

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第33卷 第5期

Vol.33 No.5

2012

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

区域空气质量模拟中查表法的应用研究	谢旻,王体健,江飞,李树,蔡彦枫,庄炳亮(1409)
长江三角洲地区秸秆露天焚烧大气污染物排放清单及其在空气质量模式中的应用	苏继峰,朱彬,康汉青,王红磊,王体健(1418)
北京及周边城市一元脂肪酸大气颗粒物干沉降通量及来源分析研究	徐小娟,李杏茹,王跃思,刘晨书,潘月鹏,王英锋(1425)
上海大气超细颗粒物和工业纳米颗粒的表征及细胞毒性的比较研究	张睿,吕森林,尚羽,易飞,任晶晶,郝晓洁,安静,吴明红(1431)
青岛市大气 PM _{2.5} 元素组成及来源研究	李秀镇,盛立芳,徐华,屈文军(1438)
冬季天津家庭室内空气颗粒物中邻苯二甲酸酯污染研究	王夫美,陈丽,焦姣,张雷波,姬亚芹,白志鹏,张利文,孙增荣,张星梅(1446)
再悬浮装置在大气 PM _{2.5} 源谱分析中的应用	段恒轶,钱冉冉,吴水平,印红玲(1452)
黔西南煤燃烧产物微量元素分布特征及富集规律研究	魏晓飞,张国平,李玲,项萌,蔡永兵(1457)
三峡水库不同运行状态下支流澎溪河水-气界面温室气体通量特征初探	蒋滔,郭劲松,李哲,方芳,白镭,刘静(1463)
香溪河库湾夏季温室气体通量及影响因素分析	王亮,肖尚斌,刘德富,陈文重,王雨春,陈小燕,段玉杰(1471)
臭氧浓度升高与土壤湿度对农田土壤微生物呼吸温度敏感性的影响	陈书涛,张勇,胡正华,史艳妹,沈小帅(1476)
托木尔峰青冰滩 72 号冰川径流水化学特征初步研究	赵爱芳,张明军,李忠勤,王飞腾,王圣杰(1484)
五大连池水溶性有机磷矿化特性的研究	张斌,席北斗,赵越,魏自民,白雪,王曼林(1491)
7 条环太湖河流沉积物氮含量沿程分布规律	卢少勇,远野,金相灿,焦伟,吴瑶洁,任德有,周羽化,陈雷(1497)
巢湖十五里河沉积物氮磷形态分布及生物有效性	李如忠,李峰,周爱佳,童芳,钱家忠(1503)
北运河系地表水近 10 年来水质变化及影响因素分析	郭婧,荆红卫,李金香,李令军(1511)
东莞运河排涝对东江河网水质影响分析	孙磊,毛献忠,黄旻旻(1519)
北京平原区地下水污染源识别与危害性分级	陆燕,何江涛,王俊杰,刘丽雅,张小亮(1526)
地下水曝气修复过程的三维数值模拟	李恒震,胡黎明,王建,武晓峰,刘培斌(1532)
垂向水动力扰动机的蓝藻控制效应数值实验研究	邹锐,周璟,孙永健,嵇晓燕,岳佳,刘永(1540)
新型生物岛栅中污染物去除的微生物机制研究	高明瑜,谢慧君,王文兴(1550)
营养盐水平对念珠藻胞外有机物产生的影响	齐飞,刘晓媛,徐冰冰,黄岳,封莉,张立秋(1556)
水网藻种植水对铜绿微囊藻生长的抑制作用研究	傅海燕,柴天,赵坤,刘智峰,张明真,侯明,许鹏成(1564)
酞酸酯在模拟海河苕草微宇宙中的消减和分布特征	迟杰,杨青(1570)
电子束辐射对铜绿微囊藻毒素产生和释放的抑制作用研究	刘书宇,吴明红,姜钦鹏(1575)
青铜峡灌区典型排水沟水污特征解析	李强坤,胡亚伟,罗良国(1579)
四溴双酚 A 的辐射降解研究	李杰,徐殿斗,徐刚,马玲玲,吴明红(1587)
污泥基活性炭催化臭氧氧化降解水中微量布洛芬的效能研究	王红娟,齐飞,封莉,张立秋(1591)
高水力负荷对人工湿地处理精养虾塘排水效果的影响	李怀正,章星异,陈卫兵,叶剑峰(1597)
城市污水生物脱氮系统出水经氯胺消毒形成 NDMA 的影响因素研究	尚晓玲,李咏梅(1604)
利用淀粉基共混物作为反硝化固体碳源的研究	沈志强,吴为中,杨春平,陈佳利,王建龙(1609)
好氧污泥颗粒化过程中 Zeta 电位与 EPS 的变化特性	王浩宇,苏本生,黄丹,崔晓姣,竺建荣(1614)
活性污泥对病毒的生物吸附特性	周玉芬,郑祥,雷洋,陈迪(1621)
阴离子型聚丙烯酰胺在离子交换膜上的吸附规律	邓梦洁,于水利,时文歆,衣雪松(1625)
两性修饰膨润土对苯酚的吸附及热力学特征	李婷,孟昭福,张斌(1632)
表面活性剂对苯并[a]芘在黑炭表面吸附解吸的影响	张景环,陈春溶,张玮航,栗桂州(1639)
南京市 4 个污水处理厂的活性污泥中细菌的分离鉴定和抗生素耐药性分析	葛峰,郭坤,周广灿,张会娟,刘济宁,戴亦军(1646)
焦化废水中苯酚降解菌筛选及其降解性能	陈春,李文英,吴静文,李静(1652)
Xanthobacter flavus DT8 降解二噁英的特性研究	金小君,陈东之,朱润晔,陈静,陈建孟(1657)
未开发油气田地地表炔氧化菌空间定量分布	满鹏,齐鸿雁,呼庆,马安周,白志辉,庄国强(1663)
矿化垃圾中氧化甲烷兼性营养菌的筛选与生物特性研究	赵天涛,项锦欣,张丽杰,全学军,赵由才(1670)
长江中游干流及 22 条支流表层水中多氯联苯的分布特征及其潜在风险	李昆,赵高峰,周怀东,曾敏,廖柏寒,吴正勇,张盼伟,郝红(1676)
典型血吸虫病区表层水中酚类化合物的污染特征及潜在风险	吴正勇,赵高峰,周怀东,李科林,曾敏,李昆,张盼伟,郝红(1682)
闽江福州段沉积物中多环芳烃的空间分布异质性研究	陈卫锋,倪进治,杨红玉,魏然,杨玉盛(1687)
三峡库区蓄水运用期表层沉积物重金属污染及其潜在生态风险评价	王健康,高博,周怀东,陆瑾,王雨春,殷淑华,郝红,袁浩(1693)
典型电器工业区河涌沉积物中重金属的分布和潜在生态风险	邓代永,孙国萍,郭俊,张宏涛,张琴,许政英(1700)
密云水库上游金属矿区土壤中重金属形态分布及风险评价	高彦鑫,冯金国,唐磊,朱先芳,刘文清,李宏兵(1707)
湘西花垣矿区土壤重金属污染及其生物有效性	杨胜香,袁志忠,李朝阳,龙华,唐文杰(1718)
基于 GIS 的某训练场土壤重金属污染评价	刘玉通,方振东,杨琴,谢朝新,王大勇,毛华军(1725)
土壤质地和湿度对 SVE 技术修复苯污染土壤的影响	刘少卿,姜林,姚玉君,李艳霞,刘希涛,林春野(1731)
蒙脱土、高岭土和针铁矿对 DNA 吸附与解吸特征	王慎阳,饶伟,王代长,张亚楠,李腾,唐冰培,杨世杰(1736)
LNAPL 在砂质含水层中动态迁移的电阻率法监测试验研究	潘玉英,贾永刚,郭磊,李进军,单红仙(1744)
亚临界水解预处理稻草秸秆制备活性炭及表征	董宇,申哲民,雷阳明,王茜,刘婷婷(1753)
蓝藻好氧堆肥及其氮素损失控制的研究	任云,崔春红,刘奋武,占新华,周立祥(1760)
固定化微生物技术修复 PAHs 污染土壤的研究进展	钱林波,元妙新,陈宝梁(1767)
《环境科学》征订启事(1483)	《环境科学》征稿简则(1620)
信息	(1490,1496,1586,1743)

