

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第33卷 第3期

Vol.33 No.3

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

典型排放源黑碳的稳定碳同位素组成研究	陈颖军,蔡伟伟,黄国培,李军,张干(673)
天山典型冰川区雪冰中碳质气溶胶浓度特征研究	王圣杰,张明军,王飞腾,李忠勤(679)
兰州市夏秋季颗粒物谱分布特征研究	赵素平,余晔,陈晋北,刘娜,何建军(687)
不同交通状况下道路边大气颗粒物数浓度粒径分布特征	杨柳,吴焯,宋少洁,郝吉明(694)
南京市夏季大气气溶胶新粒子生成事件分析	王红磊,朱彬,沈利娟,康汉青,刁一伟(701)
西北干旱区降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 变化特征及其水汽输送	李小飞,张明军,李亚举,王圣杰,黄小燕,马潜,马雪宁(711)
海南东部河口和近岸海域总溶解态无机砷的分布及季节变化	曹秀红,任景玲,张桂玲,张金娥,杜金洲,朱德弟(720)
大辽河口痕量元素砷的河口混合行为	简慧敏,姚庆祯,于立霞,田琳(727)
渤海湾表层沉积物各形态重金属的分布特征与生态风险评价	徐亚岩,宋金明,李学刚,袁华茂,李宁(732)
青岛近岸表层海水中 PAHs 的分布特征及物源初步解析	李先国,邓伟,周晓,唐旭利,魏新运,王岩(741)
广西乐业大石围天坑群多环芳烃的干湿沉降	孔祥胜,祁士华,黄保健,张原,李杰(746)
上海宝山区城市土壤铅污染来源的同位素判别	董辰寅,张卫国,王冠,马鸿磊,刘圆,刘莹,叶雷平,俞立中(754)
溶质迁移模型在地下水有机污染源识别中的应用	王树芳,王丽亚,王晓红,林沛,刘久荣,辛宝东,贺国平(760)
地下水污染风险评价中特征污染物量化方法探讨	王俊杰,何江涛,陆燕,刘丽雅,张小亮(771)
用于地下水回灌的再生水预处理工艺研究	高清端,张薛,赵璇,赵刚(777)
菲律宾蛤仔养殖对胶州湾沉积物-水界面生源要素迁移的影响	邓可,刘素美,张桂玲,陆小兰,张经(782)
南京市九乡河流域景观格局空间分异对河流水质的影响	胡和兵,刘红玉,郝敬峰,安静(794)
上海都市农业村域地表水非点源氮素的时空分异特征	王楠,毛亮,黄海波,张进忠,周培(802)
不同粒径地表街尘中重金属在径流冲刷中的迁移转化	何小艳,赵洪涛,李叙勇,连宾,王小梅(810)
新型人工湿地对工业区降雨径流的净化研究	何丽君,马邕文,王金泉,李东亚,王艳(817)
改性膨润土应急截留液态有机物的性能及机制	李宇,刘贤君,张兴旺,雷乐成(825)
卵圆卡盾藻香港株过氧化氢产生的影响因素研究	江涛,吴霓,钟艳,江天久(832)
芽孢杆菌 B1 胞外活性物质对球形棕囊藻的溶藻特性研究	李蕾,赵玲,尹平河(838)
底泥对洋河水库微囊藻和鱼腥藻生长影响的研究	储昭升,张玉宝,金相灿,徐颖,杨红君(844)
新型无极准分子光源深度处理水中含 N-杂环化合物	叶招莲,汪斌,路娟娟,李峰,张仁熙(849)
La/Ce 掺杂钛基二氧化铅电极的制备及电催化性能研究	郑辉,戴启洲,王家德,陈建孟(857)
DTT 对三苯基甲染料脱色的研究	潘涛,刘大伟,任随周,郭俊,孙国萍(866)
pH 及络合剂对亚铁活化 $\text{S}_2\text{O}_8^{2-}$ 氧化去除活性艳蓝的影响研究	张成,王金泉,马邕文,王艳,黄明智,兰明(871)
臭氧降解高浓度腐殖酸动力学	郑可,周少奇,杨梅梅(879)
采用体积信息熵表征颗粒污泥系统稳定性及其稳定机制	李志华,姬晓琴,李胜,谢磊,赵海龙,王晓昌(885)
活性污泥的理化性质与絮凝调理投药量的关系	李婷,王毅力,冯晶,徐萌(889)
不同颗粒龄的好氧颗粒污泥性能的研究	周曼,杨昌柱,濮文虹,罗应东,龚建宇(896)
颗粒粒径与数量对硝化与反硝化过程的影响	李志华,曾金锋,李胜,姬晓琴,王晓昌(903)
氧化沟不同曝气模式对氮磷去除性能的优化与比较	郭昌梓,彭党聪,陈雪梅,王丹(910)
生物沥浸的酸化效应对城市污泥脱水性能的影响	朱海风,周立祥,王电站(916)
2 种不同生物接触氧化工艺性能差异的微生物生态研究	钱殷,全向春,裴元生,马景赞,陶锟(922)
微生物群落对土壤微生物呼吸速率及其温度敏感性的影响	范分良,黄平容,唐勇军,李兆君,梁永超(932)
干旱沙区人工固沙植被演变过程中土壤有机碳氮储量及其分布特征	贾晓红,李新荣,周玉燕,李元寿(938)
密云水库上游流域土壤有机碳和全氮密度影响因素研究	王淑芳,王效科,欧阳志云(946)
外加营养源作用下微生物黏结剂对土壤团聚体的影响	莫艳华,汤佳,张仁铎,李方舟(952)
低分子量腐殖酸改性蒙脱土对黄曲霉素的吸附作用	姚佳佳,康福星,高彦征(958)
液固比对土壤洗涤去除多环芳烃效果的影响	吴威,姜林,陈家军,彭胜(965)
基于 PPI 的土地利用优化研究	武晓峰,李婷(971)
若尔盖高原湿地藻类多样性研究	陈曦,刘如钢,王艳芬,张洪勋(979)
3 种杀真菌剂对 AM 真菌侵染和黄芩生长的影响	贺学礼,王平,马丽,孟静静(987)
崇明东滩夏季沉积物厌氧氨氧化菌群落结构与空间分布特征	郑艳玲,侯立军,陆敏,谢冰,刘敏,李勇,赵慧(992)
厌氧条件下 2,2',4,4'-四溴联苯醚的微生物降解	卢晓霞,陈超琪,张姝,欧阳,尹力,吴蔚(1000)
重金属对白腐菌降解十溴联苯醚的影响	熊士昌,尹华,彭辉,何宝燕,龙焰,叶锦韶,张娜,彭素芬(1008)
有机农药滴滴涕和毒死蜱生物降解机制的分子模拟研究	林玉珍,曾光明,张斌,陈明,蒋敏,张嘉超,鲁伦慧,刘利锋(1015)
高效木薯渣分解复合菌群 RXS 的构建及其发酵特性研究	何江,毛忠贵,张庆华,张建华,唐蕾,张宏建(1020)
四环素类抗生素污染畜禽粪便的厌氧消化特征	童子林,刘元璐,胡真虎,袁守军(1028)
上推流厌氧反应器连续干发酵猪粪产沼气试验研究	陈闯,邓良伟,信欣,郑丹,刘刈,孔垂雪(1033)
《环境科学》征稿简则(878) 《环境科学》征订启事(1007) 信息(759, 770, 870, 1027)	

