

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第3期

Vol.35 No.3

2014

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

青岛近海生物气溶胶中可培养微生物浓度及群落多样性的季节变化	祁建华, 武丽婧, 高冬梅, 金川 (801)
基于重庆本地碳成分谱的 PM _{2.5} 碳组分来源分析	张灿, 周志恩, 翟崇治, 白志鹏, 陈刚才, 姬亚芹, 任丽红, 方维凯 (810)
重庆市北碚城区大气污染物浓度变化特征观测研究	徐鹏, 郝庆菊, 吉东生, 张军科, 刘子锐, 胡波, 王跃思, 江长胜 (820)
基于气溶胶光学特性垂直分布的一次浮尘过程分析	王苑, 邓军英, 史兰红, 陈勇航, 张强, 王胜, 徐婷婷 (830)
基于悬铃木叶片重金属累积特性的大气污染分析和评价	刘玲, 方炎明, 王顺昌, 谢影, 汪承润 (839)
典型染整企业定型机废气排放特征及潜在环境危害浅析	徐志荣, 王鹏, 王浙明, 许明珠, 吴剑波, 李嫣 (847)
火电厂大气污染物排放标准实施效果的数值模拟研究	王占山, 潘丽波 (853)
国IV天然气公交车实际道路颗粒物排放特性	楼狄明, 成伟, 冯谦 (864)
稻草和玉米秸秆烟尘中的正构脂肪醇	刘刚, 李久海, 吴丹, 徐慧 (870)
河口湿地近地面大气 CO ₂ 浓度日变化和季节变化	张林海, 仝川, 曾从盛 (879)
三峡库区库中干流及支流水体夏季二氧化碳分压及扩散通量	李双, 王雨春, 操满, 钱慧君, 许涛, 周子然, 邓兵, 汪福顺 (885)
施用畜禽粪便堆肥的蔬菜地 CH ₄ 、N ₂ O 和 NH ₃ 排放特征	万合峰, 赵晨阳, 钟佳, 葛振, 魏源送, 郑嘉熹, 鄢玉龙, 韩圣慧, 郑博福, 李洪枚 (892)
干湿交替条件下不同晶型铁氧化物对水稻土甲烷排放的影响	张天娇, 汤佳, 庄莉, 熊格生, 刘志, 周顺桂 (901)
长江口邻近海域沉积物中生物硅溶解行为研究	吴彬, 吕伟香, 鲁超, 刘素美 (908)
汾河中游浮游藻类群落特征及水质分析	王爱爱, 冯佳, 谢树莲 (915)
基于三维荧光光谱-平行因子技术联用的湖泊浮游藻化学分类学研究	陈小娜, 韩秀荣, 苏荣国, 石晓勇 (924)
三峡库区典型消落带土壤及沉积物中溶解性有机质 (DOM) 的紫外-可见光谱特征	李璐璐, 江韬, 闫金龙, 郭念, 魏世强, 王定勇, 高洁, 赵铮 (933)
黄河口湿地表层沉积物中磷赋存形态的分析	于子洋, 杜俊涛, 姚庆祯, 陈洪涛, 于志刚 (942)
太湖和呼伦湖沉积物对磷的吸附特征及影响因素	揣小明, 杨柳燕, 程书波, 陈小锋, 穆云松 (951)
黄浦江溶解有机质光学特性与消毒副产物 NDMA 生成潜能的关系	董倩倩, 张艾, 李咏梅, 陈玲, 黄清辉 (958)
纳米零价铁降解水中多溴联苯醚 (PBDEs) 及降解途径研究	杨雨寒, 徐伟伟, 彭思侃, 卢善富, 相艳, 梁大为 (964)
铸铁还原氯乙酸的影响因素与机制研究	唐顺, 杨宏伟, 王小任, 解跃峰 (972)
磷回收对厌氧/好氧交替式生物滤池蓄磷/除磷的影响	张顺, 田晴, 汤曼琳, 李方 (979)
预处理方法对玉米芯作为反硝化固体碳源的影响	赵文莉, 郝瑞霞, 李斌, 张文怡, 杜鹏 (987)
陶粒 CANON 反应器的接种启动与运行	付昆明, 左早荣, 仇付国 (995)
冬季低温下 MBR 与 CAS 工艺运行及微生物群落特征	黄菲, 梅晓洁, 王志伟, 吴志超 (1002)
烷基多苷促进污泥水解产酸的研究	陈灿, 孙秀云, 黄诚, 沈锦优, 王连军 (1009)
高温厌氧消化中底物浓度对病原指示微生物杀灭的影响	操宏庆, 章菲菲, 李健, 童子林, 胡真虎 (1016)
兰州市大气降尘重金属污染评价及健康风险评价	李萍, 薛粟尹, 王胜利, 南忠仁 (1021)
珠江河口水域有机磷农药水生生态系统风险评价	郭强, 田慧, 毛潇萱, 黄韬, 高宏, 马建民, 吴军年 (1029)
海州湾表层沉积物重金属的来源特征及风险评价	李飞, 徐敏 (1035)
再生水无计划间接补充饮用水的雌激素健康风险	吴乾元, 邵一如, 王超, 孙艳, 胡洪营 (1041)
瓦埠湖流域庄墓镇农田土壤氮磷分布及流失风险评估	李如忠, 邵阳, 徐晶晶, 丁贵珍 (1051)
三峡库区消落带土壤汞形态分布与风险评价	张成, 陈宏, 王定勇, 孙荣国, 张金洋 (1060)
基于棕地的居民小区土壤重金属健康风险评价	陈星, 马建华, 李新宁, 刘德新, 李一蒙 (1068)
干旱区绿洲土壤氟污染生态风险评估研究	薛粟尹, 李萍, 王胜利, 南忠仁 (1075)
缙云山 3 种典型森林降雨过程及其氮素输入	孙素琪, 王玉杰, 王云琦, 张会兰, 于雷, 刘婕 (1081)
三峡库区兰陵溪小流域土地利用及景观格局对氮磷输出的影响	韩黎阳, 黄志霖, 肖文发, 田耀武, 曾立雄, 吴东 (1091)
黄土丘陵区县域农田土壤近 30 年有机碳变化及影响因素研究: 以甘肃庄浪县为例	师晨迪, 许明祥, 邱宇洁, 张志霞, 张晓伟 (1098)
天然林土壤有机碳及矿化特征研究	杨添, 戴伟, 安晓娟, 庞欢, 邹建美, 张瑞 (1105)
不同土壤湿润速率下中性紫色土磷素淋溶的动态变化	张思兰, 石孝均, 郭涛 (1111)
硫脲对酸性红壤 pH 值与金属元素有效性的影响	杨波, 王文, 曾清如, 周细红 (1119)
6 种陕北适生豆科植物生长对原油污染土壤的响应	山宝琴, 张永涛, 曹巧玲, 康振妍, 李淑媛 (1125)
基于 N:P 化学计量特征的高寒草甸植物养分状况研究	张仁懿, 徐当会, 陈凌云, 王刚 (1131)
人工生物结皮的发育演替及表土持水特性研究	吴丽, 陈晓国, 张高科, 兰书斌, 张德禄, 胡春香 (1138)
农田土壤自养微生物碳同化潜力及其功能基因数量、关键酶活性分析	陈晓娟, 吴小江, 简燕, 袁红朝, 周萍, 葛体达, 童成立, 邹冬生, 吴金水 (1144)
中亚热带马尾松林凋落物分解过程中的微生物与酶活性动态	宋影, 辜夕容, 严海元, 毛文韬, 吴雪莲, 万宇轩 (1151)
苏南地区香樟树皮中有机氯农药 (OCPs) 的污染水平及来源解析	周丽, 张秀蓝, 杨文龙, 李玲玲, 史双昕, 张利飞, 董亮, 黄业茹 (1159)
UV-B 辐射增强与 1,2,4-三氯苯污染复合胁迫对青菜生长的影响	刘翠英, 樊建凌, 徐向华 (1164)
Cu 和 Cd 胁迫下接种外生菌根真菌对油松根际耐热蛋白固持重金属能力的影响	张英伟, 柴立伟, 王东伟, 汪杰, 黄艺 (1169)
对硝基苯胺耐盐降解菌 S8 的筛选及特性研究	宋彩霞, 邓新平, 厉阍, 肖伟 (1176)
克雷伯氏菌生产絮凝剂 M-C11 的培养优化及其在污泥脱水中的应用	刘杰伟, 马俊伟, 刘彦忠, 杨娅, 岳东北, 王洪涛 (1183)
铅元素人为循环环境释放物形态分析	梁静, 毛建素 (1191)
污染排放与环境质量关系模型构建与应用	李名升, 孙媛, 陈远航, 张建辉 (1198)
微囊藻毒素微生物降解途径与分子机制研究进展	闫海, 王华生, 刘晓璐, 尹春华, 许倩倩, 吕乐, 马万彪 (1205)
《环境科学》征订启事 (809) 《环境科学》征稿简则 (819) 信息 (971, 978, 1050, 1175)	