上海大气超细颗粒物和工业纳米颗粒的表征及细胞毒性的比较研究

张睿¹, 吕森林^{1,2*}, 尚羽², 易飞¹, 任晶晶¹, 郝晓洁¹, 安静², 吴明红¹

(1. 上海大学环境与化学工程学院, 射线与应用研究所, 上海 200444; 2. 上海大学环境与化学工程学院, 环境污染与健康研究所, 上海 200444)

摘要: 采集了上海市石洞口地区 2010 年春季不同粒径大气颗粒物样品, 使用 ICP-AES 和 FESEM 技术分析了颗粒物的化学组成和微观特征, 比较了不同粒径的大气颗粒物与 3 种工业纳米颗粒物的生物活性。结果表明, 在染毒剂量为 25、50、100 和 200 $\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$ 时, 大气颗粒物水溶组分和不溶组分及工业纳米颗粒均可以抑制 A549 细胞生长活性并能诱导细胞产生活性氧 (ROS), 且大气细颗粒水溶组分生物活性最强, 在上述染毒剂量下对细胞生长活性的抑制率分别达到 13.31%、18.15%、20.43% 和 23.78%。在纳米尺度的颗粒物染毒组分中, 纳米 NiO 的生物活性最强, 在上述染毒剂量下对细胞生长活性的抑制率分别达到 11.81%、15.12%、17.62% 和 19.44%。因此, 大气细颗粒物水溶组分是最主要的毒性成分。

关键词: 大气颗粒和工业纳米颗粒; 质量浓度; 水溶组分; 不溶组分; 生物活性

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2012)05-1431-07

Comparison of Physicochemical Characterization of Shanghai Ambient Ultrafine Particles and Engineered Nano Particles and Their Cytotoxicity

ZHANG Rui¹, LÜ Sen-lin^{1,2}, SHANG Yu², YI Fei¹, REN Jing-jing¹, HAO Xiao-jie¹, AN Jing², WU Ming-hong¹

(1. Shanghai Applied Radiation Institute, School of Environmental and Chemical Engineering, Shanghai University, Shanghai 200444, China; 2. Institute of Environmental Pollution and Health, School of Environmental and Chemical Engineering, Shanghai University, Shanghai 200444, China)

Abstract: Ambient size-resolved particles in Shanghai atmosphere were collected at Shi Dong Kou sampling site during 2010 spring. Inductively coupled plasma atomic emission spectroscopy (ICP-AES) and field emission scanning electron microscopy (FESEM) were employed to investigate chemical elements and microscopic characterization of the ambient particles. Bioreactivity caused by the ambient particles and three kinds of engineered nano particles, NiO, ZnO and CeO₂, was compared. Our results demonstrated that growth activity of A549 decreased and their intracellular ROS production intensity increased after the cell exposure to particle solution with different dosage (25, 50, 100 and 200 $\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$). The lowest cell survival ratio was caused by soluble fraction of ambient fine particles, inhibition of cell viability were 13.31%, 18.15%, 20.43%, 23.78% respectively. However, the most toxic components among the ultrafine ambient particles and engineered nano particles was NiO, inhibition of cell viability were 11.81%, 15.12%, 17.62%, 19.44% respectively. From our results, we can conclude that the water-soluble fractions of the ambient fine particles are the most cytotoxic components among the measured particles.

Key words: ambient particles and engineered nano particles; mass concentration; water-soluble fractions; water-insoluble fractions; bioreactivity

可吸入颗粒物是指空气动力学直径 $D \leq 10 \mu\text{m}$ 的大气颗粒物。按其空气动力学直径, 可吸入颗粒物又可分为粗颗粒物 ($2.5 \mu\text{m} < D \leq 10 \mu\text{m}$, 本文将粒径在 $1.8 \sim 10 \mu\text{m}$ 的颗粒物作为粗颗粒)、细颗粒物 ($D \leq 2.5 \mu\text{m}$, 本文将粒径在 $0.1 \sim 1.8 \mu\text{m}$ 的颗粒物作为细颗粒)、超细颗粒物 (空气动力学直径 $D \leq 0.1 \mu\text{m}$)^[1]。流行病学研究表明, 大气颗粒物的质量浓度及其粒径与人群的发病率、死亡率关系密切^[2,3], 但颗粒物的致毒机制尚不明确^[4], 目前普遍认同的颗粒物致毒假说是颗粒物的氧化应激理论, 即大气颗粒物含有的一些过渡金属、有机物等能够

通过产生自由基对人体造成伤害。有学者从大气颗粒物的物理特征^[5]、化学元素组成^[6]等方面去研究大气颗粒物的毒性, 现在已知大气颗粒物中的过渡金属 Fe、Zn、Cu 可在肺液中通过 Fenton 反应释放自由基^[7]。与此同时, 由于纳米技术的飞速发展, 工业

收稿日期: 2011-07-12; 修订日期: 2011-09-26

基金项目: 国家自然科学基金项目 (10775094, 41073073); 上海市浦江人才计划项目; 上海市科委重点基础研究项目 (10JC1405500); 上海市教委科技创新重点项目 (11ZZ80); 上海市重点学科项目 (S30109)

作者简介: 张睿 (1986 ~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为大气毒理学, E-mail: liujinsuiyue_04@163.com

* 通讯联系人, E-mail: senlinlv@shu.edu.cn

纳米颗粒(如 NiO 、 TiO_2 等)已经开始大规模地用于橡胶合成^[8]、化妆品^[9]等行业中,纳米颗粒在生产和使用过程中就会有意或无意排放到大气中,成为大气颗粒的组成部分,纳米颗粒物的毒性研究也成为相关行业的研究热点^[10,11]。

上海作为国际金融中心和航运中心,其空气质量备受关注。但上海市环境质量公报^[12]显示,上海市大气的首要污染物仍为可吸入颗粒物,目前对上海大气颗粒物的研究也逐渐增多。翟立群等^[13]认为重金属元素主要吸附在细颗粒物上,且重金属含量与交通流量及机动车行驶速度有关;张元勋等^[14]发现上海市可吸入颗粒物中 S、As、Pb、Ni、Mn、Se 等污染元素更趋于富集在直径 $<2.5 \mu\text{m}$ 的细颗粒物中;Lu 等^[11]研究发现上海冬季大气粗颗粒物主要由矿物质组成,细颗粒物主要由飞灰和硫酸盐组成。目前,对上海市大气颗粒物的研究主要集中在大气粗颗粒和细颗粒的物理化学特征方面,鲜见有关大气超细颗粒生物活性的研究。此外,鉴于纳米物质的大规模生产以及其可能存在的环境健康风险,纳米物质的安全性正在受到关注^[15,16]。因此,比较大气超细颗粒与工业纳米颗粒物化特征及生物活性,以期为预防和治理颗粒物污染提供必要的科学依据。