不同交通状况下道路边大气颗粒物数浓度粒径分布特征

杨柳, 吴烨, 宋少洁, 郝吉明*

(清华大学环境学院, 北京 100084)

摘要: 研究了不同交通状况下北京交通环境大气颗粒物数浓度的污染特征. 应用扫描电迁移率颗粒粒径谱仪 (SMPS) 测定了2009年8月常规交通状况和2008年8月奥运交通状况下北四环道路边大气颗粒物的数浓度, 分析了数浓度的粒径分布特征及其逐时变化规律, 目的为辨析交通流改变对交通环境中颗粒物数浓度的影响. 常规交通状况下道路边超细颗粒物 (10~100 nm) 和10~478 nm颗粒物总粒数浓度分别为 $(1.15 \pm 0.49) \times 10^4 \text{ 个} \cdot \text{cm}^{-3}$ 、 $(1.61 \pm 0.57) \times 10^4 \text{ 个} \cdot \text{cm}^{-3}$, 奥运交通状况下分别下降到 $(0.55 \pm 0.14) \times 10^4 \text{ 个} \cdot \text{cm}^{-3}$ 、 $(1.21 \pm 0.24) \times 10^4 \text{ 个} \cdot \text{cm}^{-3}$, 不同粒径段中超细颗粒物数浓度降幅最高, 为52.2%. 常规交通状况下道路边大气中颗粒物粒数浓度呈双峰分布, 峰值粒径依次为22.5 nm和113.0 nm. 奥运期间由于机动车单双号限行和黄标车禁行等措施的实施, 22.5 nm处颗粒物数浓度峰值消失. 粒径分布逐时变化显示, 常规交通状况下00:00~04:00柴油车流量高峰、11:00~13:00高温强光照和17:00~20:00交通晚高峰这3个时段内超细颗粒物数浓度较高; 而奥运期间受到交通流量下降、平均车速提高等因素影响, 道路边颗粒物数浓度粒径分布逐时变化趋于平缓.

关键词: 超细颗粒物; 数浓度; 粒径分布; 交通环境; 交通流

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2012)03-0694-07

Particle Number Size Distribution near a Major Road with Different Traffic Conditions

YANG Liu, WU Ye, SONG Shao-jie, HAO Ji-ming

(School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: The profiles of number concentration of ambient particles at a roadside site in Beijing were studied with different traffic conditions. A Scanning Mobility Particle Sizer (SMPS) was utilized to measure the number concentrations of fine and ultrafine (10-100 nm) particles in August 2008 and August 2009, which represented the normal and Olympic traffic conditions, respectively. Size distributions of particle number concentration were identified and their temporal variations were also discussed. Results indicated that with normal traffic pattern, the total number concentration of ultrafine and 10-478 nm particles were $(1.15 \pm 0.49) \times 10^4 \text{ cm}^{-3}$ and $(1.61 \pm 0.57) \times 10^4 \text{ cm}^{-3}$, respectively. While the concentrations were decreased to $(0.55 \pm 0.14) \times 10^4 \text{ cm}^{-3}$ and $(1.21 \pm 0.24) \times 10^4 \text{ cm}^{-3}$, respectively, with special traffic condition during the Beijing Olympic Games. Largest reduction of 52.2% was observed for ultrafine particles among all size ranges. With normal traffic condition, bimodal distribution was found with two peak values in number concentrations around 22.5 nm and 113.0 nm. During the Olympic period, nucleation mode particles were significantly reduced due to a series of temporal control measures on motor vehicles such as the removal of yellow-labeled vehicles from the roads and travel restrictions based on odd-even license plate numbers. As a result, the peak in particle number concentration at 22.5 nm disappeared. The temporal variation indicated that significantly higher ultrafine particle number concentrations occurred around 00:00-04:00, 11:00-13:00 and 17:00-20:00 with normal traffic situation, which primarily attributed to the contributions of diesel exhaust at night, secondary formation at noon and traffic jam in the evening, respectively. However during the Olympic period, the temporal variation pattern changed significantly. The gap in the number concentrations of ultrafine particle between these three time periods and other time periods were narrowed, which should be attributed to the reduction of traffic flow as well as the increase of fleet speed during the Olympics.

Key words: ultrafine particles; number concentration; size distribution; roadside microenvironment; traffic flow

粒数浓度是大气颗粒物污染的重要特征之一. 研究表明不同粒径颗粒物对人体健康影响不同, 颗粒物的健康危害与粒数浓度及其粒径分布存在着很高的相关性^[1~2]. 机动车是城市大气中细颗粒物 (PM_{2.5}) 特别是超细颗粒物 (ultrafine particles, 粒径 < 100 nm 的粒子) 的主要来源之一^[3~5]. 受到机动车排放影响, 典型交通环境中颗粒物粒数浓度较高且随着与道路距离的增加迅速下降^[6, 7], 交通源附近超细颗粒物占 PM_{2.5} 总粒数浓度的比例亦显著高

于一般城区环境, 工作日交通高峰时段超细颗粒物数浓度更高^[8, 9].

我国城市大气颗粒物粒数浓度粒径分布研究目前较少, 已有研究通常着眼于一般城区环境^[10, 11]或机动车尾气源排放特征^[12, 13], 缺少对交通环境这一

收稿日期: 2011-04-21; 修订日期: 2011-05-19

基金项目: 国家自然科学基金项目 (20521140077, 50908121)

作者简介: 杨柳 (1984~), 女, 博士研究生, 主要研究方向为交通环境大气污染控制, E-mail: yang-l@mails.tsinghua.edu.cn

* 通讯联系人, E-mail: hjm-den@tsinghua.edu.cn

颗粒物数浓度较高的污染区域的关注. 2008 年 7~9 月第 29 届奥林匹克运动会前后北京市实施了严格的临时机动车管理措施, 机动车活动水平及颗粒物和气态污染物排放大幅度下降^[14], 临时机动车管理为研究不同交通结构下交通环境颗粒物污染特征的差异提供了宝贵机会. 目前针对奥运期间道路边颗粒物质量浓度和化学组成的研究结果已有报道^[15, 16], 但对于颗粒物粒数浓度及其粒径分布的变化规律以及这种变化与交通状况改变之间的相关关系的研究则十分匮乏. 本研究的主要目标是识别城市交通环境大气细颗粒物和超细颗粒物数浓度的粒径分布规律等污染特征, 考察机动车流量、车型分布等交通因素变化对道路边大气颗粒物粒数浓度的影响, 以期为我国城市交通环境颗粒物污染控制措施的制定提供参考.