国Ⅳ天然气公交车实际道路颗粒物排放特性

楼狄明, 成伟*, 冯谦

(同济大学汽车学院, 上海 201804)

摘要: 采用车载排放测试系统对国Ⅳ天然气公交车进行了实际道路排放测试, 研究其颗粒物排放特征及粒径分布随车速、加速度及比功率的变化规律。结果表明, 天然气公交车的颗粒物数量和质量排放率随车速的增加均逐渐升高, 而排放因子均逐渐减小; 怠速、低速、中速和高速工况下颗粒数量浓度均呈多峰对数分布, 核态颗粒数在总颗粒数中占大多数比例。随加速度的增大, 颗粒物排放率逐渐升高; 快加速工况颗粒物排放率明显高于匀速和慢减速工况, 而后二者之间相差不大。颗粒物的高排放集中在高车辆比功率(VSP)区间内, 并随 VSP 绝对值的增大逐渐升高。

关键词: 压缩天然气; 公交车; 实际道路; 车载; 颗粒物排放

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)03-0864-06 DOI: 10.13227/j.hjks.2014.03.008

On Road Particle Emission Characteristics of a Chinese Phase IV Natural Gas Bus

LOU Di-ming, CHENG Wei, FENG Qian

(School of Automotive Studies, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: An on-road experimental research was made on a Chinese phase IV natural gas bus using a Portable Emission Measurement System (PEMS), and particle emission characteristics under different vehicle speed, acceleration and vehicle specific power were investigated. The results show that particle number and mass emission rates increase and their emission factors decrease while the speed of the bus rises. Particle number concentration of different sizes shows multimodal logarithmic distribution pattern when the bus runs on all operation conditions (idle, low speed, medium speed and high speed), and nucleation mode particle account for a large proportion in the total particle number. With the increase of acceleration, particle emission rate rises, and it is lower when the bus runs at constant speed or slow deceleration condition than that at the fast acceleration condition. Furthermore, particle emission rate increases against the absolute value of the vehicle specific power (VSP).

Key words: compressed natural gas (CNG); bus; real road; on road / on-board; particle emission

柴油机由于其较高的热效率、良好的动力性和经济性而被广泛使用, 但其排气中 NO_x 和颗粒物却是大气污染的重要来源之一。随着机动车保有量的不断增加, 机动车尾气对大气的污染也日趋严重。为缓解环境污染等问题, 世界各国都相继出台了日益严格的排放法规^[1], 以限制机动车污染排放。欧洲即将实施的欧Ⅵ排放标准中, 重型柴油机 PM 排放限值降至 $0.01 \text{ g} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1}$, 比 2000 年的欧Ⅲ标准低 90%。同时, 世界范围内的石油资源短缺, 要求积极发展节能减排技术, 替代燃料技术^[2,3] 就是其中之一。

压缩天然气 (compressed natural gas, CNG) 是经加压并以气态储存在容器中的天然气, 其主要成分是甲烷 (CH_4)。CNG 成分单一, 纯度高, 不含硫、苯、烯烃等有害成分, 排气中无多环芳烃 (PAHs), 排气颗粒物毒性低; 辛烷值高, 抗爆性好; 燃烧温度低, 利于减少 NO_x 的排放^[4]; 作为气体燃料, 易与空气混合均匀, 利于燃烧充分, 排气污染低。同时, 天然

气资源丰富、价格便宜, 是最为理想的车用替代燃料之一。

国内外学者对 CNG 发动机颗粒物排放特性的研究已经取得一定的成果, Ristovski 等^[5,6]、Jayaratne 等^[7]、Quillen 等^[8] 都对 CNG 发动机颗粒物数量、质量排放特性及其粒径分布等进行了研究, 但主要集中于台架试验方面。由于机动车实际道路排放受行驶工况和交通状况的影响较大^[9~12], 为真实、可靠地反映车辆在实际道路上的排放状况, 近年来国内外学者也对隧道测试^[11,13]、路边遥感测试^[12,14~17] 和车载排放测试^[10,18,19] 等实际道路排放测试方法进行了广泛的研究。本研究基于 PEMS (portable emission measure system) 车载

收稿日期: 2013-07-16; 修订日期: 2013-09-03

基金项目: 上海市科技攻关计划项目 (10231201900)

作者简介: 楼狄明 (1963 ~), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为汽车发动机现代设计技术、发动机代用燃料与排放控制技术等, E-mail: loudiming@tongji.edu.cn

* 通讯联系人, E-mail: chengwei0617@126.com

排放测试系统对一辆满足国Ⅳ排放标准的 CNG 公交车在不同工况下的颗粒物排放特性和粒径分布进行了试验分析. 试验还对其主要气态物排放进行了测试,已于文献[20]中报道,其中 CO、THC、NO_x 和 CO₂ 全程排放因子分别为 7.39、13.2、40.2 和1 251 g·km⁻¹.