1 材料与方法

1.1 样品采集

大气颗粒物样品采样点设在上海石洞口某中学建筑物楼顶,采样点离地面约 10 m,距主干道约 30 m,周围地势较为开阔,无高大建筑物阻挡,采样点周围多是发电、冶金等工业企业,为典型的工业污染区,位置如图 1 所示。使用美国 MSP 公司的 MOUDI-125B 微孔均匀沉积式碰撞采样器,对粒径 $<10 \mu\text{m}$ 的大气颗粒物分 13 级采样,从第 1 ~ 13 级 (Stage01 ~ Stage13) 对应的切割粒径分别为:



图 1 采样点位置示意
Fig. 1 Sampling site

0.010、0.018、0.032、0.056、0.10、0.18、0.32、0.56、1.0、1.8、3.2、5.6、10 μm ,采样流量(Q)为 $10 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$,使用聚碳酸酯膜 (Millipore, 美国) 收集 (滤膜直径为 47 mm,孔径为 $0.6 \mu\text{m}$),采样时间(t)为 48 h,采样时记录温度、湿度等气象条件。将采样前后的滤膜恒温恒湿 48 h 后用日本 AND 天平 (0.00001 g) 称重,计算出采样前后滤膜的质量 ($m_{\text{前}}$ 、 $m_{\text{后}}$),据此计算出质量浓度(ρ),计算公式为: $\rho = (m_{\text{后}} - m_{\text{前}}) / (Q \times t)$ 。用于本实验及分析的大气颗粒物样品见表 1。工业纳米 CeO_2 、纳米 ZnO 和纳米 NiO 颗粒均购买于 Sigma-Aldrich 公司(英国),尺寸分别为 20 ~ 30、90 ~ 210、10 ~ 20 nm,表面积分别为 24、50、92 $\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ 。

表 1 分析所用样品信息

Table 1 Sample information for analysis

编号	采样日期	温度 /℃	湿度 /%	风速 /km·h ⁻¹	风向
27	2009-05-08 ~ 2009-05-10	26	61	14	ES
28	2009-05-10 ~ 2009-05-12	25	76	15	ES
29	2009-05-13 ~ 2009-05-15	23	68	15	ES
30	2009-05-22 ~ 2009-05-24	21	90	7	WN
31	2009-05-24 ~ 2009-05-26	22	77	7	WN

1.2 微观形貌

由于工业纳米颗粒粒径细小,实验过程中发现采用透射电镜观测要比使用扫描电镜观测到的图像更为清晰,因此本研究采用透射电镜 (JEM-2010F, 日本) 观测工业纳米 ZnO 、纳米 NiO 及纳米 CeO_2 颗粒的微观形貌,使用场发射扫描电镜 (JSM-6700F, 日本) 观测大气颗粒物微观形貌。场发射扫描电镜的实验步骤如下:将导电胶粘贴到样品桩表面,用剪刀把滤膜裁下约 1/10,用镊子把滤膜粘贴到导电胶表面上,将处理完成后的样品放入离子溅射仪 (JFC-1600x, 日本) 喷罐中喷金,最后将样品放入电镜的样品仓中,抽真空后进行观察、拍照。透射电镜实验步骤如下:将适量样品溶于无水乙醇,超声振荡 10 min,然后使用移液枪吸取少量液体滴到铜网上,自然晾干,最后放入电镜的样品仓中,抽真空后进行观察、拍照。

1.3 化学元素浓度

使用 ICP-AES (电感耦合等离子体发射光谱仪) 对样品进行元素分析,实验步骤如下:将每级样品放入消解杯中,采用 HNO_3 - H_2O_2 体系 (其体积比为 3:1,即 3 mL 浓 HNO_3 和 1 mL H_2O_2) 将颗粒物溶解,样品的消解在 ETHOS1600 (Milestone, 美国) 微波站上进行。颗粒物样品在酸溶液中浸泡 2 h 后,冷

却消解罐,再对样品进行富集 30 min,将样品过滤至烧杯,然后将消解溶液转移到 20 mL 容量瓶中,加入 1 mL $200 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 In 作为内标元素,最后用 2% 的稀 HNO_3 定容至 20 mL. 分析得到 Na、Mg、Al、Ca、Fe、V、Cr、Mn、Co、Ni、Cu、Zn、As、Cd、Sb、Ba、Pb 共 17 种元素的质量浓度,最后,根据分析样品的质量浓度($c_{\text{液}}$)和样品采集时的空气体积($V_{\text{空}}$)计算出空气中不同粒径颗粒物各元素的质量浓度($c_{\text{空}}$). 计算公式为: $c_{\text{空}} = c_{\text{液}} \times 20 \times 1000 / V_{\text{空}}$. 最后分别将粒径在 1.8 ~ 10、0.10 ~ 1.8、0.010 ~ 0.10 μm 不同粒径段相同元素的质量浓度($c_{\text{空}}$)相加,分别作为大气粗、细及超细颗粒中各元素的质量浓度. 实验测量一组样品,重复测验 3 次,结果取 3 次实验数据平均值.

1.4 染毒溶液的配制

分别将粒径段为 1.8 ~ 10、0.10 ~ 1.8、0.010 ~ 0.10 μm 采有大气颗粒物的滤膜放入 15 mL 离心管中,加入 5 mL (V) 超纯水,使滤膜完全浸入,超声振荡 1 h $\times$ 3 次,取出滤膜,干燥后称量,根据滤膜前后的质量($m_{\text{前}}$ 、 $m_{\text{后}}$),分别计算出大气粗、细及超细颗粒物的剥离质量浓度(ρ),计算公式为: $\rho = (m_{\text{前}} - m_{\text{后}}) / V$. 以 5 000 $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$ 的转速离心振荡 30 min,取 2 mL 上清液为水溶组分,剩余组分进行冷凝干燥后加入 3 mL 超纯水,称为不溶组分;工业纳米颗粒溶液用工业纳米颗粒和超纯水配制,放入超声振荡仪(SK3300H,上海科导)中超声振荡 10 min $\times$ 3 次. 大气颗粒物和工业纳米颗粒最后按照所需配成最终质量浓度.

1.5 MTT 法测试 A549 细胞存活率

MTT 实验是一种通过测定细胞线粒体琥珀酸脱氢酶的功能来反映细胞活性的方法. 用含 10% 胎牛血清的培养基配成单个细胞悬液,以每孔 $10^3 \sim 10^4$ 个细胞接种到 96 孔细胞培养板,每孔接种体积 200 μL ,置于 37 $^{\circ}\text{C}$ 5% CO_2 培养箱培养,24 h 后吸掉上清废液,加入适量 D-Hank's 清洗细胞,然后每孔加入 100 μL 的染毒溶液,设置浓度组为 25、50、100、200 $\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$,每组设置 3 平行孔,并设对照组. 由于超细颗粒物剥离浓度较低,故只有 25、50 $\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$ 这 2 个浓度,对照孔只加入 100 μL 的培养基,不加入染毒溶液. 4 h 后,每孔加入 100 μL 含 MTT 的培养基,继续培养 4 h,然后使用适量 D-Hank's 清洗细胞,再加入 100 μL DMSO 溶液. 振荡 10 min 后,在酶标仪上测定吸光度值(D),测定波长为 490 nm. 细胞存活率按下列公式计算:
细胞存活率 = (受试组 D 值/对照孔 D 值) $\times$ 100%

实验重复 3 次,结果取 3 次实验数据平均值.

