日期: 2016-05-03

基金项目: 国家重点基础研究发展规划(973)项目(2013CB228503); 国家自然科学基金重大国际合作项目(41571130031)

作者简介: 郭茜(1990~)女,硕士研究生,主要研究方向为大气颗粒物毒理特性, E-mail: 1227422994@qq.com

* 通讯联系人, E-mail: Shaol@cumt.edu.cn

义等^[23]使用质粒 DNA 评价法对北京 2008 奥运期间 PM₁₀ 的生物活性研究后认为, 北京 2008 奥运期间 PM₁₀ 生物活性明显降低. 蒋德海等^[24]通过对 2010 年广州亚运会期间的广东、东莞、佛山这 3 个城市的监测到的污染物浓度进行分析后认为, 限行减排措施会导致佛山 PM_{2.5} 浓度峰值时间相对广东东莞出现 1 h 左右时间“滞后”.

2014 年 11 月 6 ~ 12 日, 亚太经济合作组织 (APEC) 会议在北京市召开, 自 11 月 1 日起, 北京、天津、河北、山东、山西、内蒙古六省 (区) 市环境保护监测部门参照“奥运模式”开展联防联控^[25~27]. 本研究采集 APEC 会议期间大气 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 样品, 分析不同剂量浓度颗粒物对质粒 DNA 的损伤率, 与同年其他月份数据进行对比, 进一步评价颗粒物氧化性损伤能力变化规律. 另外将此次样品与奥运期间的历史数据和没有采取特殊管控措施的正常年进行对比, 从暴露参数的角度来评价三者差异.

1 材料与方法

1.1 样品采集

采样时间为 2014 年 10 ~ 12 月, 地点位于中国矿业大学 (北京) 综合楼 5 层平台. 经纬度为

E116°20'45.6", N39°59'37.1", 该采样点距地面高度大约 17.8 m, 位于西北城区的中关村高新科技园区, 东面紧临学院路, 距北四环大约 600 m, 周围没有发现大型局地工业污染源.

采集 PM₁₀ 样品的采样仪器由 Negeretti 采样头、转子流量计、真空泵组成, 采样滤膜为聚碳酸酯膜 (直径为 47 mm; 孔径为 0.6 mm), 采样器的流量设为 30 L·min⁻¹, 采样时间为 24 h; 利用 AIRMETRIC 公司的 Minivol 便携式采样仪同步采集 PM_{2.5} 样品, 每次采样时将采样器的流量设为 5 L·min⁻¹, 采样时间为 4 h, 每天采集 2 次, APEC 会议期间加强采样, 每日样品采集 3 次. 用 Kestral NK4500 型气象测量仪测量记录采样过程的气象要素. 滤膜放入恒温恒湿箱中平衡 24 h. 用十万分之一的精密电子天平 (Sartorius CPA225D 德国产) 称重. 采样后的滤膜恒温恒湿 48 h, 再次称重. 通过差减法 (采样后的滤膜质量减去采样前的滤膜质量) 计算出颗粒物的质量浓度, 具体采样信息如表 1 所示.