1 材料与方法

1.1 试验车辆

试验车辆选取的是一辆满足国Ⅳ排放标准的 CNG 公交车,车辆的主要参数如表 1 所示.

表 1 试验用公交车基本参数
Table 1 Specifications of Test Bus

车辆型号	SWB6107Q
总质量/kg	16 000
整备质量/kg	11 000
最高设计车速/km·h ⁻¹	80
额定功率/kW	155
发动机排量/mL	6 494
燃料种类	天然气 CNG(单燃料)
车辆制造日期	2011-10-14
后处理装置	SCR
排放标准	国Ⅳ

1.2 颗粒物测试仪器

本研究采用由美国 TSI 公司生产的发动机尾气颗粒粒径分析仪(engine exhaust particle sizer, EEPS),该仪器可快速测取发动机瞬态工况的排气颗粒数量及粒径分布,可测量的粒径范围为 5.6 ~ 560.0 nm,采样和分析频率高,0.1 s 内即可测取一个完整的颗粒数量浓度和粒径分布图谱,同步输出 32 个数据通道的颗粒数量浓度和粒径分布数据. 本试验中,从 CNG 公交车尾气抽取的样气,经过两级稀释后进入测试设备,总稀释比为 500:1. 第一级稀释系统采用 TSI 公司的专用旋转盘稀释器,为防止在稀释过程中高温排气遇冷空气,颗粒发生沉积或聚集而影响测试结果,稀释空气进入稀释器前经 80℃ 恒温加热,稀释比为 200:1;第二级稀释采用一个流量计对进气流量进行补偿,并同时稀释,稀释比为 2.5:1.

1.3 试验方案

由于在不同类型道路上或不同车流量时,车辆排放差别很大,本试验选择的路线覆盖了上海公交车在市区行驶的典型道路类型,路线全程共 22 km,其中市区主干道 10 km、次干道 6 km 和快速路 6 km,其分别占总里程的 46%、27% 和 27%.

2 结果与分析

2.1 工况分布及统计

图 1 为 CNG 公交车实际道路试验中的车速-加速度工况点分布. 从中可见,公交车车速有 99.7% 分布在 60 km·h⁻¹之内,加速度有 99.6% 分布在 -2 ~ 1.5 m·s⁻² 范围内,基本符合城市公交车怠速工况比例高,平均车速和加速度小的特征.

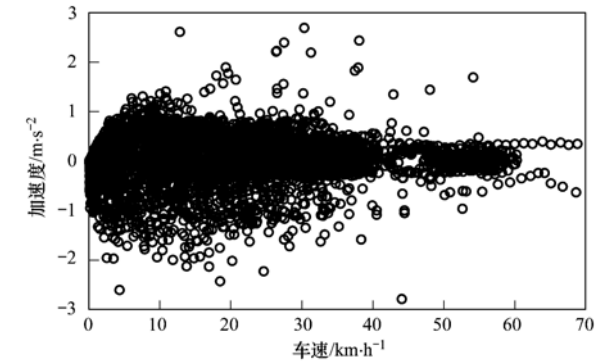


图 1 车速-加速度工况点分布
Fig. 1 Distribution of speed-acceleration driving pattern

本研究分析 CNG 公交车颗粒物排放特性随车速的变化关系时,为保证结果更接近真正意义上的稳态车速下的排放,统计时将加速度值限制在 [-0.1, 0.1] 之间. 同时,由于公交车运行于高速工况的时间较少,为保证每个车速区间下都有足够多的样本(即工况点),将 0 ~ 30 km·h⁻¹ 范围内的车速以 5 km·h⁻¹ 为间隔划分为不同区间,30 ~ 60 km·h⁻¹ 范围内的车速以 10 km·h⁻¹ 为间隔划分. 此外,为分析不同车速下颗粒物粒径分布的规律,将车速以 20 km·h⁻¹ 为间隔分成以下 4 个区间:怠速工况[0, 0.5] km·h⁻¹、低速工况(0.5, 20] km·h⁻¹、中速工况(20, 40] km·h⁻¹ 和高速工况(40, 60] km·h⁻¹.

在分析不同加速度下颗粒物粒径分布的规律时,选取快加速、匀速和慢减速工况作为典型加速度工况进行研究,并定义如下:快加速工况(0.5, ∞) m·s⁻²、匀速工况[-0.1, 0.1] m·s⁻² 和慢减速工况[-0.5, -0.1) m·s⁻².

另外,本文还研究了 CNG 公交车在不同比功率下的颗粒物排放特性. 车辆比功率(vehicle specific power, VSP)是由美国的 José 提出的,综合考虑了速度、加速度和坡度等对排放的影响,与机动车油耗及污染物排放具有较好的一致性,能更好地反映与污染物排放之间的关系^[21~23],其计算方法如下式所示.

$$\text{VSP} = v[1.1a + 9.81\arctan(\sin g) + 0.132] + 0.000302v^3$$

式中, VSP 为比功率($\text{kW}\cdot\text{t}^{-1}$); v 为车速($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$); a 为加速度($\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$); g 为道路坡度(弧度)。

由于选取的试验路线坡度变化不大, 数据分析时将道路坡度取为 0。试验工况的比功率值主要分布在 $-10 \sim 10 \text{ kW}\cdot\text{t}^{-1}$ 范围内, 因此数据分析时, 将该范围内的 VSP 值以 $2.5 \text{ kW}\cdot\text{t}^{-1}$ 为间隔划分为不同的区间, 比功率大于 $10 \text{ kW}\cdot\text{t}^{-1}$ 的工况很少, 都统计在 $15 \text{ kW}\cdot\text{t}^{-1}$ 下。