1.6 细胞内活性氧(reactive oxygen species, ROS)含量的检测

DCFH-DA 是一种非极性、非荧光的化学物质,能够穿透细胞膜,被细胞内的酶降解为二氯荧光素(DCFH),DCFH 可被活性氧(ROS)自由基氧化成为高效荧光物质 DCF. 因此,可通过测定细胞的荧光强度来反映细胞内 ROS 的含量^[17]. 将 3 mL 的 1×10^5 个 $\cdot\text{mL}^{-1}$ 细胞悬浮液接种于 6 孔培养板中,置于培养箱中培养,24 h 后加入适量的 D-Hank's 进行清洗,然后加入染毒溶液,每组设 3 个平行孔,并设对照组,对照组只接种细胞,不加入染毒溶液. 染毒 4 h 后,用 D-Hank's 清洗细胞 3 次,加入 2 mL 的荧光试剂,置于培养箱中培养,30 min 后用 D-Hank's 清洗细胞 3 次,然后在倒置荧光显微镜下观察荧光强度及荧光分布、拍照. 对所拍的图片利用 IPWIN60 荧光分析软件处理得出荧光强度. 实验重复 3 次,结果取 3 次实验数据平均值.

2 结果与讨论

2.1 大气颗粒物质量浓度分析

图 2 为石洞口地区 2010 年 5 月大气颗粒物的质量浓度(采用表 1 中所采集的 5 组样品质量浓度的平均值),从图中可以看出,上海石洞口地区 5 月大气粗/细/超细颗粒物的质量浓度分别为 $48.09 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3} \pm 16.52 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 、 $64.01 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3} \pm 28.47 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 、 $14.12 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3} \pm 9.20 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,粗颗粒和细颗粒的质量浓度分别约为超细颗粒的 3 倍和 5 倍. 单一粒径质量浓度最高值和最低值分别出现在 1.0 ~ 0.56 μm 和 0.018 ~ 0.010 μm 之间,分别为 $20.46 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3} \pm 9.24 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $3.02 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3} \pm 2.21 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. 这种特征反映出上海石洞口地区的大气颗粒物污染具有明显的粒径分布特征,即颗粒物的质量浓度主要分布在细颗粒和粗颗粒上,且细颗粒的质量浓度略高于粗颗粒. 相比在位于美国洛杉矶 I-710 高速公路旁测得的粗颗粒、细颗粒和超细颗粒质量浓度分别为 $6.3 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3} \pm 0.88 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 、 $5.8 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3} \pm 0.95 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $1.7 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3} \pm 0.67 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ^[18],上海石洞口地区大气粗、细和超细颗粒物的质量浓度分别约为其 8、11 和 8 倍,上海石洞口地区大气污染相当严重.

2.2 大气颗粒物和工业纳米颗粒微观形貌特征

图 3(a)、图 3(b)和图 3(c)分别为石洞口地区大气粗、细和超细颗粒物的形貌. 图 3(d)为呈不规则

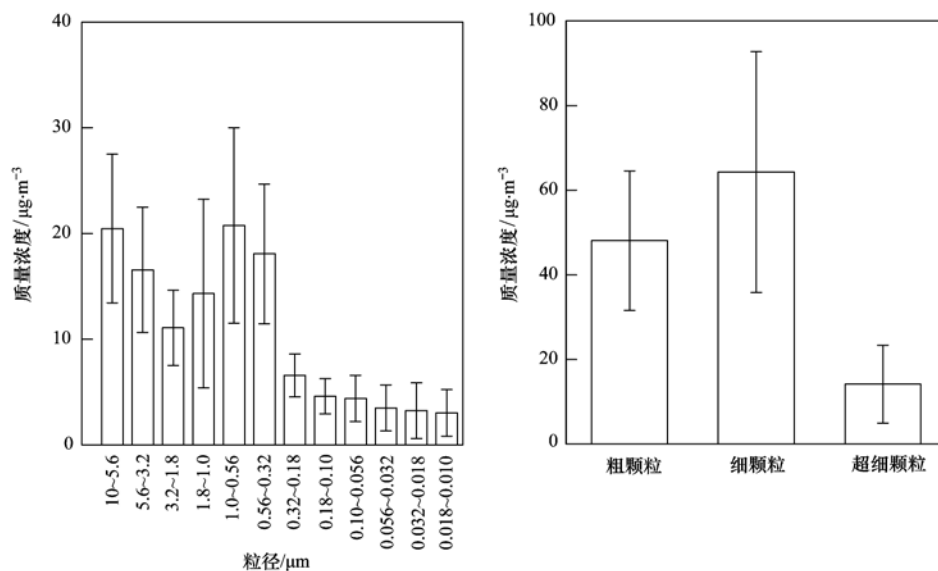
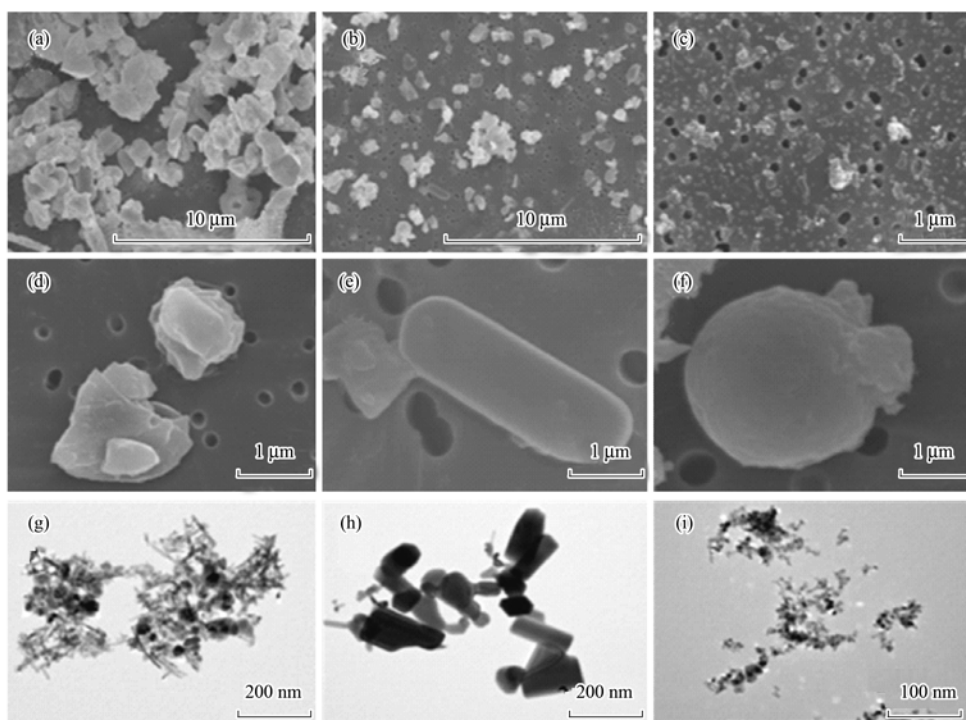


图2 上海石洞口地区大气颗粒物质量浓度

Fig. 2 Mass concentration of samples in SDK of Shanghai



a. 粗颗粒物(5.6 ~ 3.2 μm); b. 细颗粒物(1.8 ~ 1.0 μm); c. 超细颗粒物(0.10 ~ 0.056 μm);
 d. 不规则形状矿物; e. 矿物颗粒; f. 飞灰; g. 纳米 CeO₂; h. 纳米 ZnO; i. 纳米 NiO

图3 不同粒径颗粒物和工业纳米颗粒的微观形貌

Fig. 3 Morphologies of size-segregated particles and engineered nano particles

则形状的矿物颗粒,结合能谱分析其主要成分为 Na、Al、Cl 等,其来源一般为地面扬尘^[19]. 图3(e)中观测到呈规则长方条状的矿物颗粒,一般由大气化学反应而来^[19],能谱显示这些颗粒主要成分为 Ca、S、Na 等. 电镜中观测到的呈圆球形、表面比较光滑的为飞灰[图3(f)],主要来自煤炭燃烧和冶金排