1.2 质粒 DNA 损伤评价实验

质粒 DNA 评价法是一种定量测量活性氧对质粒 DNA 的氧化性损伤能力的体外方法. 其基本原理是颗粒物表面携带的自由基会对超螺旋 DNA 产

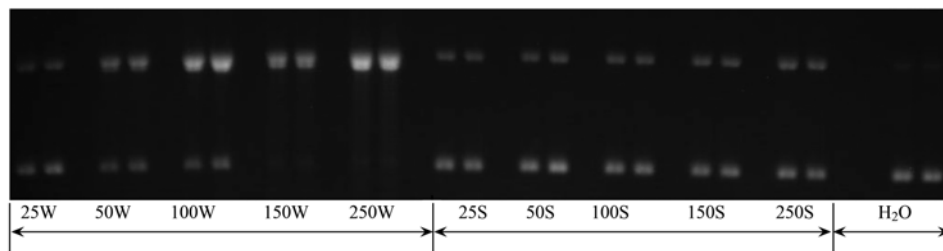
表 1 样品信息¹⁾
Table 1 Sampling information

项目	编号	天气	温度 /℃	湿度 /%	压强 /hPa	风力	PM ₁₀ 质量浓度 /μg·m ⁻³	PM _{2.5} 质量浓度 /μg·m ⁻³	PM _{2.5} /PM ₁₀
APEC 会议前	10-2	晴/雾	16.2	49.2	1 011.1	微风	51	54	1.06
	10-5	晴/晴	18.4	60.1	1 011.2	3~4 级	40	29	0.73
	11-4	多云/阴	14.2	39.6	1 006.9	微风	135	94	0.70
APEC 会议期间	11-5	晴/晴	17.3	23.6	1 007.6	3~4 级	91	73	0.80
	11-7	晴/晴	4.3	74.5	1 019.5	微风	67	41	0.61
	11-8	晴/晴	6.3	72.6	1 016.9	微风	77	62	0.81
	12-8	晴/晴	3.5	43.4	1 023.7	微风	80	55	0.69
APEC 会议后	12-9	霾/小雪	-1	79.1	1 017.6	微风	280	216	0.77
	12-10	晴/晴	2.7	35.4	1 017.3	5~6 级	216	127	0.59

1) PM_{2.5} 采样时间为 3 h, PM₁₀ 采样时间为 24 h

生氧化性损伤, 最初引起超螺旋 DNA 松弛, 进一步损伤会导致 DNA 线化^[28]. 超螺旋、松弛、线化等 3 种形态的 DNA 在电泳仪中的电泳淌度不同, 可在电泳仪中将 3 种 DNA 在琼脂糖凝胶中分离开来进行定量. 详细实验步骤见文献^[20]. 本文对每个样品进行全样与水溶样品的 DNA 损伤率数据比较, 并按不同剂量水平进行分析. 使用紫外凝胶成像系统对凝胶成像, 成像图如图 1 所示. 其中 W 表示该样品

的全样, S 表示该样品的水溶样, H₂O 表示空白对照. 使用 Syngene Genetools 软件对凝胶中不同形态 DNA 的光密度进行定量分析和统计, 从而得到不同剂量浓度颗粒物对 DNA 的损伤率. 每组剂量水平的样品均设置平行样, 以便对照检验实验的准确性; 另外, 为排除客观因素的影响, 每个样品均设置一个不加样品的空白滤膜对照. 实验结果取两个平行样品的平均值, 再扣除空白对照的影响^[13, 20, 29].



W 表示全样品; S 表示水溶样品; 单位为 $\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$

图1 2014年APEC会议期间 PM_{10} 样品对质粒DNA的氧化性损伤凝胶图

Fig. 1 Gel images showing oxidative damages on supercoiled DNA induced by PM_{10} samples collected during the 2014 APEC

2 结果与讨论

2.1 APEC会议前后 $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 质量浓度变化规律

在采取联防联控措施后,APEC期间北京周边地区工地停工,机动车限行(从11月3日起实施)^[25],连续数天的3~4级风使得北京空气质量优良.本次研究中,对采集的样品称重后算出 $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 质量浓度(表1),对比APEC之前(10月)、期间(11月)、之后(12月)的数据可以看出,APEC限行期间, $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 的质量浓度整体呈下降趋势,说明限行后北京市空气质量明显有好转.再将这一阶段的质量浓度均值与同期数据比较,发现可吸入颗粒物的质量浓度明显低于12月重污染事件时期,即APEC会议期间空气质量得到明显改善.

2.2 APEC会议期间 $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 的氧化性损伤能力

选取APEC会议期间的大气 $\text{PM}_{2.5}$ 及 PM_{10} 样品(编号11-4、11-5、11-7、11-8),分别按25、50、100、150、250 $\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$ 的剂量水平进行质粒DNA损伤评价实验,再选取2014年10~12月的大气 PM_{10} 样品(包括正常天气和污染天),按25、50、100、150、250 $\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$ 的剂量水平进行质粒DNA损伤评价实验,将结果汇总成表2.对所得结果运用SPSS 17.0软件对实验结果进行检验^[30~32].结果显示,信度系数为0.931,大于0.9说明结果信度很好,即本实验结果稳定可靠.