表 1 采样期间气象条件及采样点附近交通流量

Table 1 Meteorological conditions and traffic flow counts during the sampling periods at the roadside site					
采样时间	温度/℃	湿度/%	风速/m·s ⁻¹	交通流量/辆·d ⁻¹	天气状况
2008 年 8 月 4~8 日	26.1±3.5	66±16	1.00±0.68	190 000	多云, 4 日有阵雨
2009 年 8 月 3~7 日	27.4±3.8	64±18	0.92±0.75	275 000	晴转多云, 5 日有阵雨

(48i, 美国 Thermo 公司) 对交通环境中 CO 浓度变化进行了同步监测. 在后续分析中污染物浓度均折算为时均值.

2 结果与讨论

2.1 交通环境大气颗粒物总粒数浓度

本研究在讨论中将颗粒物划分为成核模态粒子 (<50 nm)、埃根模态粒子 (50~100 nm) 和积聚模态粒子 (100~478 nm)^[18], 前两者即为超细颗粒物 (ultrafine particles, 粒径在 100 nm 以下的颗粒物). 在常规交通状况下, 10~478 nm 颗粒物总粒数浓度平均值约为 $(1.61 \pm 0.57) \times 10^4$ 个·cm⁻³, 奥运交通状况下数浓度约下降 24.8%, 平均为 $(1.21 \pm 0.24) \times 10^4$ 个·cm⁻³; 其中超细颗粒物粒数浓度下降幅度更大, 由常规交通状况的 $(1.15 \pm 0.49) \times 10^4$ 个·cm⁻³ 下降为 $(0.55 \pm 0.14) \times 10^4$ 个·cm⁻³, 平均下降 52.2%. 表 2 列出了近年文献报道的国内外部分城市交通环境颗粒物粒数浓度. 由表 2 中数据可以看到, 北四环常规交通状况下大气超细颗粒物总粒数浓度与国内外其他城市道路交通环境相近, 奥运交通状况下则显著低于其他城市平均污染水平. 超细粒子和积聚模态粒子在奥运交通状况下不同的数浓度降幅与两个粒径段颗粒物的来源和物理特性有关. 如前所述, 机动车尾气排放是交通环境大气超

1 材料与方法

本研究采样地点位于北四环西路中段北京航空航天大学北校门东 500 m 处道路南侧, 采样口距离道路边缘约 1.5 m, 高度距地面 1.8 m, 附近除道路机动车外无其他人为污染源^[15]. 采样时间为 2008 年 8 月 4~8 日, 2009 年 8 月 3~7 日, 采样期间气象条件见表 1. 为减轻降水对颗粒物去除作用的影响, 研究中扣除了降水期间及降水后 6h 内的浓度数据^[10, 17]. 本研究使用扫描电迁移率颗粒粒径谱仪 SMPS (Scanning Mobility Particle Sizer 3936, 美国 TSI 公司) 对交通环境中颗粒物粒数浓度进行了连续监测. SMPS 测量全粒径范围为 10~478 nm, 分为 108 通道; 其中 10~100 nm 超细颗粒物段分为 64 个通道, 扫描周期为 6 min. 本研究还使用 CO 分析仪

细颗粒物的主要来源之一, 而大气中积聚模态粒子主要来自于挥发性气态污染物的冷凝. 超细颗粒物在大气中的粒径增长以及小粒径地面尘, 具有一定的区域污染特征^[19]. 通过气溶胶力学计算可知, 超细颗粒物通常在生成后 1 h 内即与较大的粒子发生凝并或与液滴作用生成凝结核, 其粒数浓度受局地排放的影响更为显著, 而积聚模态粒子在大气中滞留时间可达一个月左右^[20], 亦体现出污染的区域性. 因此, 奥运交通状况下北京交通环境中超细颗粒物较高的数浓度降幅反映出奥运期间机动车尾气颗粒物排放削减控制较区域污染控制的力度更高.

2.2 颗粒物粒数浓度粒径分布

由于仪器测量中不同粒径段覆盖的长度不同, 为了更准确地识别道路边大气颗粒物数浓度粒径分布规律, 引入对数正态分布的个数密度 $dN/d\log D_p$, 用个数密度对粒径作图得到常规交通状况和奥运交通状况下颗粒物粒数浓度粒径分布谱, 如图 1. 在常规交通状况下 10~478 nm 粒径段中颗粒物数浓度呈双峰分布, 峰值粒径依次为 22.5 nm、113.0 nm. 本研究得到的颗粒物数浓度粒径分布与文献报道的其它城市交通环境中颗粒物数浓度峰值粒径相近, 如李新令等^[24] 在上海测得街区峡谷内颗粒物粒数浓度呈三峰分布, 峰值粒径依次为 10、28 和 90 nm; Imhof 等^[3] 在苏黎世测得不同类型道路边颗粒物数

表 2 北京交通环境颗粒物数浓度与其他研究对比

Table 2 Comparison of roadside particulate number concentrations of Beijing with other researches

采样地点	监测时间/年	粒数浓度/个·cm ⁻³	粒径范围/nm	测量仪器	文献
10~478 nm					
Lahti/道路	1995	3.90×10 ⁴	6~300	CPC ¹⁾	[21]
Helsinki/道路	1999~2000	(1.78~2.39)×10 ⁴	8~400	CPC	[22]
Downey/交通环境	2001	(1.80~3.50)×10 ⁵	6~220	SMPS/CPC	[23]
上海/交通环境	2005	(1.05~1.42)×10 ⁵	10~478	SMPS/CPC	[24]
Austin/交通环境	2007	(0.90~1.60)×10 ⁴	6~300	SMPS/CPC	[25]
台北/交通环境	2008	(6.50±2.70)×10 ⁴	6~225	SMPS/CPC	[26]
北京/交通环境	2008(奥运)	(1.21±0.24)×10 ⁴	10~487	SMPS/CPC	本研究
北京/交通环境	2009(常规)	(1.61±0.57)×10 ⁴	10~487	SMPS/CPC	本研究
10~100 nm					
El Paso/城区	1999	(1.36±0.93)×10 ⁴	20~100	SMPS/CPC	[27]
Manchester/交通环境	2001	2.70×10 ⁴	4.6~100	SMPS/CPC	[28]
上海/城区	2005	2.58×10 ⁴	10~100	WPS/CPC	[29]
济南/城区	2006	1.03×10 ⁴	10~100	WPS/CPC	[30]
北京/交通环境	2008(奥运)	(0.55±0.14)×10 ⁴	10~100	SMPS/CPC	本研究
北京/交通环境	2009(常规)	(1.15±0.49)×10 ⁴	10~100	SMPS/CPC	本研究

1) CPC:Condensation Particle Counter,凝聚核粒子计数器,美国 TSI 公司

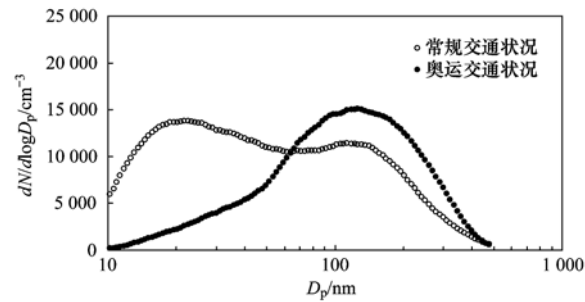


图 1 北四环采样点超细颗粒物数浓度粒径分布谱图

Fig. 1 Number size distribution spectra of ultrafine particles at North 4th Ring Road monitoring site

浓度峰值均出现在 20 nm 和 80 nm 附近. 交通环境颗粒物粒数浓度的粒径分布与城区环境相比存在一定区别,如胡敏等^[10]在北京城区采样点测得颗粒物数浓度呈单峰分布,峰值出现在 40 nm 处;高健等^[29]在北京城郊测得颗粒物数浓度峰值在 20 nm 左右.