2.2 颗粒物排放与车速的关系

2.2.1 颗粒物排放与车速的瞬态响应关系

图 2 分别为国 IV CNG 公交车颗粒物数量 (particle number, PN) 排放率和质量 (particle mass, PM) 排放率与车速的瞬态响应关系。

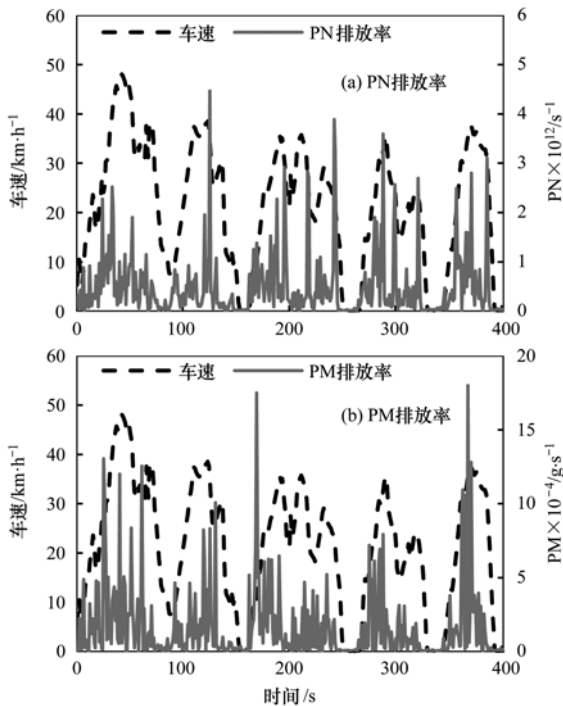


图 2 PN 和 PM 排放率与车速的瞬态响应关系

Fig. 2 Transient emission rates of particle number and mass

从图 2 可以看出, 颗粒物数量和质量排放率与车速均有着良好的对应关系。总体来看, 当试验车辆车速较低时, PN 和 PM 排放率均较低; 车速较高时, 排放率均较高; 车辆加速时, 排放率也逐渐增加, 急加速时, 甚至出现峰值; 减速时, 排放率均较低。这说明试验所采用的颗粒物测试仪器 EEPS 能较好地跟踪汽车行驶工况, 测试结果可靠。另外, 还可见连续加速或减速时, PN 和 PM 排放率变化剧烈, 这是因为加、减速过程中, 发动机工况变化剧烈, 瞬时

排气流量和压力变化较大且较快, 又经一定长度的排气管和消音器的影响, 颗粒粒径分析仪的采样处的气流变化也较为剧烈。

2.2.2 不同车速下的颗粒物排放特性

CNG 公交车的 PN 和 PM 排放率及排放因子随车速呈现较好的规律性, 如图 3 所示。

由图 3(a) 可以看出, 随车速的增加, CNG 公交车颗粒物数量和质量排放率均呈逐渐增加的趋势。车辆怠速时, PN 和 PM 排放率最低, 分别为 $3.16 \times 10^{10} \text{ s}^{-1}$ 和 $1.47 \times 10^{-5} \text{ g}\cdot\text{s}^{-1}$; 车速为 $30 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 时, PN 和 PM 排放率分别上升为怠速时的 14.6 倍和 12.5 倍; 车速大于 $30 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 时, PN 排放率上升趋势减缓; 车速为 $60 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 时, PN 和 PM 排放率与车速为 $30 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 时相比, 分别升高了 27.4% 和 40.5%。

图 3(b) 中, 随车速的增加, CNG 公交车颗粒物数量和质量排放因子均呈逐渐减小的趋势。由于车辆怠速时的行驶里程接近于零, 此时颗粒物排放因子理论上为无穷大, 故略去不做讨论。车速为 $5 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 时, PN 和 PM 排放因子较高, 分别为 $1.03 \times 10^{14} \text{ km}^{-1}$ 和 $4.92 \times 10^{-2} \text{ g}\cdot\text{km}^{-1}$; 在 $5 \sim 25 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 范围内, PN 和 PM 排放因子降幅较大, 降幅分别达 49.7% 和 63.4%; 车速高于 $25 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 时, 下降趋势均减缓; 车速为 $50 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 时, PN 和 PM 排放因子与车速为 $25 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 时相比, 分别降低了 10.6% 和 35.0%。

2.2.3 不同车速下的颗粒物粒径分布

试验还对 CNG 公交车在不同车速下的颗粒物数量浓度粒径分布做了分析研究, 如图 4 所示。

由图 4 可见, 从颗粒分布的宏观形态来看, CNG 公交车在不同车速范围内排放的颗粒数量浓度粒径分布均呈现较为明显的多峰对数分布。低速、中速、高速工况下的颗粒数量浓度均显著高于怠速工况, 且增幅依次增大, 此规律在 50 nm 以下的粒径范围内表现得非常明显。在 4 种不同车速工况下 $100 \sim 250 \text{ nm}$ 范围内的颗粒数量浓度相差不大, 说明车速对于该粒径范围内的颗粒数量浓度影响不大。

颗粒物按照其粒径大小, 通常可以分为核态颗粒和聚集态颗粒。一般将动力学当量直径 D_p 在 $5 \sim 50 \text{ nm}$ 范围内的颗粒称为核态颗粒, 主要与排气可溶有机组分 (soluble organic fraction, SOF)、硫化物等有关, 可能也含部分固体碳烟颗粒和金属化合物。此部分颗粒占柴油机排放颗粒物质量总量的 1% ~ 20%, 但占数量总量的 90% 以上。 D_p 在 $50 \sim 500 \text{ nm}$

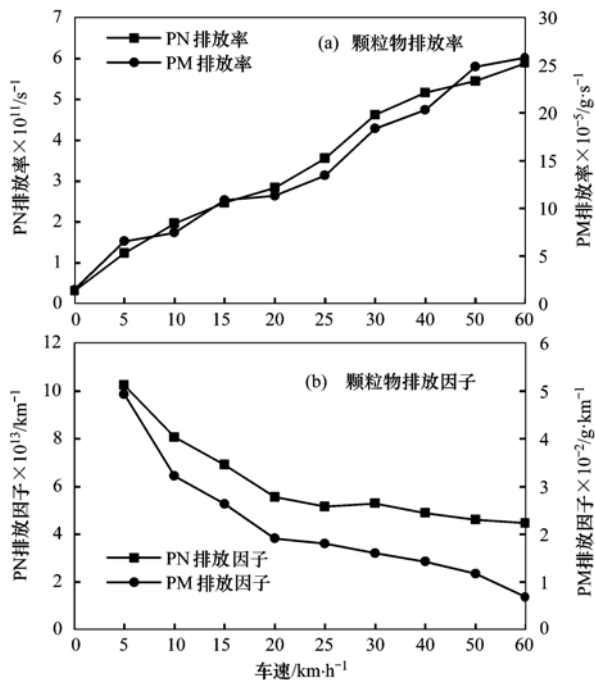


图3 不同车速下PN和PM排放率及排放因子

Fig. 3 Emission rates and factors of particle number and mass under different vehicle speed