但是只比较其中一个剂量水平是不够严谨的,如编号11-8的 PM_{10} 全样品的损伤高达85.15%,远高于其他样品的损伤,但编号11-8的水溶成分的损伤又与其他样品差别不大,由此可根据五点作图法,由已有浓度的损伤率作出拟合曲线,计算出导致30% DNA损伤所需要的剂量,即TD30值.在表2尾部添加一栏各样品对应的TD30值,通过对比不同样品的TD30值,说明样品氧化性.当TD30值越高,说明造成同水平损伤所需要的样品越多,即样品

氧化性越小即毒性越小.

由表2的数据可以看出,2014年11月的 $\text{PM}_{2.5}$ 样品量的整体损伤较小,最大剂量水平的损伤率也不到35%,而 PM_{10} 样品中的损伤最大剂量水平下均大于40%,可能是样品中颗粒物粒径介于2.5~10 μm 之间的颗粒物造成了差额损伤.因此本研究的重点放在此次采集到的 PM_{10} 样品上.

2.2.1 APEC会议前后 PM_{10} 全样品和水溶部分不同剂量水平下DNA损伤率的比较

对比表2中的不同 PM_{10} 样品造成的损伤,即各组全样品和水溶样,发现样品全样品和自身同剂量水平水溶样的DNA损伤率的数据接近,而水溶样损伤率总是等于或略小于全样品损伤率,其中的 PM_{10} 总样本量为45,全样品损伤大于水溶样损伤次数为37,使用SPSS 17.0对命题“全样品损伤明显大于或等于水溶样损伤”进行卡方检验,结果其中Sig.值小于0.0001说明该命题成立,即全样品的损伤大于或近乎等于水溶样的损伤.得出此次样品中大气颗粒物全样品部分的氧化性损伤成分均大于或近乎等于水溶部分的,进而说明颗粒物氧化性损伤成分多来自于水溶组分.

由表2可见,无论是正常天气还是轻度污染天气,此次研究期间 PM_{10} 对质粒DNA的氧化性损伤均具有随剂量水平依次递增的规律,在150 $\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$ 或者250 $\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$ 剂量下达到最大值.在本课题组之前的研究中,当最大剂量设置为250 $\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$ 时,损伤率达到最大值.

2.2.2 APEC会议期间不同时间段 PM_{10} 氧化性损伤能力的对比

本研究将2014年10~12月的大气 PM_{10} 样品,按月份分为APEC会议前中后3个阶段,即10月样品代表APEC前的清洁天气,11月代表采取了联防联控措施的APEC期间代表天气,12月代表政策解除后的一次污染天气.将数据汇总制成图2.

表 2 APEC 会议期间不同剂量水平 PM_{2.5} 样品/PM₁₀ 样品的氧化性损伤

Table 2 Percentages of DNA damage induced by the PM _{2.5} /PM ₁₀ emitted from different samples during APEC conference							
样品编号	样品状态	PM _{2.5} /PM ₁₀ 在不同剂量水平下的损伤/%					TD30 ¹⁾ /μg·mL ⁻¹
		25 μg·mL ⁻¹	50 μg·mL ⁻¹	100 μg·mL ⁻¹	150 μg·mL ⁻¹	250 μg·mL ⁻¹	
10-2	全样品	— ²⁾ /22.35	—/28.67	—/30.52	—/30.02	—/34.87	130.92
	水溶样	—/21.04	—/23.17	—/24.74	—/30.73	—/29.29	223.82
10-5	全样品	—/25.06	—/29.82	—/31.63	—/33.94	—/51.19	74.66
	水溶样	—/26.09	—/29.94	—/35.00	—/37.28	—/51.48	59.48
11-4	全样品	23.83/23.22	22.63/23.89	24.30/32.82	26.37/41.57	29.28/41.41	86.67
	水溶样	22.18/20.61	22.95/20.57	23.71/22.28	26.67/38.01	34.43/43.00	124.79
11-5	全样品	14.43/26.85	12.59/28.09	11.83/24.58	17.85/25.31	25.27/30.41	362.94
	水溶样	10.41/20.70	11.65/26.29	11.12/22.84	15.59/24.55	18.77/26.30	493.29
11-7	全样品	13.1/29.03	13.12/30.18	14.84/29.47	16.81/34.99	24.12/39.54	26.21
	水溶样	11.43/17.91	12.99/18.23	13.81/21.07	15.17/23.12	18.64/33.55	159.95
11-8	全样品	13.8/18.12	13.09/22.66	11.77/53.13	18.35/65.93	25.4/77.39	12.03
	水溶样	10.97/17.18	11.33/19.87	11.06/17.29	14.7/20.48	18.6/24.09	275.63
12-8	全样品	—/27.29	—/23.22	—/38.54	—/53.88	—/66.33	25.52
	水溶样	—/23.37	—/26.47	—/27.86	—/26.78	—/32.84	9.32
12-9	全样品	—/28.27	—/29.35	—/34.37	—/56.94	—/64.33	32.11
	水溶样	—/19.99	—/21.57	—/23.91	—/36.91	—/33.81	86.1
12-10	全样品	—/25.07	—/23.61	—/28.10	—/29.61	—/26.36	25.52
	水溶样	—/21.48	—/23.30	—/23.88	—/21.42	—/22.78	9.32