粒数浓度粒径分布规律反映出道路边大气颗粒物的来源特征. Imhof 等^[3]提出交通环境中 50 nm 以下的成核模态粒子来自于机动车尾气排放到环境大气后迅速冷却时的均相成核过程,其主要成分为冷凝的润滑油、部分金属元素和少量二次无机盐. 尾气污染物均相成核对超细颗粒物的贡献也被其他研究证实^[31]. 此外汽油车尾气直接排放的颗粒物多在 50 nm 以下^[32~34],因此,北四环采样点大气颗粒物在 22.5 nm 附近的数浓度峰应来自汽油车一次颗粒物排放和机动车尾气气态污染物均相成核生成的新

粒子的双重贡献. 与之相比,出现在 100 nm 左右的数浓度峰值受柴油车直接排放颗粒物的贡献更高,其中可能含有大量不完全燃烧产生的碳黑. Ntziachristos 等^[35]发现典型柴油车尾气中颗粒物数浓度峰值在 60~100 nm 范围; Wehner 等^[32]测得柴油轿车尾气颗粒物数浓度峰值出现在 60~80 nm 之间;胡京南^[12]通过道路测试发现北京市在用柴油货车正常工况下尾气排放颗粒物数浓度峰值在 80~120 nm 范围内.

在奥运交通状况下,成核模态粒子数浓度大幅度下降,22.5 nm 处浓度峰消失. 这种变化与奥运期间机动车控制措施对汽油车流量、车队构成和行驶工况的改变有关. 首先,由于临时机动车管理中机动车按单双号限行和政府部门公车停驶 70% 这两条措施的实施,道路上轻型汽油车流量大幅度削减. 本研究发现 2008 年 8 月北四环采样点附近汽油车日均流量较 2009 年 8 月约下降 33.8%,汽油车流量的下降使得尾气污染物排放量随之减少. 其次,奥运期间车辆运行状况发生了很大变化,道路上机动车平均行驶速度由奥运前的 25 km·h⁻¹ 提高到 36 km·h⁻¹^[14]. Zhou 等^[14]在奥运前和奥运期间选择固定路段和固定车辆进行了实际路况轻型汽油车尾气污染物排放测试,结果显示奥运期间由于行驶工况变化,轻型汽油车 CO、HC 和 NO_x 排放因子分别下降了 26.8%、28.7% 和 0.8%. 汽油车尾气颗粒物排放因子以及尾气颗粒物粒径分布随行驶工况的变化规律与气态污染物相比更为复杂. 北京市在用出

租车尾气车载实验结果显示,车速在 $50 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 以下时尾气颗粒物数排放因子和数浓度粒径分布变化不大^[12]. 但李新令等^[34]在台架实验中则发现当车速由 $20 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 升高到 $50 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 时尾气中成核模态粒子占总粒数浓度的比例有所下降. 车速提高对汽油车尾气成核模态粒子排放因子的影响还需更多实验和观测数据支持,然而综合尾气一次排放和尾气中气态污染物二次均相成核两者对成核模态粒子的贡献,奥运期间平均车速的提高应使得成核模态粒子的一次和二次排放之和有所下降. 第三,奥运期间污染物排放因子较高的黄标车被禁行,其中多为黄标柴油货车. 本课题组正在进行的一项机动车尾气污染物排放研究显示,国零黄标柴油货车的 $\text{PM}_{2.5}$ 排放因子平均约为国 III 柴油货车的 82 倍. 奥运期间黄标车禁行使得在用车尾气污染物平均排放水平显著下降,尾气排放的颗粒物粒数随之减少. 研究表明在奥运临时机动车管理措施带来的汽油车总流量下降、平均行驶速度提高和黄标车禁行这 3 种交通结构变化的作用下,北京市交通相关的 VOCs 排放较奥运前下降了 57.0%^[36],可以推测,汽油车尾气相关的成核模态粒子排放也必然同样大幅减少,因此道路边大气中成核模态粒子的数目也随之显著下降. 奥运交通状况下 113.0 nm 左右粒径段颗粒物数浓度略有增加,但与常规交通状况相比无统计上的显著性差异. 柴油车尾气颗粒物数浓度粒径分布与运行工况相关性的研究显示,柴油货车平均车速由 $20 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 以下升高到 $20 \sim 50 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 之间时,尾气颗粒物数浓度峰值粒径明显增大,由 100 nm 以下偏移到 100 nm 以上^[12]. 113.0 nm 粒径段颗粒物浓度的波动可能与奥运交通状况下柴油车车速提高、尾气颗粒物粒径增大有关.

2.3 颗粒物数浓度逐时变化

图 2 显示北四环大气中 $10 \sim 478 \text{ nm}$ 颗粒物数浓度粒径分布随时间变化情况,其中个数密度 $dN/d\log D_p$ 由颜色标尺表示. 图 3 为经过 24 h 内最大时均车流量归一化的相对时均车流量分布. 比较两图可见,在常规交通状况下,夜间 00:00 ~ 04:00 间存在着高浓度的成核模态粒子和较高浓度的积聚模态粒子($100 \sim 200 \text{ nm}$),同时采样点附近重型货车流量最高. 因此,这一时段环境大气中的成核模态粒子应主要来自于机动车尾气中气态污染物均相成核过程, $100 \sim 200 \text{ nm}$ 段粒子应主要来自于柴油车尾气排放,且在夜间混合层高度较低的情况下污染物不易扩散,二者累积浓度均达到 24 h 内的最高水