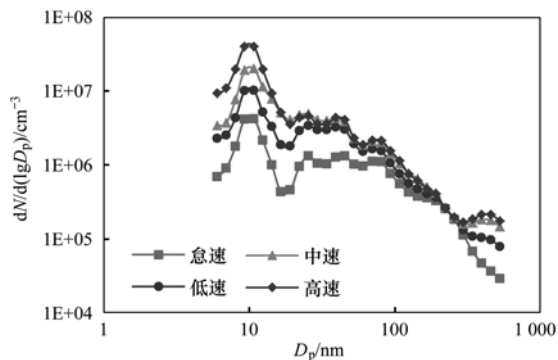


图4 不同车速下颗粒数量浓度粒径分布

Fig. 4 Particle size distribution under different vehicle speed

范围内的颗粒称为聚集态颗粒,主要由固体碳烟颗粒及其吸附物质组成^[24,25]. 本试验所用的颗粒物测试仪器 EEPS 能够测量的颗粒粒径范围为 5.6 ~ 560.0 nm,本研究将测得的颗粒中 D_p 小于 50 nm 的颗粒称为核态颗粒, D_p 大于 50 nm 的颗粒称为聚集态颗粒.

图5为CNG公交车在怠速、低速、中速和高速工况下的总颗粒数量浓度、核态颗粒数量浓度和聚集态颗粒数量浓度.

如图5所示,CNG公交车在4个车速工况下排气总颗粒数量浓度、核态颗粒数量浓度和聚集态颗粒数量浓度均呈上升趋势,且总颗粒数量浓度和核

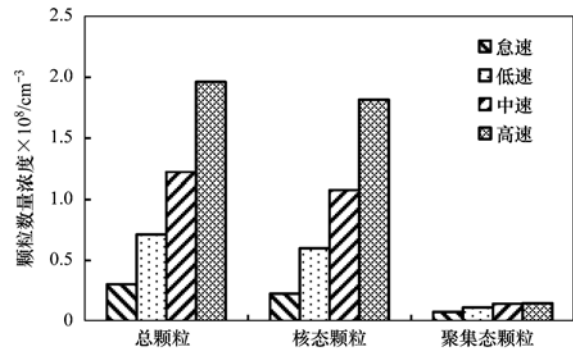


图5 不同车速下颗粒数量浓度

Fig. 5 Particle number concentration under different vehicle speed

态颗粒数量浓度变化较为明显. 在怠速、低速、中速、高速工况下,核态颗粒数在总颗粒数中所占比例分别为 74.5%、84.2%、88.3% 和 92.5%,可以看出,核态颗粒数在总颗粒数中占大多数比例,且随车速的升高,其所占的比例越大. 聚集态颗粒则占较小比例.

这是由 CNG 的理化特性和燃烧特性决定的. 一般认为柴油机排气中聚集态颗粒的主要成分固体碳烟颗粒生成的条件是高温和缺氧,尽管总体来说柴油机中的混合气燃烧时过量空气系数很高,但油气混合不均匀而造成的局部缺氧导致固体碳烟颗粒的生成,另外,缸内温度越高,烃类燃料裂解生成碳烟的速度越快,固体碳烟颗粒生成增多. 但由于 CNG 燃烧速度较慢,缸内最高燃烧温度较低;另一方面,CNG 作为气体燃料,进气时易与同为气体的空气混合均匀,有利于混合气充分燃烧,不利于固体碳烟颗粒的生成,因此 CNG 公交车排气颗粒物中聚集态颗粒较少,核态颗粒占主要比例.

2.3 颗粒物排放与加速度的关系

2.3.1 不同加速度下的颗粒物排放特性

分析不同加速度下的颗粒物排放特性及粒径分布时,选取较为典型的低速工况(0.5, 20] $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$. 图6为CNG公交车在不同加速度下颗粒物数量和质量排放率.

由图6可见,随加速度的增大,CNG公交车颗粒物数量和质量排放率均逐渐增加. 加速度小于0时,即减速时,PN和PM排放率整体较低,且随加速度的变化较平缓;加速度大于0时,即加速时,PN和PM排放率随加速度的增大而急剧升高. 加速度为 $1.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ 时,PN和PM排放率为 $3.88 \times 10^{11} \text{ s}^{-1}$ 和 $1.60 \times 10^{-4} \text{ g} \cdot \text{s}^{-1}$,分别是匀速(加速度为 $0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$) 时的 2.52 倍和 2.37 倍. 这是因为车辆在加速时,需要发动机提供较大功率,单位时间喷入发动机气

缸的 CNG 量增多,颗粒物排放也相应地增多。

2.3.2 不同加速度下的颗粒物粒径分布

图 7 所示为 CNG 公交车在快加速、匀速和慢减速工况下颗粒数量浓度的粒径分布。

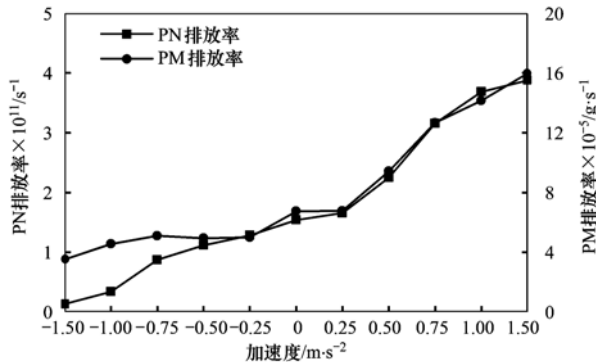


图 6 不同加速度下 PN 和 PM 排放率

Fig. 6 Particle number and mass emission rates under different accelerations

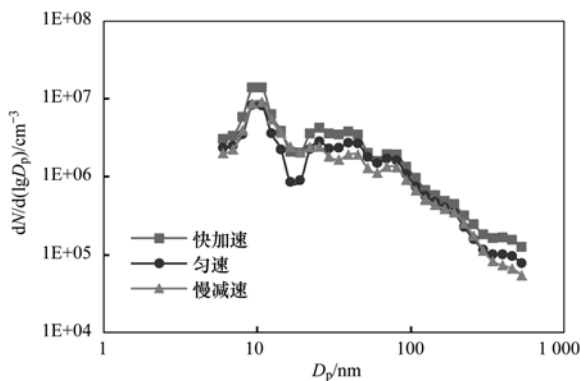


图 7 不同加速度下颗粒数量浓度粒径分布

Fig. 7 Particle size distribution under different accelerations

由图 7 可见,CNG 公交车在选取的 3 种典型范围的加速度工况下颗粒数量浓度粒径分布均呈现较明显的多峰对数分布。在仪器 EEPS 所能测得的所有粒径范围内,快加速工况下的颗粒数量浓度基本均高于匀速和慢减速工况。在粒径大于 20 nm 的范围内,匀速工况下的颗粒数量浓度略高于慢减速工况,在 20 ~ 90 nm 粒径范围内则较为明显。