1) 根据线性拟合方程求得; 2) 表示当天采集的 PM_{2.5} 样品未做质粒 DNA 氧化性损伤实验

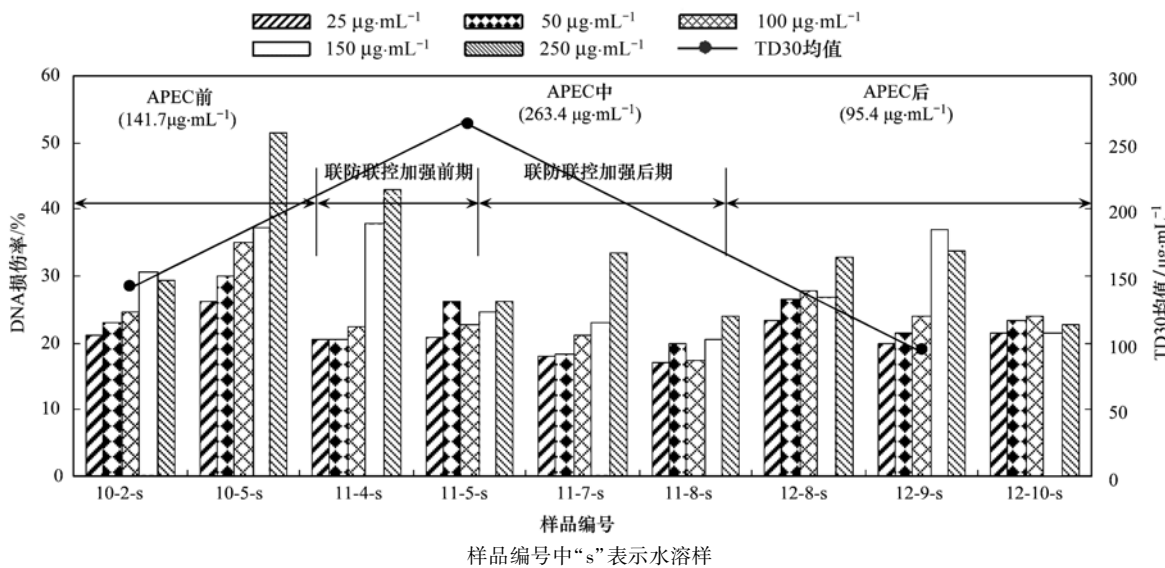


图 2 北京市 2014 年 APEC 会议前中后 PM₁₀ 水溶性样品的 DNA 损伤率

Fig. 2 DNA damage rate of PM₁₀ samples before, during and after 2014 APEC conference in Beijing City

从整体上看,APEC 中的样品对质粒 DNA 的损伤率明显高于前后两个月,TD30 阶段均值对比,APEC 中的值最大为 263.4 μg·mL⁻¹,而与同年上下两个月数据对比,TD30 均值高于 10 月和 12 月的值;即 APEC 会议期间颗粒物的氧化性最小,有害程度最低.从 APEC 会议期间看,由于会议期间的气候原因,11 月 4 日有轻微污染情况出现,随后 11 月 6 日起北京开始大幅降温,11 月 5 日上午,偏北

风将逐渐加大到 4 级左右,有利于污染物的扩散,能见度转好.到了 11 月 6 日,气温会出现较大幅度的下降,风力加大,有利于污染物的扩散,同时,环保部门也加大了控制力度.因此将 11 月样品分为两个阶段:联防联控加强前期和联防联控加强后期.挑出这 3 个阶段具有代表性的样品的水溶样进行实验,第一阶段中 11 月 5 日到达损伤最低值,然后第二阶段开始的 11 月 7 日损伤率有所反弹,而限制措施结束后,

样品的损伤率没有马上反弹,而是维持了一段较低值,说明限行令对大气污染控制起到了良好的作用,大气中有毒有害物质的含量在明显减少.