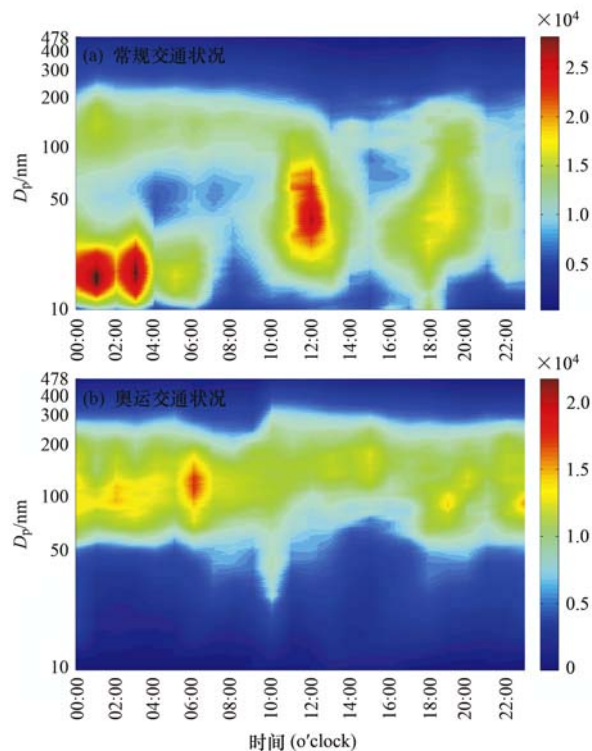


图 2 道路边超细颗粒物数浓度粒径分布逐时变化

Fig. 2 Average diurnal variations of number size distribution of ultrafine particles at roadside site

平. 正午 11:00 ~ 13:00 间大气中出现再次较高浓度的成核模态粒子,然而此时轻型汽油车和重型柴油车相对流量均较低,成核模态粒子数浓度的显著增加与机动车排放无明显的相关性. 这一时段太阳辐射最强,有研究提出此时光化学反应是成核模态粒子的重要来源^[10, 37]. 下午 17:00 以后随着交通晚高峰的开始,颗粒物数浓度再次升高,粒径范围涵盖了成核模态和埃根模态,反映出各类机动车活动的整体影响. 由于仪器条件限制奥运前和控制措施结束后的夏季时段未能进行交通环境颗粒物数浓度研究,但北四环颗粒物数浓度冬季监测(2008 年 12 月)结果显示,伴随交通晚高峰和夜间柴油车流量高峰出现的颗粒物数浓度峰在冬季同样存在^[38],进一步证明了交通高峰时段道路边颗粒物数浓度升高与交通流量增加之间的密切关联.

奥运期间在各项管理措施的调控下,交通状况一方面表现为日交通流量的总体下降,一方面亦表现为 24 h 时均车流量差异的减弱,交通早高峰、晚高峰和夜间柴油货车高峰均不显著. 这种变化对超细颗粒物数浓度的影响十分明显, $10 \sim 50 \text{ nm}$ 的成核模态粒子数浓度降幅平均为 74.6%,高于 $10 \sim 100 \text{ nm}$ 粒径段的 51.8% 和 $100 \sim 478 \text{ nm}$ 粒径段的 49.2%; 同时粒径分布逐时变化趋于平缓, 24 h 均

表现出由 100 nm 左右数浓度峰值向大粒径和小粒径递减的分布趋势。值得注意的是,由于奥运期间北京对各类污染源均采取了严格控制措施,大气中各种光化学反应前体物的浓度也有所下降,正午前后

光化学反应生成新成核模态粒子的特征也随着消失。

图 4 进一步分析了超细颗粒物数浓度与 CO 这一机动车排放标志性污染物逐时变化规律之间的相关性,图中 CO 相对浓度与相对时均车流量计算方法相同。由图可见,在常规交通状况下 10~50 nm 粒径段成核模态粒子数浓度与 CO 浓度之间存在着一定的相关性 ($R^2 = 0.414$), 而 50~100 nm ($R^2 = 0.019$) 和 100~478 nm ($R^2 = 0.035$) 粒径段数浓度与 CO 浓度相关性很低。颗粒物数浓度与 CO 浓度的相关性随粒径变化,反映出道路边不同粒径颗粒物的来源不同。如前所述,汽油车尾气排放对成核模态粒子贡献较大,同时汽油车尾气亦是交通环境中 CO 的主要来源,因此两者的相关性较强;而埃根模态和积聚模态粒子受到汽油车尾气的贡献较低,受柴油车尾气及道路扬尘源的影响更大,因此与 CO 的相关性显著低于成核模态粒子。奥运期间各粒径段颗粒物数浓度与 CO 浓度之间均不存在相关性,表明随着交通流量的下降,机动车尾气及其相关的二次污染对道路边细颗粒物数浓度的贡献显著降低。

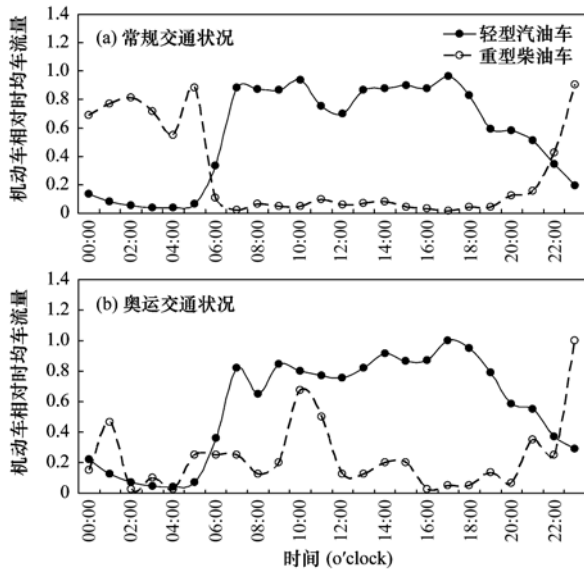


图 3 北四环采样点机动车流量逐时变化

Fig. 3 Average diurnal variations of traffic counts at roadside site

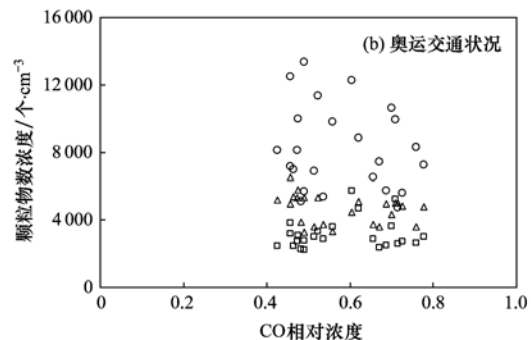
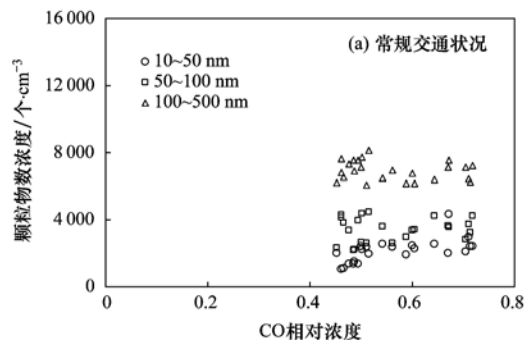


图 4 道路边大气中颗粒物数浓度与 CO 浓度相关性

Fig. 4 Correlations between particulate number concentration and CO concentration at roadside site