放,在电镜观察中发现了大量的飞灰和矿物颗粒,这可能是由于石洞口地区是上海市典型的燃煤工业区原因所致. 此外,杨书申等^[20]还从上海大气可吸入颗粒物中发现了烟尘集合体和油滴残留. 相比于北京地区大气颗粒物还含有生物颗粒、煤屑、海盐、纤维等^[21],上海大气颗粒物所含种类较为简单. 图

3(g)~3(i)分别为用透射电镜(TEM)观测到呈簇状的纳米 CeO₂ 颗粒、呈晶格状的纳米 ZnO 颗粒和呈链状的纳米 NiO 颗粒的形貌。

2.3 大气颗粒中无机元素的浓度

由表 2 可以看出,上海石洞口地区大气粗颗粒、细颗粒、超细颗粒中金属元素的总质量浓度分别为 6 688.22、2 299.87、691.50 ng·m⁻³。地壳化学元素除 K 外,Na、Mg、Al、Ca、Fe 主要集中在粗颗粒物中,微量元素除 Ba、Co 和 Cu 外,V、Cr、Mn、Ni、Zn、As、Cd、Sb、Pb 主要集中在细颗粒物中,超细颗粒物中地壳元素和微量元素质量浓度相对较低。在地壳元素中质量浓度最高的为 Ca,其在粗颗粒中的质量浓度约为细颗粒的 9 倍,其主要来源认为是地表扬尘和房屋、道路等施工工地的扬尘;质量浓度最低的为 Mg,其在粗颗粒中的质量浓度约为细颗粒的 11 倍。微量元素中质量浓度最高的为 Zn,该元素在细颗粒中的质量浓度约为粗颗粒的 2.5 倍,其主要来源为汽车尾气和工业排放^[22];Mn 的总含量达到 81.28 ng·m⁻³,低于(WHO)PM₁₀-Mn^[23]设定的致癌参考值 150 ng·m⁻³;Ni 虽然只占全部元素浓度的 0.33%,但其总含量达到 31.47 ng·m⁻³,超出了 WHO 设定的致癌风险参考值(2.6~4.0 ng·m⁻³)的 7 倍多;Pb 的总含量为 113.72 ng·m⁻³,主要分布在细颗粒中,低于 WHO 设定的参考值 500 ng·m⁻³。在上海石

洞口大气颗粒物中,微量元素质量浓度从大到小依次为:Zn>Pb>Mn>Cr>Ba>Ni>V>Cu>Sb>As>Cd>Co。

2.4 对 A549 细胞活性的影响

将 A549 细胞暴露于不同的染毒组分 4 h,使用 MTT 法测细胞存活率。由图 4 可知,大气颗粒物(水溶组分和不溶组分)及工业纳米颗粒均可以抑制 A549 细胞的生长活性。在低染毒浓度下(25、50 μg·mL⁻¹),细胞的死亡率都相差不大,死亡率最高的为大气细颗粒水溶组分,在上述染毒剂量下其细胞死亡率分别为 13.31%、18.15%;纳米尺度的颗粒物染毒组分中纳米 NiO 细胞死亡率最高,在上述染毒浓度下其细胞死亡率分别为 11.81%、15.12%,大气超细颗粒水溶组分细胞死亡率次之,在上述染毒剂量下其细胞死亡率分别为 9.5%、13.45%,且在同样染毒浓度下大气超细颗粒物水溶组分和不溶组分细胞死亡率相差不大,但其细胞死亡率高于粗颗粒染毒组分,低于细颗粒染毒组分。这与 Dreher 等^[24]认为超细颗粒和细颗粒比粗颗粒能导致更多的细胞死亡结论一致。当染毒浓度达到 100、200 μg·mL⁻¹时,随着染毒浓度的增加细胞存活率都呈逐渐下降,呈良好的毒性-剂量关系。值得注意的是,在同等染毒浓度下,所有染毒组分中细胞存活率最低的样品均为大气细颗粒水溶组分,且大气粗颗粒、细颗粒和超细颗粒水溶组分的细胞存活率均低于其不溶组分,这可能是由于石洞口地区大

表 2 石洞口地区不同粒径颗粒物中重金属元素的浓度/ng·m⁻³

Table 2 Heavy metal elements mass concentration of size-resolved particles in Shidongkou/ng·m ⁻³				
元素	粗颗粒 (1.8~10 μm)	细颗粒 (0.10~1.8 μm)	超细颗粒 (0.010~0.10 μm)	总计
Na	668.63	387.26	178.44	1 234.33
Mg	342.81	31.58	2.61	377.00
Al	1 307.07	341.62	114.89	1 763.58
K	359.63	414.63	123.71	897.97
Ca	2 417.48	278.30	70.44	2 766.22
Fe	1 398.91	451.97	143.10	1 993.98
V	4.02	17.13	0.47	21.62
Cr	15.61	20.29	7.54	43.44
Mn	39.19	40.24	1.84	81.27
Co	0.55	0.31	0.03	0.89
Ni	9.20	16.52	5.75	31.47
Cu	4.93	4.87	0.00	9.80
Zn	72.73	178.80	38.64	290.17
As	0.84	3.06	0.14	4.04
Cd	0.34	1.58	0.28	2.20
Sb	0.79	5.25	0.10	6.14
Ba	32.87	7.88	1.00	41.75
Pb	12.62	98.58	2.52	113.72
总计	6 688.22	2 299.87	691.50	

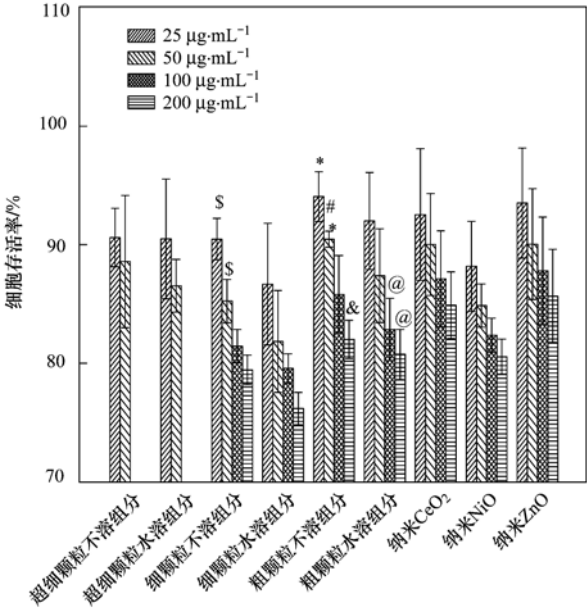


图 4 大气颗粒物和工业纳米颗粒对 A549 细胞活性的影响
Fig. 4 Cell activity of A549 exposed to different components of coarse, fine, ultrafine and engineered nano particles

气颗粒物水溶组分是导致细胞损伤的主要原因,而不是不溶组分所造成的机械损伤.这和曹强等^[17]对上海大气颗粒物水溶组分与不溶组分毒性差异的研究结果一致.