2.2.3 APEC 会议期间 PM₁₀暴露毒性指数特征

本研究发现,就 PM₁₀的质量浓度而言,APEC 会议期间的值低于往年样品以及奥运会期间样品值^[23],但比较样品对 DNA 的氧化性损伤率时,APEC 会议期间样品明显低于 2004 年 7 月样品,略高于奥运期间 2008 年 8 月的数值. 因而生物活性不仅与采集到的样品质量浓度有关,也与实验中显示出来的对 DNA 的氧化损伤有明显关系. 在此引入一个 PM₁₀暴露毒性指数 TI (toxicity index) 的概念,PM₁₀的暴露毒性是指其单位体积气体所含颗粒物表现出来的对 DNA 的氧化性损伤程度. 即暴露毒性指数越大,人们暴露健康风险越高,即:

$$TI = \rho \times P_{DNA}$$

式中,TI 为 PM₁₀暴露毒性指数(toxicity index); ρ 为 PM₁₀的质量浓度($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$); P_{DNA} 为 PM₁₀全样品在 250 $\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$ 剂量水平对 DNA 的损伤率(%).

取表 2 中不同样品质量浓度数据和对质粒 DNA 氧化性损伤最大损伤率作为样品损伤率的代表值,即 250 $\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$,运用毒性指标公式进行换算,将结果绘制成表 3. 从毒性指数这一角度来讲,APEC 会议所在的 11 月中,毒性指数均值为 2 708.25. 同年 10 月清洁天气毒性指数均值为 1 912.99,与 11 月相近. 而 12 月污染天的毒性指数均值超过10 000,严重超过清洁天气的值. 与往年数据对比,APEC 会议期间,毒性指数高于1 000,而奥

运期间的毒性指数在1 000以下,2004 年样品的毒性指数高于5 000, 2004 年的毒性指数最高. 即 $TI(2008\text{ 年}) < TI(2014\text{ 年}) < TI(2004\text{ 年})$. APEC 限行措施实施天数约 10 d,中国环境保护部派出 16 个督导组督导治理行动,2014 年 APEC 会议期间北京放假调休 6 d. 北京市市政府 10 月 9 日还同时发布了《关于 2014 年亚太经济合作组织会议期间对本市机动车和外省区市进京机动车采取临时交通管理措施的通告》. 11 月 3~12 日期间每天 03:00~24:00,本市核发号牌机动车和进京的外省、区、市机动车按车牌尾号实行单号单日、双号双日行驶. 河北省 APEC 空气质量保障工作指挥部发出《关于实施最高一级重污染天气应急减排措施的紧急通知》(冀气领办[2014]99 号). 山东省也制订《山东省 2014 年亚太经合组织会议空气质量保障措施》,确保会议期间山东主要大气污染物至少减排 30%^[27]. 但此次污染联防的效果可能不如奥运期间好,由于 2008 年奥运会处于夏季,正值北京雨季,扩散条件好,污染物排放总量处于低谷; APEC 期间是秋冬交替期,属于北京雾霾频发期,不利的气象扩散条件、季节性裸露地表,加上采暖季排放,无论是本地污染源还是区域传输,污染控制难度整体上远大于奥运会期间.

奥运会限行措施实施天数从 7~9 月,共计两个月^[33]. 限行周期远大于 APEC 会议期间,因此奥运期间 PM_{2.5}生物活性要比 APEC 期间的要低. 说明由于采取了限行措施,大气中 PM₁₀的毒性明显降低,而限制措施越严格,限制时间越长,毒性降低程度越明显.