3 结论

(1) 常规交通状况下北四环采样点超细颗粒物总粒数浓度平均为 $(1.15 \pm 0.49) \times 10^4 \text{ 个} \cdot \text{cm}^{-3}$, 10~478 nm 段颗粒物总粒数浓度平均为 $(1.61 \pm 0.57) \times 10^4 \text{ 个} \cdot \text{cm}^{-3}$, 与国内外其他城市道路交通环境中颗粒物粒数浓度水平相近。奥运交通状况下超细颗粒物和 10~478 nm 段颗粒物总粒数浓度分别下降 52.2% 和 24.8%, 已低于其他城市交通环境平均污染水平。超细颗粒物较大的数浓度降幅反映出奥运期间机动车尾气颗粒物排放削减的成效较区域性污染的控制力度更高。

(2) 粒径分布显示常规交通状况下北四环采样点大气中超细颗粒物数浓度呈双峰分布, 峰值粒径依次为 22.5 nm 和 113.0 nm, 前者主要来自于汽油车尾气颗粒物排放以及气态污染物均相成核, 后者主要来自于柴油车尾气颗粒物排放、光化学反应生成也有一定贡献。奥运交通状况下随着汽油车尾气和气态污染物整体排放的削减, 成核模态粒径范围内的数浓度峰消失。

(3) 粒数浓度粒径分布的逐时变化规律显示, 北京常规交通状况下道路边超细颗粒物数浓度在午夜前后、正午前后和交通晚高峰期间显著增加, 符合交通流量的逐时变化规律。奥运交通状况下北四环

采样点附近日交通流量下降, 24 h 时均车流量差异减弱, 车队中高排放车比例下降, 同时道路上机动车平均行驶速度显著提高. 受到上述交通结构变化的影响, 道路边大气中 10 ~ 50 nm 的成核模态粒子数浓度平均下降 74.6%, 高于 10 ~ 100 nm 粒径段和 100 ~ 478 nm 粒径段粒子数浓度的降幅, 同时颗粒物粒径分布逐时变化趋于平缓.

参考文献:

- [1] Alföldy B, Giechaskiel B, Hofmann W, *et al.* Size-distribution dependent lung deposition of diesel exhaust particles[J]. *Journal of Aerosol Science*, 2009, **40**(8): 652-663.
- [2] Naganuma R, Sakurai M, Miura K, *et al.* Relation of long-term body weight change to change in lipoprotein particle size in Japanese men and women; the INTERMAP Toyama Study[J]. *Atherosclerosis*, 2009, **206**(1): 282-286.
- [3] Imhof D, Weingartner E, Ordóñez C, *et al.* Real-world emission factors of fine and ultrafine aerosol particles for different traffic situations in Switzerland [J]. *Environmental Science & Technology*, 2005, **39**(21): 8341-8350.
- [4] Zhang K M, Wexler A S, Niemeier D A, *et al.* Evolution of particle number distribution near roadways. Part III: traffic analysis and on-road size resolved particulate emission factors [J]. *Atmospheric Environment*, 2005, **39**(22): 4155-4166.
- [5] Westerdaal D, Wang X, Pan X C, *et al.* Characterization of on-road vehicle emission factors and microenvironmental air quality in Beijing, China [J]. *Atmospheric Environment*, 2009, **43**(3): 697-705.
- [6] Shi J P, Khan A A, Harrison R M, *et al.* Measurements of ultrafine particle concentration and size distribution in the urban atmosphere [J]. *Science of the Total Environment*, 1999, **235**(1-3): 51-64.
- [7] Kittelson D B, Watts W F, Johnson J P, *et al.* Nanoparticle emissions on Minnesota highways [J]. *Atmospheric Environment*, 2004, **38**(1): 9-19.
- [8] Chung A, Herner J D, Kleemen M J. Detection of alkaline ultrafine atmospheric particles at Bakersfield, California [J]. *Environmental Science & Technology*, 2001, **35**(11): 2184-2190.
- [9] McMurtry P H, Stolzenburg M R. On the sensitivity of particle size to relative humidity for Los Angeles aerosols [J]. *Atmospheric Environment*, 1989, **23**(2): 497-507.
- [10] 胡敏, 刘尚, 吴志军, 等. 北京夏季高温高湿和降水过程对大气颗粒物谱分布的影响 [J]. *环境科学*, 2006, **27**(11): 2293-2298.
- [11] 刘子锐, 孙扬, 李亮, 等. 2008 奥运和后奥运时段北京大气颗粒物质量浓度和数浓度比对研究 [J]. *环境科学*, 2011, **32**(4): 913-923.
- [12] 胡京南. 机动车尾气 PM_{2.5} 排放特征研究 [D]. 北京: 清华大学, 2005. 40-45.
- [13] 李新令, 黄震, 王嘉松, 等. 柴油机排气颗粒浓度和粒径分布特征试验研究 [J]. *内燃机学报*, 2007, **25**(2): 113-117.
- [14] Zhou Y, Wu Y, Yang L, *et al.* The Impact of transportation control measures on emission reductions during the 2008 Olympic Games in Beijing, China [J]. *Atmospheric Environment*, 2010, **44**(3): 285-293.
- [15] 杨柳, 吴烨, 郑轩, 等. 奥运期间北京交通环境细颗粒物中多环芳烃特征研究 [J]. *环境科学学报*, 2011, **31**(6): 1144-1153.
- [16] 李杏茹, 王英锋, 郭雪清, 等. 2008 年奥运期间北京不同粒径大气颗粒物中元素碳和有机碳的变化特征 [J]. *环境科学*, 2011, **32**(2): 313-318.
- [17] 黄书华, 刘建国, 刘文清, 等. 夏季高湿度条件下北京市气溶胶颗粒物粒径谱特征研究 [J]. *环境科学*, 2010, **31**(1): 17-21.
- [18] Whitby KT, Cantrell B K. Atmospheric aerosols: characteristics and measurement [A]. In: International conference on environmental sensing and assessment (ICESA) [C]. Las Vegas: Institute of Electrical and Electronic Engineers (IEEE), 1976. 6-9.
- [19] John W, Wall S M, Ondo J L, *et al.* Modes in the size distributions of atmospheric inorganic aerosol [J]. *Atmospheric Environment. Part A. General Topics*, 1990, **24**(9): 2349-2359.
- [20] Buffle J, Van Leeuwen H P. *Environmental Particles* [M]. FL: Lewis Publishers, 1992. 5-47.
- [21] Väkevä M, Hämeri K, Kulmala M, *et al.* Street level versus rooftop concentrations of submicron aerosol particles and gaseous pollutants in an urban street canyon [J]. *Atmospheric Environment*, 1999, **33**(9): 1385-1397.
- [22] Hussein T, Hämeri K, Aalto P P, *et al.* Modal structure and spatial-temporal variations of urban and suburban aerosols in Helsinki-Finland [J]. *Atmospheric Environment*, 2005, **39**(3): 1655-1668.
- [23] Zhu Y F, Hinds C W, Kim S, *et al.* Study of ultrafine particles near a major highway with heavy-duty diesel traffic [J]. *Atmospheric Environment*, 2002, **36**(27): 4323-4335.
- [24] 李新令, 黄震, 王嘉松, 等. 街道峡谷内超细颗粒数浓度和粒径分布特征试验研究 [J]. *环境科学*, 2007, **28**(4): 695-700.
- [25] Zhu Y F, Pudota J, Collins D, *et al.* Air pollutant concentrations near three Texas roadways, Part I: Ultrafine particles [J]. *Atmospheric Environment*, 2009, **43**(30): 4513-4522.
- [26] Cheng Y H, Huang C H, Huang H L, *et al.* Concentrations of ultrafine particles at a highway toll collection booth and exposure implications for toll collectors [J]. *Science of the Total Environment*, 2010, **409**(2): 364-369.
- [27] Noble C A, Mukerjee S, Gonzales M, *et al.* Continuous measurement of fine and ultrafine particulate matter, criteria pollutants and meteorological conditions in urban El Paso, Texas [J]. *Atmospheric Environment*, 2003, **37**(6): 827-840.
- [28] Longley I D, Gallagher M W, Dorsey J R, *et al.* A case study of aerosol ($4.6 \text{ nm} < D_p < 10 \text{ }\mu\text{m}$) number and mass size distribution measurements in a busy street canyon in Manchester,