图 8 为 CNG 公交车在不同加速度范围内的排气颗粒数量浓度。

如图 8 所示,CNG 公交车在快加速工况下排气总颗粒数量浓度、核态颗粒数量浓度和聚集态颗粒数量浓度均远高于匀速和慢减速工况,而匀速和慢减速工况之间差别不大。在快加速、匀速和慢减速工况下,核态颗粒数在总颗粒数中均占大多数比例,比例分别为 85.2%、81.1% 和 84.9%。

2.4 颗粒物排放与比功率的关系

CNG 公交车在不同比功率下的颗粒数量和质量排放率如图 9。

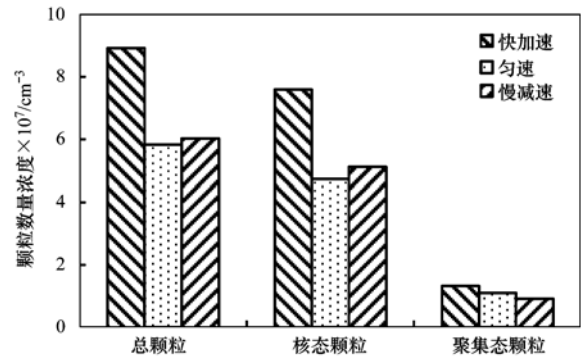


图 8 不同加速度下颗粒数量浓度

Fig. 8 Particle number concentration under different accelerations

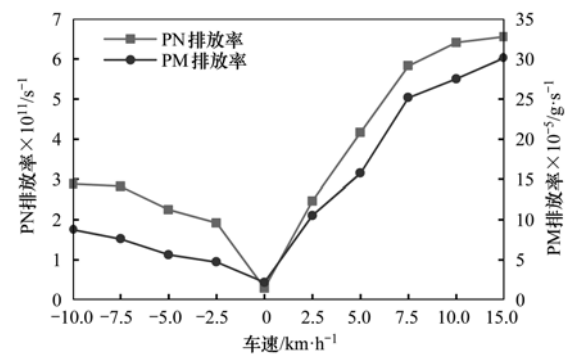


图 9 不同比功率下 PN 和 PM 排放率

Fig. 9 Particle number and mass emission rates under different vehicle specific power

如图 9 所示,不同比功率区间内,CNG 公交车在比功率为 0 $\text{kW} \cdot \text{t}^{-1}$ 时 PN 和 PM 排放率均达到最低点(考虑了怠速的排放),并呈现“V”型分布。随着 VSP 绝对值的增大,PN 和 PM 排放率均逐渐升高;VSP > 0 时,升高趋势更为明显,在 VSP = 15 $\text{kW} \cdot \text{t}^{-1}$ 时,PN 和 PM 排放率均达到最高值,分别为 $6.55 \times 10^{11} \text{ s}^{-1}$ 和 $3.0 \times 10^{-4} \text{ g} \cdot \text{s}^{-1}$ 。这是因为 VSP < 0 时,车辆加速度为负值,且比功率值越小,越趋向于急减速,急减速时,燃烧条件恶劣,燃烧不充分,颗粒物排放增多;VSP > 0 时,比功率值越大,加速度越大,越趋向于急加速,按 2.6 节中的分析,急加速时颗粒物排放增多。从排放控制的角度看,应该减少高 VSP 工况的出现,即驾驶过程中应尽量避免急加速、急减速,改善驾驶条件,是减少污染物排放的有效途径之一。

3 结论

(1) 随车速的增加,CNG 公交车的 PN 和 PM

排放率均逐渐升高,而 PN 和 PM 排放因子均逐渐降低;在怠速、低速、中速、高速工况下的排气颗粒数量浓度均呈多峰对数分布,颗粒数量浓度依次升高,核态颗粒在总颗粒数中占大多数比例,且其所占的比例依次增大,比例分别为 74.5%、84.2%、88.3% 和 92.5%。聚集态颗粒则占较小比例。

(2) 随加速度的增大,CNG 公交车的 PN 和 PM 排放率均逐渐升高,车辆加速时,升高趋势明显;在快加速、匀速和慢减速工况下的排气颗粒数量浓度均呈多峰对数分布,快加速工况基本均高于匀速和慢减速工况,而后二者之间差别不大。核态颗粒在总颗粒数中均占大多数比例。

(3) 不同比功率区间内,CNG 公交车 PN 和 PM 排放率均呈“V”型分布。颗粒物的高排放集中在高 VSP 区间内,并随 VSP 绝对值的增大逐渐升高。

参考文献:

- [1] 帅石金,唐韬,赵彦光,等. 柴油车排放法规及后处理技术的现状与展望[J]. 汽车安全与节能学报, 2012, 3(3): 200-217.
- [2] Ajanovic A, Haas R. Technological, ecological and economic perspectives for alternative automotive technologies up to 2050 [C]. Kathmandu, Nepal: IEEE International Conference on Sustainable Energy Technologies, 2012.
- [3] Sobin N, Molenaar K, Cahill E. Mapping goal alignment of deployment programs for alternative fuel technologies: An analysis of wide-scope grant programs in the United States [J]. Energy Policy, 2012, 51: 405-416.
- [4] 孙济美. 天然气和液化石油气汽车[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2010.
- [5] Ristovski Z D, Morawska L, Hitchins J, et al. Particle emissions from compressed natural gas engines [J]. Journal of Aerosol Science, 2000, 31(4): 403-413.
- [6] Ristovski Z, Morawska L, Ayoko G A, et al. Emissions from a vehicle fitted to operate on either petrol or compressed natural gas [J]. Science of the Total Environment, 2004, 323(1-3): 179-194.
- [7] Jayaratne E R, Meyer N K, Ristovski Z D, et al. Volatile properties of particles emitted by compressed natural gas and diesel buses during steady-state and transient driving modes [J]. Environmental Science and Technology, 2012, 46(1): 196-203.
- [8] Quillen K, Bennett M, Volckens J, et al. Characterization of particulate matter emissions from a four-stroke, lean-burn, natural gas engine[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2008, 130(5): 52805-52807.
- [9] Joumard R, Andre M, Vidon R, et al. Influence of driving cycles on unit emissions from passenger cars [J]. Atmospheric Environment, 2000, 34(27): 4621-4628.
- [10] 葛蕴珊,王爱娟,王猛,等. PEMS 用于城市车辆实际道路气体排放测试[J]. 汽车安全与节能学报, 2010, 1(2): 141-145.
- [11] John C, Friedrich R, Staehelin J, et al. Comparison of emission factors for road traffic from a tunnel study (Gubrist tunnel, Switzerland) and from emission modeling [J]. Atmospheric Environment, 1999, 33(20): 3367-3376.
- [12] Chan T L, Ning Z, Leung C W, et al. On-road remote sensing of petrol vehicle emissions measurement and emission factors estimation in Hong Kong [J]. Atmospheric Environment, 2004, 38(14): 2055-2066.
- [13] 朱春,张旭. 柴油/CNG 公交车排放颗粒物粒径分布特征隧道实测研究[J]. 环境科学, 2010, 31(10): 2279-2284.
- [14] Smit R, Bluett J. A new method to compare vehicle emissions measured by remote sensing and laboratory testing: High-emitters and potential implications for emission inventories[J]. Science of the Total Environment, 2011, 409(13): 2626-2634.
- [15] Jayaratne E R, Meyer N K, Ristovski Z D, et al. Critical analysis of high particle number emissions from accelerating compressed natural gas buses [J]. Environmental Science and Technology, 2010, 44(10): 3724-3731.
- [16] Jayaratne E R, He C, Ristovski Z D, et al. A comparative investigation of ultrafine particle number and mass emissions from a fleet of on-road diesel and CNG buses [J]. Environmental Science and Technology, 2008, 42(17): 6736-6742.
- [17] Jayaratne E R, Morawska L, Ristovski Z D, et al. Rapid identification of high particle number emitting on-road vehicles and its application to a large fleet of diesel buses [J]. Environmental Science and Technology, 2007, 41(14): 5022-5027.
- [18] Lee D, Zietsman J, Farzaneh M, et al. Characterization of on-road emissions of compressed natural gas and diesel refuse trucks [J]. Transportation Research Record, 2011, 2233: 80-89.
- [19] Hu J N, Wu Y, Wang Z S, et al. Real-world fuel efficiency and exhaust emissions of light-duty diesel vehicles and their correlation with road conditions [J]. Journal of Environmental Sciences, 2012, 24(5): 865-874.
- [20] Lou D M, Qian S L, Hu Z Y, et al. On-road gaseous emission characteristics of china IV CNG bus in Shanghai[C]. Dalian, China: 4th International Conference on Manufacturing Science and Engineering, 2013.
- [21] José L J. Understanding and Quantifying Motor Vehicle Emissions with Vehicle Specific Power and TILDAS Remote Sensing[D]. Cambridge US: Massachusetts Institute of Technology, 1999.
- [22] José L J, Peter M, McRae G J. Vehicle Specific Power: A Useful Parameter for Remote Sensing and Emission Studies[C]. San Diego US: 9th CRC On-Road Vehicle Emission Workshop, 1999.
- [23] 潘汉生,陈长虹,景启国,等. 轻型柴油车排放特性与机动车比功率分布的实例研究[J]. 环境科学学报, 2005, 25(10): 1306-1313.
- [24] Kittelson D B. Engines and nanoparticles: A review [J]. Journal of Aerosol Science, 1998, 29(5-6): 575-588.
- [25] 王军方,葛蕴珊,何超,等. 汽油车和天然气汽车颗粒物排放特性研究[J]. 汽车工程, 2009, 31(2): 137-140.