2.5 对 A549 细胞内活性氧(ROS)含量的影响

使用 DCFH-DA 方法测定 A549 细胞内 ROS 的产生量,选取约可导致 20% 细胞死亡的剂量作为染毒浓度,由于大气超细颗粒剥离浓度较低,故笔者对大气超细颗粒使用 $50 \mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$ 作为染毒浓度,其余组分使用 $200 \mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$ 作为染毒浓度.由图 5 可知,超细颗粒水溶组分的相对 ROS 产生量(relative ROS generation^[25])较不溶组分高. Li 等^[26]研究发现在同等浓度下大气超细颗粒比粗颗粒和细颗粒有更高的 ROS 产生量.其余组分中大气细颗粒水溶组分的相对 ROS 产生量最高,即其对细胞的损伤最大,且存在着统计学差异($P < 0.05$),这可能在于其组分含有更多的 Pb、V、Zn、Ni 和 Cr 等金属,这些金属有明显的细胞毒性,能引起氧化应激导致细胞损伤,特别是水溶的 Zn 被认为是大气颗粒物产生氧化能力的重要元素^[27,28];大气细颗粒和粗颗粒水溶组分相对 ROS 产生量均比不溶组分高,这与 MTT 实验 2 种颗粒水溶组分的细胞死亡率比不溶组分高一致.一般认为,大气细颗粒物的毒性要强于粗颗粒^[7].3 种工业纳米颗粒中相对 ROS 产生量最高的为纳米 NiO,最弱的是纳米 CeO_2 ,这与 Xia 等^[10]研究结果一致.但 3 种工业纳米颗粒诱导细胞产生 ROS 量比大气粗颗粒和细颗粒(水溶组分和不溶组分)低,这可能

是由于 3 种纳米颗粒不溶于水所致.由于纳米颗粒特殊的尺寸效应,其尺寸、表面积等对细胞的损伤有显著的影响, Song 等^[9]发现即使在同一浓度下,不同尺寸的纳米 TiO_2 其细胞毒性也有明显的不同, Yang 等^[29]发现随着纳米 ZnO 染毒浓度的增加,其 ROS 产生量也在逐渐增加,故有必要对纳米尺度的颗粒在不同尺寸、不同染毒浓度下其细胞毒性的差异和机制进行进一步的研究.

3 结论

(1)上海市石洞口地区粗颗粒和细颗粒的质量浓度分别约为超细颗粒的 3 倍和 5 倍.单一粒径质量浓度最高值和最低值分别出现在 $1.0 \sim 0.56 \mu\text{m}$ 和 $0.018 \sim 0.010 \mu\text{m}$ 之间.

(2)上海市石洞口地区大气颗粒物主要由矿物颗粒、燃煤飞灰等组成.

(3)元素分析结果表明,粗颗粒中元素含量最高的为 Ca,其浓度达到 $2417.48 \text{ ng}\cdot\text{m}^{-3}$,细颗粒中元素含量最高的为 Fe,其含量达到 $451.97 \text{ ng}\cdot\text{m}^{-3}$,超细颗粒中元素含量最高的为 Na,其含量达到 $178.44 \text{ ng}\cdot\text{m}^{-3}$;地壳元素 Na、Mg、Al、Ca、Fe 主要富集在粗颗粒中,微量重金属元素 V、Cr、Ni、Zn、As、Cd、Sb、Pb 主要富集在细颗粒中.

(4)MTT 和 ROS 结果表明,石洞口地区大气粗/细/超细颗粒物水溶组分的生物活性强于不溶组分,水溶组分是导致细胞损伤的主要原因.在染毒浓度为 25 、 $50 \mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$ 时,大气超细颗粒物和 3 种工业纳米颗粒中,纳米 NiO 的生物活性最强,大气超细颗粒物次之,且其水溶组分和不溶组分毒性差异不大;在染毒浓度为 $200 \mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$ 时,在所有染毒组分中,大气细颗粒水溶组分的生物活性最强.

参考文献:

- [1] 邵龙义,宋晓炎,刘君霞,等.北京 2008 奥运期间 PM_{10} 的颗粒物形貌类型及生物活性研究[J].环境科学,2009,30(12):3448-3454.
- [2] Laden F, Neas L M, Dockery D W, et al. Association of fine particulate matter from different sources with daily mortality in six US cities[J]. Environmental Health Perspectives, 2000, 108(10):941-947.
- [3] Goldberg M S, Burnett R T, Bailar J C III, et al. The association between daily mortality and ambient air particle pollution in Montreal, Quebec: 1. Nonaccidental mortality[J]. Environmental Research, 2001, 86(1):12-25.
- [4] Hsiao W L W, Mo Z Y, Fang M, et al. Cytotoxicity of $\text{PM}_{2.5}$ and $\text{PM}_{2.5-10}$ ambient air pollutants assessed by the MTT and the Comet assays[J]. Mutation Research/Genetic Toxicology and

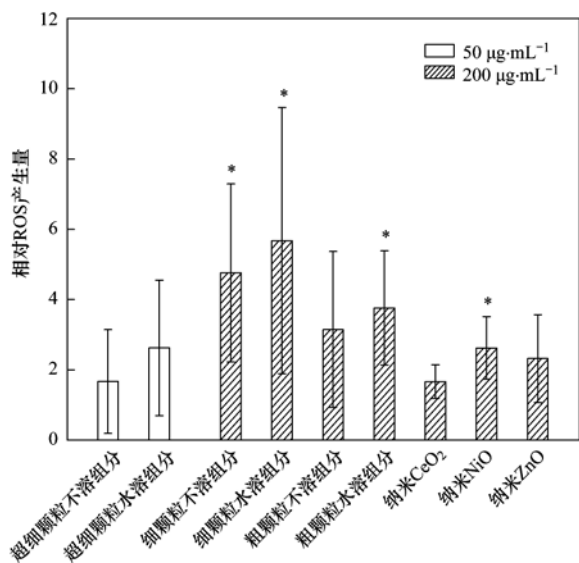


图 5 大气粗/细/超细颗粒物不同组分及工业纳米颗粒对 A549 细胞内 ROS 的影响

Fig. 5 ROS concentrations in A549 cells exposed to different components of coarse, fine, ultrafine and engineered nano particles