- UK[J]. *Atmospheric Environment*, 2003, **37**(12): 1563-1571.
- [29] 高健, 王韬, 王文兴. 中国城市大气超细颗粒物浓度及粒径分布研究[A]. 见: 中国气象学会. 2006 年年会“大气成分与气候、环境变化”分会场论文集[C]. 成都: 中国气象学会, 2006. 879-885.
- [30] 高健, 程书会, 王进, 等. 济南大气细颗粒物粒径分布特征及来源机理分析[A]. 见: 全国气溶胶学会. 第九届全国气溶胶会议暨第三届海峡两岸气溶胶技术研讨会论文集[C]. 广州: 全国气溶胶学会, 2007. 61-69.
- [31] Zhang K M, Wexler A S. Evolution of particle number distribution near roadways-part I: analysis of aerosol dynamics and its implications for engine emission measurement [J]. *Atmospheric Environment*, 2004, **38**(38): 6643-6653.
- [32] Wehner B, Birmili W, Gnauk T, *et al.* Particle number size distributions in a street canyon and their transformation into the urban-air background: measurements and a simple model study [J]. *Atmospheric Environment*, 2002, **36**(13): 2215-2223.
- [33] 王嘉松, 陈达良, 宁治, 等. 不同燃料汽车排放超细微粒特性的实验研究[J]. *环境科学*, 2006, **27**(12): 2382-2385.
- [34] 李新令, 黄震, 王嘉松, 等. 汽油机排气颗粒粒径分布特征试验研究[J]. *环境化学*, 2008, **27**(1): 64-68.
- [35] Ntziachristos L, Samaras Z. An empirical method for predicting exhaust emissions of regulated pollutants from future vehicle technologies[J]. *Atmospheric Environment*, 2001, **35**(11): 1985-1999.
- [36] Wang S X, Zhao M, Xing J, *et al.* Quantifying the air pollutants emission reduction during the 2008 Olympic Games in Beijing [J]. *Environmental Science & Technology*, 2010, **44**(7): 2490-2496.
- [37] Kulmala M. How particles nucleate and grow [J]. *Science*, 2003, **302**(5647): 1000-1001.
- [38] 杨柳. 基于交通流控制的城市交通环境颗粒物污染特征研究[D]. 北京: 清华大学, 2011.