表 3 全样品与水溶样品不同浓度下的 DNA 损伤率及毒性指标(TI)

Table 3 DNA damage rate in different concentrations and TI of the whole and the water soluble samples

样品编号	采样时间	质量浓度 / $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	全样在 250 $\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$ 剂量水平下的 DNA 损伤率/%	毒性指数(TI)
10-2	2014-10-02	51	34.87	1 139.85
10-5	2014-10-05	40	51.19	1 002.40
11-5	2014-11-05	91	30.41	2 767.31
11-7	2014-11-07	67	39.54	2 649.18
12-9	2014-12-09	280	64.33	8 218.00
12-10	2014-12-10	216	26.36	5 415.12
8-8	2008-08-08	24.6	33.31	819.43
8-20	2008-08-20	24.7	40.11	990.72
7-4	2004-07-04	109.0	63	6 867.00

3 结论

(1)APEC 会议期间 PM_{2.5}总体上氧化性损伤能力小于 PM₁₀,PM_{2.5}在最高剂量水平(250 $\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$)的损伤率小于 35%,而 PM₁₀在该剂量水平下对

DNA 损伤率均大于 40%. PM₁₀全样和 PM_{2.5}全样的氧化性损伤能力均大于或近似于水溶部分的值,说明颗粒物的氧化性损伤能力主要来自于其水溶组分.

(2)APEC 会议期间 PM₁₀的 TD30 值与前后两

个月比较,大小顺序为: TD30(APEC 期间) > TD30(APEC 前) > TD30(APEC 后),即氧化性损伤能力顺序为: APEC 后 > APEC 前 > APEC 期间. 此外, APEC 会议期间采取联防联控措施后的两个阶段各样品对质粒 DNA 造成的损伤率整体呈下降趋势,但两个阶段之间有的样品损伤率有略微反弹.

(3)与 2008 年夏季奥运会数据和没有采取特殊管控措施的 2004 年数据比较, APEC 会议期间污染物浓度有明显降低,但是比较暴露毒性指数发现: TI(2008 年) < TI(2014 年) < TI(2004 年),即政策干预时间越长,力度越大,大气颗粒物的毒性越低;限制周期越长、力度越大,效果越明显.

参考文献:

- [1] 郭新彪,魏红英. 大气 PM_{2.5} 对健康影响的研究进展[J]. 科学通报, 2013, **58**(13): 1171-1177.
- [2] 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.
- [3] 王文朋,沈惠平,黄云彪,等. 大气 PM_{2.5} 细颗粒物污染状况及对人体健康的影响[J]. 上海预防医学, 2015, **27**(5): 290-294, 297.
- [4] 邵龙义,时宗波,黄勤. 都市大气环境中可吸入颗粒物的研究[J]. 环境保护, 2000, (1): 24-26, 29.
- [5] 殷永文,程金平,段玉森,等. 上海市霾期间 PM_{2.5}、PM₁₀ 污染与呼吸科、儿呼吸科门诊人数的相关分析[J]. 环境科学, 2011, **32**(7): 1894-1898.
- [6] 白志鹏,蔡斌彬,董海燕,等. 灰霾的健康效应[J]. 环境污染与防治, 2006, **28**(3): 198-201.
- [7] 郭辰,刘涛,赵晓红. 大气细颗粒物的健康危害机制及拮抗作用研究进展[J]. 环境与健康杂志, 2014, **31**(2): 185-188.
- [8] 游燕,白志鹏. 大气颗粒物暴露与健康效应研究进展[J]. 生态毒理学报, 2012, **7**(2): 123-132.
- [9] 周林,邵龙义,刘君霞,等. 宣威肺癌高发区室内 PM₁₀ 对肺泡上皮细胞凋亡的影响[J]. 中国环境科学, 2010, **30**(7): 1004-1008.
- [10] 宋宇,唐孝炎,方晨,等. 北京市大气细粒子的来源分析[J]. 环境科学, 2002, **23**(6): 11-16.
- [11] 马锋敏,高庆先,周锁铨,等. 北京及周边地区一次典型大气污染过程的模拟分析[J]. 环境科学研究, 2008, **21**(1): 30-36.
- [12] 陈多宏,何俊杰,张国华,等. 不同气团对广东鹤山大气超级监测站单颗粒气溶胶理化特征的影响[J]. 生态环境学报, 2015, **24**(1): 63-69.
- [13] Shao L Y, Hou C, Geng C M, *et al.* The oxidative potential of PM₁₀ from coal, briquettes and wood charcoal burnt in an experimental domestic stove [J]. Atmospheric Environment, 2016, **127**: 372-381.
- [14] Li W J, Shao L Y, Zhang D Z, *et al.* A review of single aerosol particle studies in the atmosphere of East Asia: morphology, mixing state, source, and heterogeneous reactions[J]. Journal of Cleaner Production, 2016, **112**(Part 2): 1330-1349.
- [15] 向华丽,杨俊,仇珍珍,等. 隧道工人的 PM₁₀ 职业暴露特征调查分析及其健康风险评价[J]. 环境科学, 2015, **36**(8): 2768-2774.
- [16] 于云江,杨林,李良忠,等. 兰州市大气 PM₁₀ 中重金属和多环芳烃的健康风险评价[J]. 环境科学学报, 2013, **33**(11): 2920-2927.
- [17] Huang W, Zhu T, Pan X C, *et al.* Air Pollution and autonomic and vascular dysfunction in patients with cardiovascular disease: interactions of systemic inflammation, overweight, and gender [J]. American Journal of Epidemiology, 2012, **176**(2): 117-126.
- [18] 张琳,牛静萍,徐佳,等. 大气细颗粒物 PM_{2.5} 对大鼠睾丸组织细胞周期的影响[J]. 生态毒理学报, 2009, **4**(2): 271-275.
- [19] 刘芳盈,王菲菲,丁明玉,等. 燃煤细颗粒物对血管内皮细胞 EA.hy926 的细胞毒性[J]. 中国环境科学, 2012, **32**(1): 156-161.
- [20] 胡颖,邵龙义,沈蓉蓉,等. 北京市 PM_{2.5} 对 DNA 的氧化性损伤规律分析[J]. 中国环境科学, 2013, **33**(10): 1863-1868.
- [21] 谢元博,李巍. 基于能源-环境情景模拟的北京市大气污染对居民健康风险评价研究[J]. 环境科学学报, 2013, **33**(6): 1763-1770.
- [22] Sun Y L, Wang Z F, Wild O, *et al.* "APEC Blue" secondary aerosol reductions from emission controls in Beijing [J]. Scientific Reports, 2016, **6**: 20668.
- [23] 邵龙义,宋晓焱,刘君霞,等. 北京 2008 奥运期间 PM₁₀ 的单颗粒形貌类型及生物活性研究[J]. 环境科学, 2009, **30**(12): 3448-3454.
- [24] 蒋德海,吴兑,邓雪娇,等. 2010 年广州亚运限行减排对大气环境的影响[J]. 热带气象学报, 2012, **28**(4): 527-532.
- [25] 何晓朗,谭吉华,郭送军,等. 2014 年北京 APEC 期间大气醛酮污染物的污染特征与来源分析[J]. 环境科学, 2016, **37**(3): 801-806.
- [26] Zhang J k, Wang L L, Wang Y H, *et al.* Submicron aerosols during the Beijing Asia-Pacific economic cooperation conference in 2014 [J]. Atmospheric Environment, 2016, **124**(Part B): 224-231.
- [27] 刀谓,朱红霞,谭丽,等. 2014 年 APEC 期间北京及周边重点城市 PM_{2.5} 中水溶性离子变化特征[J]. 环境化学, 2015, **34**(8): 1389-1395.
- [28] 李金娟,邵龙义,李慧,等. 阴霾天气 PM₁₀ 的微观特征及生物活性研究[J]. 地球与环境, 2010, **38**(2): 165-169.
- [29] 邵龙义,沈蓉蓉,王静,等. 澳门可吸入颗粒物的氧化性损伤能力及原因探讨[J]. 中国科学: 地球科学, 2013, **43**(5): 824-830.
- [30] 杜鸿善,贾璋. 实验数据的统计检验及其处理[J]. 原子能科学技术, 1987, **21**(4): 397-403.
- [31] 刘庆武,胡志艳. 如何用 SPSS_SAS 统计软件进行正态性检验[J]. 湘南学院报(自然科学版), 2005, **7**(3): 56-58.
- [32] 孙逸敏. 利用 SPSS 软件分析变量间的相关性[J]. 新疆教育学院学报, 2007, **23**(2): 120-123.
- [33] 孔茜,吴烨,杨柳,等. 奥运期间北京典型交通环境气态污染物特征及人体吸入剂量[J]. 环境科学学报, 2010, **30**(2): 281-286.

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>Desulfonitrospira</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