- Environmental Mutagenesis, 2000, **471**(1-2): 45-55.
- [5] Wellenius G A, Coull B A, Godleski J J, *et al.* Inhalation of concentrated ambient air particles exacerbates myocardial ischemia in conscious dogs [J]. Environmental Health Perspectives, 2003, **111**(4): 402-408.
- [6] Clarke R W, Coull B, Reinisch U, *et al.* Inhaled concentrated ambient particles are associated with hematologic and bronchoalveolar lavage changes in canines [J]. Environmental Health Perspectives, 2000, **108**(12): 1179-1187.
- [7] Donaldson K, Brown D M, Mitchell C, *et al.* Free radical activity of PM₁₀: iron-mediated generation of hydroxyl radicals [J]. Environmental Health Perspectives, 1997, **105**(Supp. 5): 1285-1289.
- [8] Ji S L, Ye C H. Synthesis, growth mechanism, and applications of zinc oxide nanomaterials [J]. Journal of Materials Science and Technology, 2008, **24**(4): 457-472.
- [9] Song W H, Zhang J Y, Guo J, *et al.* Role of the dissolved zinc ion and reactive oxygen species in cytotoxicity of ZnO nanoparticles [J]. Toxicology Letters, 2010, **199**(3): 389-397.
- [10] Xia T, Kovochich M, Liong M, *et al.* Comparison of the mechanism of toxicity of zinc oxide and cerium oxide nanoparticles based on dissolution and oxidative stress properties [J]. ACS Nano, 2008, **2**(10): 2121-2134.
- [11] Lu S L, Feng M, Yao Z K, *et al.* Physicochemical characterization and cytotoxicity of ambient coarse, fine, and ultrafine particulate matters in Shanghai atmosphere [J]. Atmospheric Environment, 2011, **45**(3): 736-744.
- [12] 上海市环境保护局. 2010 年上海市环境状况公报 [EB/OL]. <http://www.envir.gov.cn/law/bulletin/2010/.html>, 2011-06-04.
- [13] 翟立群, 郑祥民, 周立旻, 等. 上海市交通主干道沿线大气颗粒物及其重金属含量分布特征 [J]. 城市环境与城市生态, 2010, **23**(1): 10-13.
- [14] 张元勋, 王荫淞, 李德禄, 等. 上海冬季大气可吸入颗粒物的 PIXE 研究 [J]. 中国环境科学, 2005, **25**(Supp. 1): 1-5.
- [15] Yang F, Hong F S, You W J, *et al.* Influence of nano-anatase TiO₂ on the nitrogen metabolism of growing Spinach [J]. Biological Trace Element Research, 2006, **110**(2): 179-190.
- [16] Wang Z L. Nanostructures of zinc oxide [J]. Materials Today, 2004, **7**(6): 26-33.
- [17] 曹强, 钱孝琳, 张澍, 等. 大气细颗粒物水溶成分和非水溶成分的细胞毒性 [J]. 环境科学学报, 2008, **28**(6): 1167-1172.
- [18] Ntziachristos L, Ning Z, Geller M D, *et al.* Fine, ultrafine and nanoparticle trace element compositions near a major freeway with a high heavy-duty diesel fraction [J]. Atmospheric Environment, 2007, **41**(27): 5684-5696.
- [19] 吕森林, 陈小慧, 吴明红, 等. 上海市 PM_{2.5} 的物理化学特征及其生物活性研究 [J]. 环境科学, 2007, **28**(3): 472-477.
- [20] 杨书申, 邵龙义, 李卫军, 等. 上海市冬季可吸入颗粒物微观形貌和粒度分布 [J]. 环境科学, 2007, **28**(1): 20-25.
- [21] Shi Z B, Shao L Y, Jones T P, *et al.* Characterization of airborne individual particles collected in an urban area, a satellite city and a clean air area in Beijing, 2001 [J]. Atmospheric Environment, 2003, **37**(29): 4097-4108.
- [22] 王淑兰, 柴发合, 杨天行. 北京市不同尺度大气颗粒物元素组成的特征分析 [J]. 环境科学研究, 2002, **15**(4): 10-12.
- [23] WHO. World Health Organization. Guidelines for air quality [R]. Geneva, 2000.
- [24] Dreher K L, Jaskot R H, Lehmann J R, *et al.* Soluble transition metals mediate residual oil fly ash induced acute lung injury [J]. Journal of Toxicology and Environmental Health, 1997, **50**(3): 285-305.
- [25] Danielsent P H, Møllert P, Jensen K A, *et al.* Oxidative stress, DNA damage, and inflammation induced by ambient air and wood smoke particulate matter in human A549 and THP-1 cell lines [J]. Chemical Research Toxicology, 2011, **24**(2): 168-184.
- [26] Li N, Sioutas C, Cho A, *et al.* Ultrafine particulate pollutants induce oxidative stress and mitochondrial damage [J]. Environmental Health Perspectives, 2003, **111**(4): 455-460.
- [27] Richards R J, Atkins J, Marrs T C, *et al.* The biochemical and pathological changes produced by the intratracheal instillation of certain components of zinc-hexachloroethane smoke [J]. Toxicology, 1989, **54**(1): 79-88.
- [28] Adamson I Y R, Prieditis H, Hedgecock C, *et al.* Zinc is the toxic factor in the lung response to an atmospheric particulate sample [J]. Toxicology and Applied Pharmacology, 2000, **166**(2): 111-119.
- [29] Yang H, Liu C, Yang D F, *et al.* Comparative study of cytotoxicity, oxidative stress and genotoxicity induced by four typical nanomaterials; the role of particle size, shape and composition [J]. Journal of Applied Toxicology, 2009, **29**(1): 69-78.