CONTENTS

Stable Carbon Isotope of Black Carbon from Typical Emission Sources in China	CHEN Ying-jun, CAI Wei-wei, HUANG Guo-peí, <i>et al.</i> (673)
Characteristics of Carbonaceous Aerosol Concentration in Snow and Ice of Glaciers in Tianshan Mountains	WANG Sheng-jie, ZHANG Ming-jun, WANG Fei-teng, <i>et al.</i> (679)
Size Distribution Properties of Atmospheric Aerosol Particles During Summer and Autumn in Lanzhou	ZHAO Su-ping, YU Ye, CHEN Jin-bei, <i>et al.</i> (687)
Particle Number Size Distribution near a Major Road with Different Traffic Conditions	YANG Liu, WU Ye, SONG Shao-jie, <i>et al.</i> (694)
Atmospheric Particle Formation Events in Nanjing During Summer 2010	WANG Hong-lei, ZHU Bin, SHEN Li-juan, <i>et al.</i> (701)
Characteristics of $\delta^{18}\text{O}$ in Precipitation and Moisture Transports over the Arid Region in Northwest China	LI Xiao-fei, ZHANG Ming-jun, LI Ya-ju, <i>et al.</i> (711)
Distributions and Seasonal Variations of Total Dissolved Inorganic Arsenic in the Estuaries and Coastal Area of Eastern Hainan	CAO Xiu-hong, REN Jing-ling, ZHANG Gui-ling, <i>et al.</i> (720)
Mixing Behavior of Arsenic in the Daliaohe Estuary	JIAN Hui-min, YAO Qing-zheng, YU Li-xia, <i>et al.</i> (727)
Variation Characteristics and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in the Surface Sediments of Bohai Bay	XU Ya-yan, SONG Jin-ming, LI Xue-gang, <i>et al.</i> (732)
Distribution of PAHs in Surface Seawater of Qingdao Coast Area and Their Preliminary Apportionment	LI Xian-guo, DENG Wei, ZHOU Xiao, <i>et al.</i> (741)
Atmospheric Deposition of PAHs in Dashiwei Karst Tiankeng Group in Leye, Guangxi	KONG Xiang-sheng, QI Shi-hua, HUANG Bao-jian, <i>et al.</i> (746)
Lead Isotope Signatures and Source Identification in Urban Soil of Baoshan District, Shanghai	DONG Chen-yin, ZHANG Wei-guo, WANG Guan, <i>et al.</i> (754)
Solute Transport Modeling Application in Groundwater Organic Contaminant Source Identification	WANG Shu-fang, WANG Li-ya, WANG Xiao-hong, <i>et al.</i> (760)
Quantitative Method of Representative Contaminants in Groundwater Pollution Risk Assessment	WANG Jun-jie, HE Jiang-tao, LU Yan, <i>et al.</i> (771)
Study on the Advanced Pre-treatments of Reclaimed Water Used for Groundwater Recharge	GAO Yu-tuan, ZHANG Xue, ZHAO Xuan, <i>et al.</i> (777)
Influence of <i>Ruditapes philippinarum</i> Aquaculture on Benthic Fluxes of Biogenic Elements in Jiaozhou Bay	DENG Ke, LIU Su-mei, ZHANG Gui-ling, <i>et al.</i> (782)
Influence of Spatial Difference on Water Quality in Jiuxiang River Watershed, Nanjing	HU He-bing, LIU Hong-yu, HAO Jing-feng, <i>et al.</i> (794)
Temporal and Spatial Variation of Non-Point Source Nitrogen in Surface Water in Urban Agricultural Region of Shanghai	WANG Nan, MAO Liang, HUANG Hai-bo, <i>et al.</i> (802)
Migration and Transformation of Heavy Metals in Street Dusts with Different Particle Sizes During Urban Runoff	HE Xiao-yan, ZHAO Hong-tao, LI Xu-yong, <i>et al.</i> (810)
Treatment Studies of Industrial Rainoff With a New Type of Constructed Wetland	HE Li-jun, MA Yong-wen, WAN Jin-quan, <i>et al.</i> (817)
Emergent Retention of Organic Liquid by Modified Bentonites: Property and Mechanism	LI Yu, LIU Xian-jun, ZHANG Xing-wang, <i>et al.</i> (825)
Production of Peroxide Hydrogen in <i>Chattonella ovata</i> Hong Kong Strain	JIANG Tao, WU Ni, ZHONG Yan, <i>et al.</i> (832)
Characteristics Study of Extracellular Active Substance of <i>Bacillus</i> sp. B1 on <i>Phaeocystis globosa</i>	LI Qiang, ZHAO Ling, YIN Ping-he (838)
Effects of Sediment on the Growth of <i>Microcystis</i> and <i>Anabaena</i> in Yanghe Reservoir	CHU Zhao-sheng, ZHANG Yu-bao, JIN Xiang-can, <i>et al.</i> (844)
New-Type Electroless Excilamp for Advanced Treatment on Nitrogen-Heterocyclic Compounds (NHCs) in Aqueous Solution	YE Zhao-lian, WANG Bin, LU Juan-juan, <i>et al.</i> (849)
Preparation and Electro-catalytic Characterization on La/Ce Doped Ti-base Lead Dioxide Electrodes	ZHENG Hui, DAI Qi-zhou, WANG Jia-de, <i>et al.</i> (857)
Study on Decolorization of Triphenylmethane Dyes by DTT	PAN Tao, LIU Da-wei, REN Sui-zhou, <i>et al.</i> (866)
Influences of pH and Complexing Agents on Degradation of Reactive Brilliant Blue KN-R by Ferrous Activated Persulfate	ZHANG Cheng, WAN Jin-quan, MA Yong-wen, <i>et al.</i> (871)
Degradation Kinetics of Ozone Oxidation on High Concentration of Humic Substances	ZHENG Ke, ZHOU Shao-qi, YANG Mei-mei (879)
Index of Stability and Its Mechanisms of Aerobic Granular System Using Volume-based Information Entropy	LI Zhi-hua, JI Xiao-qin, LI Sheng, <i>et al.</i> (885)
Relationship Between Physicochemical Characteristics of Activated Sludge and Polymer Conditioning Dosage	LI Ting, WANG Yi-li, FENG Jing, <i>et al.</i> (889)
Research of Aerobic Granule Characteristics with Different Granule Age	ZHOU Man, YANG Chang-zhu, PU Wen-hong, <i>et al.</i> (896)
Effect of Size and Number of Aerobic Granules on Nitrification and Denitrification	LI Zhi-hua, ZENG Jin-feng, LI Sheng, <i>et al.</i> (903)
Optimization and Comparison of Nitrogen and Phosphorus Removal by Different Aeration Modes in Oxidation Ditch	GUO Chang-zi, PENG Dang-cong, CHENG Xue-mei, <i>et al.</i> (910)
Effect of Acidification on the Dewaterability of Sewage Sludge in Bioleaching	ZHU Hai-feng, ZHOU Li-xiang, WANG Dian-zhan (916)
Microbial Ecology Analysis of the Biofilm from Two Biological Contact Oxidation Processes with Different Performance	QIAN Yin, QUAN Xiang-chun, PEI Yuan-sheng, <i>et al.</i> (922)
Altered Microbial Communities Change Soil Respiration Rates and Their Temperature Sensitivity	FAN Fen-liang, HUANG Ping-rong, TANG Yong-jun, <i>et al.</i> (932)
Storages and Distributed Patterns of Soil Organic Carbon and Total Nitrogen During the Succession of Artificial Sand-Binding Vegetation in Arid Desert Ecosystem	JIA Xiao-hong, LI Xin-rong, ZHOU Yu-yan, <i>et al.</i> (938)
Factors Controlling Soil Organic Carbon and Total Nitrogen Densities in the Upstream Watershed of Miyun Reservoir, North China	WANG Shu-fang, WANG Xiao-ke, OUYANG Zhi-yun (946)
Impact of Microbial Aggregating Agents on Soil Aggregate Stability Under Addition of Exogenous Nutrients	MO Yan-hua, TANG Jia, ZHANG Ren-duo, <i>et al.</i> (952)
Adsorption of Aflatoxin on Montmorillonite Modified by Low-Molecular-Weight Humic Acids	YAO Jia-jia, KANG Fu-xing, GAO Yan-zheng (958)
Influence of Operating Parameters on Surfactant-enhanced Washing to Remedy PAHs Contaminated Soil	WU Wei, JIANG Lin, CHEN Jia-jun, <i>et al.</i> (965)
Study on the Land Use Optimization Based on PPI	WU Xiao-feng, LI Ting (971)
Research on Algal Diversity in Zoige Alpine Wetland	CHEN Xi, LIU Ru-yin, WANG Yan-fen, <i>et al.</i> (979)
Effects of Three Fungicides on Arbuscular Mycorrhizal Fungal Infection and Growth of <i>Scutellaria baicalensis</i> Georgi	HE Xue-li, WANG Ping, MA Li, <i>et al.</i> (987)
Community Structure and Spatial Distribution of Anaerobic Ammonium Oxidation Bacteria in the Sediments of Chongming Eastern Tidal Flat in Summer	ZHENG Yan-ling, HOU Li-jun, LU Min, <i>et al.</i> (992)
Microbial Degradation of 2,2',4,4'-Tetrabrominated Diphenyl Ether Under Anaerobic Condition	LU Xiao-xia, CHEN Chao-qi, ZHANG Shu, <i>et al.</i> (1000)
Effect of Heavy Metals on Degradation of BDE-209 by White-rot Fungus	XIONG Shi-chang, YIN Hua, PENG Hui, <i>et al.</i> (1008)
Biodegradation Mechanism of DDT and Chlorpyrifos Using Molecular Simulation	LIN Yu-zhen, ZENG Guang-ming, ZHANG Yu, <i>et al.</i> (1015)
Construction of a Microbial Consortium RXS with High Degradation Ability for Cassava Residues and Studies on Its Fermentative Characteristics	HE Jiang, MAO Zhong-gui, ZHANG Qing-hua, <i>et al.</i> (1020)
Anaerobic Digestion of Animal Manure Contaminated by Tetracyclines	TONG Zi-lin, LIU Yuan-lu, HU Zhen-hu, <i>et al.</i> (1028)
Continuous Dry Fermentation of Pig Manure Using Up Plug-Flow Type Anaerobic Reactor	CHEN Chuang, DENG Liang-wei, XIN Xin, <i>et al.</i> (1033)

《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3月15日 33卷 第3期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 33 No. 3 Mar. 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