CONTENTS

Using Look-up Table Method in the Simulation of Regional Atmospheric Environment	XIE Min, WANG Ti-jian, JIANG Fei, <i>et al.</i> (1409)
Applications of Pollutants Released from Crop Residues at Open Burning in Yangtze River Delta Region in Air Quality Model	SU Ji-feng, ZHU Bin, KANG Han-qing, <i>et al.</i> (1418)
Atmospheric Dry Deposition Flux and Sources of Monocarboxylic Acids in Beijing and Surrounding Cities	XU Xiao-juan, LI Xing-ru, WANG Yue-si, <i>et al.</i> (1425)
Comparison of Physicochemical Characterization of Shanghai Ambient Ultrafine Particles and Engineered Nano Particles and Their Cytotoxicity	ZHANG Rui, LÜ Sen-lin, SHANG Yu, <i>et al.</i> (1431)
Element Compositions and Source of PM _{2.5} Aerosols in Qingdao	LI Xiu-zhen, SHENG Li-fang, XU Hua, <i>et al.</i> (1438)
Phthalate Esters Pollution in Household Indoor Air Particles of Tianjin in Winter	WANG Fu-mei, CHEN Li, JIAO Jiao, <i>et al.</i> (1446)
Application of a Resuspension Test Chamber in PM _{2.5} Source Profile Analysis	DUAN Heng-yi, QIAN Ran-ran, WU Shui-ping, <i>et al.</i> (1452)
Distribution and Enrichment of Trace Elements in Coal Combustion Products from Southwestern Guizhou	WEI Xiao-fei, ZHANG Guo-ping, LI Ling, <i>et al.</i> (1457)
Air-Water Surface Greenhouse Gas Flux in Pengxi River at Different Operational Stages of the Three Gorges Reservoir	JIANG Tao, GUO Jing-song, LI Zhe, <i>et al.</i> (1463)
Fluxes of Greenhouse Gases from Xiangxi River in Summer and Their Influencing Factors	WANG Liang, XIAO Shang-bin, LIU De-fu, <i>et al.</i> (1471)
Effects of Elevated Ozone Concentration and Soil Moisture on Temperature Sensitivity of Soil Microbial Respiration in a Cropland	CHEN Shu-tao, ZHANG Yong, HU Zheng-hua, <i>et al.</i> (1476)
Hydrochemical Characteristics in the Glacier No. 72 of Qingbiantan, Tomur Peak	ZHAO Ai-fang, ZHANG Ming-jun, LI Zhong-qin, <i>et al.</i> (1484)
Mineralization Characteristics of Dissolved Organic Phosphorus in Wudalianchi Lake, China	ZHANG Bin, XI Bei-dou, ZHAO Yue, <i>et al.</i> (1491)
Speciation Distribution of Nitrogen in Sediments of 7 Rivers around Taihu Lake	LU Shao-yong, YUAN Ye, JIN Xiang-can, <i>et al.</i> (1497)
Distribution and Bioavailability of Nitrogen and Phosphorus Species in the Sediments from Shiwuli Stream in Lake Chaohu	LI Ru-zhong, LI Feng, ZHOU Ai-jia, <i>et al.</i> (1503)
Surface Water Quality of Beiyun Rivers Basin and the Analysis of Acting Factors for the Recent Ten Years	GUO Jing, JING Hong-wei, LI Jin-xiang, <i>et al.</i> (1511)
Water Quality Impact of Dongjiang River Network Caused by Dongguan Canal Drainage	SUN Lei, MAO Xian-zhong, HUANG Min-min (1519)
Groundwater Pollution Sources Identification and Grading in Beijing Plain	LU Yan, HE Jiang-tao, WANG Jun-jie, <i>et al.</i> (1526)
3D Numerical Simulation of Air Sparging Remediation Process	LI Heng-zhen, HU Li-ming, WANG Jian, <i>et al.</i> (1532)
Numerical Experiment Study on the Algae Suppression Effect of Vertical Hydrodynamic Mixers	ZOU Rui, ZHOU Jing, SUN Yong-jian, <i>et al.</i> (1540)
Microbial Mechanism of Pollutants Removal in New Biological Island Grid	GAO Ming-yu, XIE Hui-jun, WANG Wen-xing (1550)
Effect of Nutrition Level of Phosphorus and Nitrogen on the Metabolism of the Extracellular Organic Matter of <i>Nostoc flagelliforme</i>	QI Fei, LIU Xiao-yuan, XU Bing-bing, <i>et al.</i> (1556)
Inhibitory Effects of Liquor Cultured with <i>Hydrodictyon reticulatum</i> on the Growth of <i>Microcystis aeruginosa</i>	FU Hai-yan, CHAI Tian, ZHAO Kun, <i>et al.</i> (1564)
Removal and Distribution of Phthalate Acid Esters in <i>Potamogeton crispus</i> L. Microcosm of Haihe River	CHI Jie, YANG Qing (1570)
Control and Removal of Microcystin Production of <i>Microcystis aeruginosa</i> by Irradiation of Electron Beam	LIU Shu-yu, WU Ming-hong, JIANG Qin-peng (1575)
Source Characteristics Analysis of Discharge and Pollutants in Typical Drainage Ditch of Qingtongxia Irrigation District	LI Qiang-kun, HU Ya-wei, LUO Liang-guo (1579)
Degradation of TBBPA by Electron Beam Radiolysis	LI Jie, XU Dian-dou, XU Gang, <i>et al.</i> (1587)
Catalytic Ozonation of Ibuprofen in Aqueous Solution by Activated Carbon Made from Sludge and Corn Cob	WANG Hong-juan, QI Fei, FENG Li, <i>et al.</i> (1591)
Effect of High Hydraulic Loading on Intensive Shrimp Aquaculture Wastewater Treatment Performance in Constructed Wetland	LI Huai-zheng, ZHANG Xing-yi, CHEN Wei-bing, <i>et al.</i> (1597)
Factors Influencing the Formation of NDMA During Chloramination Disinfection of Effluent from Biological Nitrogen Removal System for the Treatment of Municipal Sewage	SHANG Xiao-ling, LI Yong-mei (1604)
Denitrification Using Starch/PCL Blends as Solid Carbon Source	SHEN Zhi-qiang, WU Wei-zhong, YANG Chun-ping, <i>et al.</i> (1609)
Profiles of Zeta Potential and EPS in Granulation Process of Aerobic Sludge	WANG Hao-yu, SU Ben-sheng, HUANG Dan, <i>et al.</i> (1614)
Biosorption Characteristics of f2 Bacteriophage onto Activated Sludge	ZHOU Yu-fen, ZHENG Xiang, LEI Yang, <i>et al.</i> (1621)
Adsorption of Anionic Polyacrylamide on the Surface of Ion Exchange Membranes	DENG Meng-jie, YU Shui-li, SHI Wen-xin, <i>et al.</i> (1625)
Adsorption of Amphoteric Modified Bentonites to Phenol and Its Thermodynamics	LI Ting, MENG Zhao-fu, ZHANG Bin (1632)
Effect of Surfactants on Sorption and Desorption of Benzo[a]pyrene onto Black Carbon	ZHANG Jing-huan, CHEN Chun-rong, ZHANG Wei-hang, <i>et al.</i> (1639)
Isolation and Identification of Bacteria in the Activated Sludge from Four Sewage Treatment Plants in Nanjing City and Its Antibiotic Resistance Analysis	GE Feng, GUO Kun, ZHOU Guang-can, <i>et al.</i> (1646)
Screening and Characterization of Phenol Degrading Bacteria for the Coking Wastewater Treatment	CHEN Chun, LI Wen-ying, WU Jing-wen, <i>et al.</i> (1652)
Characteristics of 1,4-Dioxane Degradation by <i>Xanthobacter flavus</i> DT8	JIN Xiao-jun, CHEN Dong-zhi, ZHU Run-ye, <i>et al.</i> (1657)
Spatial Quantitative Distribution of Hydrocarbon-Oxidizing Bacteria of Unexploited Oil and Gas Fields	MAN Peng, QI Hong-yan, HU Qing, <i>et al.</i> (1663)
Screening and Biological Characteristics of Amphitrophic Methane-Oxidizing Bacteria from Aged-Refuse	ZHAO Tian-tao, XIANG Jin-xin, ZHANG Li-jie, <i>et al.</i> (1670)
Distribution Characteristics and Potential Risk of PCBs in Surface Water from 22 Tributaries and Mainstream in Middle Reaches of Yangtze River	LI Kun, ZHAO Gao-feng, ZHOU Huai-dong, <i>et al.</i> (1676)
Pollution Characteristics and Potential Risks of Phenolic Compounds in Schistosomiasis Epidemic Areas	WU Zheng-yong, ZHAO Gao-feng, ZHOU Huai-dong, <i>et al.</i> (1682)
Spatial Heterogeneity and Autocorrelation of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Sediment of Minjiang River in Fuzhou City	CHEN Wei-feng, NI Jin-zhi, YANG Hong-yu, <i>et al.</i> (1687)
Heavy Metals Pollution and Its Potential Ecological Risk of the Sediments in Three Gorges Reservoir During Its Impounding Period	WANG Jian-kang, GAO Bo, ZHOU Huai-dong, <i>et al.</i> (1693)
Investigation on the Distribution and Potential Ecological Risk of Heavy Metal in the Sediments from Typical Electrical Industrial Zone	DENG Dai-yong, SUN Guo-ping, GUO Ju, <i>et al.</i> (1700)
Fraction Distribution and Risk Assessment of Heavy Metals in Iron and Gold Mine Soil of Miyun Reservoir Upstream	GAO Yan-xin, FENG Jin-guo, TANG Lei, <i>et al.</i> (1707)
Heavy Metal Contamination and Bioavailability in Huayuan Manganese and Lead/Zinc Mineland, Xiangxi	YANG Sheng-xiang, YUAN Zhi-zhong, LI Zhao-yang, <i>et al.</i> (1718)
Evaluation of Heavy Metal Pollution in Soils from a Training Ground Based on GIS	LIU Yu-tong, FANG Zhen-dong, YANG Qin, <i>et al.</i> (1725)
Effects of Soil Texture and Water Content on Remediation of SVE on Soils Contaminated by Benzene	LIU Shao-qing, JIANG Lin, YAO Yu-jun, <i>et al.</i> (1731)
Characteristics of DNA Adsorption and Desorption in Montmorillonite, Kaoline and Goethite	WANG Shen-yang, RAO Wei, WANG Dai-zhang, <i>et al.</i> (1736)
LNAPL Migration Monitoring in Simulated Sand Aquifer Using Resistivity Method	PAN Yu-ying, JIA Yong-gang, GUO Lei, <i>et al.</i> (1744)
Preparation and Characterization of Activated Carbon from Rice Straw Pre-treated by the Subcritical Hydrolysis	DONG Yu, SHEN Zhe-min, LEI Yang-ming, <i>et al.</i> (1753)
Study on Composting of Cyanobacteria Amended with Different N Loss Inhibitor	REN Yun, CUI Chun-hong, LIU Fen-wu, <i>et al.</i> (1760)
Research Progress About Bioremediation of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons Contaminated Soil with Immobilized Microorganism Technique	QIAN Lin-bo, YUAN Miao-xin, CHEN Bao-liang (1767)

《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)

2012年5月15日 33卷 第5期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 33 No. 5 May 15, 2012

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: 70.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行人