CONTENTS

Concentration and Community Diversity of Microbes in Bioaerosols in the Qingdao Coastal Region	QI Jian-hua, WU Li-jing, GAO Dong-mei, <i>et al.</i> (801)
Carbon Source Apportionment of PM _{2.5} in Chongqing Based on Local Carbon Profiles	ZHANG Can, ZHOU Zhi-en, ZHAI Chong-zhi, <i>et al.</i> (810)
Observation of Atmospheric Pollutants in the Urban Area of Beibei District, Chongqing	XU Peng, HAO Qing-ju, JI Dong-sheng, <i>et al.</i> (820)
A Floating-Dust Case Study Based on the Vertical Distribution of Aerosol Optical Properties	WANG Yuan, DENG Jun-ying, SHI Lan-hong, <i>et al.</i> (830)
Analysis and Assessment of Atmospheric Pollution Based on Accumulation Characterization of Heavy Metals in <i>Platanus acerifolia</i> Leaves	LIU Ling, FANG Yan-ming, WANG Shun-chang, <i>et al.</i> (839)
Study on the Emission Characteristics and Potential Environment Hazards of the Heat-setting Machine of the Typical Dyeing and Finishing Enterprise	XU Zhi-rong, WANG Peng, WANG Zhe-ming, <i>et al.</i> (847)
Implementation Results of Emission Standards of Air Pollutants for Thermal Power Plants; a Numerical Simulation	WANG Zhan-shan, PAN Li-bo (853)
On Road Particle Emission Characteristics of a Chinese Phase IV Natural Gas Bus	LOU Di-ming, CHENG Wei, FENG Qian (864)
Chemical Compositions of <i>n</i> -Alkanols in Smoke from Rice and Maize Straw Combustion	LIU Gang, LI Jiu-hai, WU Dan, <i>et al.</i> (870)
Diurnal and Seasonal Variations of Surface Atmospheric CO ₂ Concentration in the River Estuarine Marsh	ZHANG Lin-hai, TONG Chuan, ZENG Cong-sheng (879)
Partial Pressure and Diffusion Flux of Dissolved Carbon Dioxide in the Mainstream and Tributary of the Central Three Gorges Reservoir in Summer	LI Shuang, WANG Yu-chun, CAO Man, <i>et al.</i> (885)
Emission of CH ₄ , N ₂ O and NH ₃ from Vegetable Field Applied with Animal Manure Composts	WAN He-feng, ZHAO Chen-yang, ZHONG Jia, <i>et al.</i> (892)
Effects of Different Iron Oxides on Methane Emission in Paddy Soil as Related to Drying/Wetting Cycles	ZHANG Tian-jiao, TANG Jia, ZHUANG Li, <i>et al.</i> (901)
Study on the Dissolution Behavior of Biogenic Silica in the Changjiang Estuary Adjacent Sea	WU Bin, LÜ Wei-xiang, LU Chao, <i>et al.</i> (908)
Phytoplankton Community Structure and Assessment of Water Quality in the Middle and Lower Reaches of Fenhe River	WANG Ai-ai, FENG Jia, XIE Shu-lian (915)
Lake Algae Chemotaxonomy Technology Based on Fluorescence Excitation Emission Matrix and Parallel Factor Analysis	CHEN Xiao-na, HAN Xiu-rong, SU Rong-guo, <i>et al.</i> (924)
Ultraviolet-Visible (UV-Vis) Spectral Characteristics of Dissolved Organic Matter (DOM) in Soils and Sediments of Typical Water-Level Fluctuation Zones of Three Gorges Reservoir Areas	LI Lu-lu, JIANG Tao, YAN Jin-long, <i>et al.</i> (933)
Distribution of Phosphorus in Surface Sediments from the Yellow River Estuary Wetland	YU Zi-yang, DU Jun-tao, YAO Qing-zhen, <i>et al.</i> (942)
Characteristics and Influencing Factors of Phosphorus Adsorption on Sediment in Lake Taihu and Lake Hulun	CHUAI Xiao-ming, YANG Liu-yan, CHENG Shu-bo, <i>et al.</i> (951)
Linking Optical Properties of Dissolved Organic Matter with NDMA Formation Potential in the Huangpu River	DONG Qian-qian, ZHANG Ai, LI Yong-mei, <i>et al.</i> (958)
Reductive Debromination of Polybrominated Diphenyl Ethers in Aquifer by Nano Zero-valent Iron; Debromination Kinetics and Pathway	YANG Yu-han, XU Wei-wei, PENG Si-kan, <i>et al.</i> (964)
Influencing Factors and Reaction Mechanism of Chloroacetic Acid Reduction by Cast Iron	TANG Shun, YANG Hong-wei, WANG Xiao-mao, <i>et al.</i> (972)
Effect of Phosphorus Recovery on Phosphorous Bioaccumulation/Harvesting in an Alternating Anaerobic/Aerobic Biofilter System	ZHANG Shun, TIAN Qing, TANG Man-lin, <i>et al.</i> (979)
Effects of Pretreatment Methods on Corncob as Carbon Source for Denitrification	ZHAO Wen-li, HAO Rui-xia, LI Bin, <i>et al.</i> (987)
Start-Up by Inoculation and Operation of a CANON Reactor with Haydite as the Carrier	FU Kun-ming, ZUO Zao-rong, QIU Fu-guo (995)
Diversity of Operation Performance and Microbial Community Structures in MBRs and CAS Processes at Low Temperature	HUANG Fei, MEI Xiao-jie, WANG Zhi-wei, <i>et al.</i> (1002)
Enhanced Hydrolysis and Acidification of Waste Activated Sludge by Alkyl Polyglycosides	CHEN Can, SUN Xiu-yun, HUANG Cheng, <i>et al.</i> (1009)
Effect of Substrate Concentration on Pathogen Indicators Inactivation During Thermophilic Anaerobic Digestion	CAO Hong-qing, ZHANG Fei-fei, LI Jian, <i>et al.</i> (1016)
Pollution Evaluation and Health Risk Assessment of Heavy Metals from Atmospheric Deposition in Lanzhou	LI Ping, XUE Su-yin, WANG Sheng-li, <i>et al.</i> (1021)
Ecological Risk Assessment of Organophosphorus Pesticides in Aquatic Ecosystems of Pearl River Estuary	GUO Qiang, TIAN Hui, MAO Xiao-xuan, <i>et al.</i> (1029)
Source Characteristics and Contamination Evaluation of Heavy Metals in the Surface Sediments of Haizhou Bay	LI Fei, XU Min (1035)
Health Risk Induced by Estrogens During Unplanned Indirect Potable Reuse of Reclaimed Water from Domestic Wastewater	WU Qian-yuan, SHAO Yi-ru, WANG Chao, <i>et al.</i> (1041)
Distribution Characteristics and Erosion Risk of Nitrogen and Phosphorus in Soils of Zhuangmu Town in Lake Wabuhu Basin	LI Ru-zhong, ZOU Yang, XU Jing-jing, <i>et al.</i> (1051)
Distribution and Risk Assessment of Mercury Species in Soil of the Water-Level-Fluctuating Zone in the Three Gorges Reservoir	ZHANG Cheng, CHEN Hong, WANG Ding-yong, <i>et al.</i> (1060)
Health Risk Assessment of Soil Heavy Metals in Residential Communities Built on Brownfields	CHEN Xing, MA Jian-hua, LI Xin-ning, <i>et al.</i> (1068)
Study on Ecological Risk Assessment Technology of Fluoride Pollution from Arid Oasis Soil	XUE Su-yin, LI Ping, WANG Sheng-li, <i>et al.</i> (1075)
Rainfall Process and Nitrogen Input in Three Typical Forests of Jinyun Mountain	SUN Su-qi, WANG Yu-jie, WANG Yun-qi, <i>et al.</i> (1081)
Effects of Land Use and Landscape Pattern on Nitrogen and Phosphorus Exports in Lanlingxi Watershed of the Three Gorges Reservoir Area, China	HAN Li-yang, HUANG Zhi-lin, XIAO Wen-fa, <i>et al.</i> (1091)
Changes and Influencing Factors of the Soil Organic Carbon in Farmland in the Last 30 Years on Hilly Loess Plateau; A Case Study in Zhuanglang County, Gansu Province	SHI Chen-di, XU Ming-xiang, QIU Yu-jie, <i>et al.</i> (1098)
Organic Carbon and Carbon Mineralization Characteristics in Nature Forestry Soil	YANG Tian, DAI Wei, AN Xiao-juan, <i>et al.</i> (1105)
Dynamic Change of Phosphorus Leaching of Neutral Purple Soil at Different Re-wetting Rate	ZHANG Si-lan, SHI Xiao-jun, GUO Tao (1111)
Effects of Thiourea on pH and Availability of Metal Ions in Acid Red Soil	YANG Bo, WANG Wen, ZENG Qing-ru, <i>et al.</i> (1119)
Growth Responses of Six Leguminous Plants Adaptable in Northern Shaanxi to Petroleum Contaminated Soil	SHAN Bao-qin, ZHANG Yong-tao, CAO Qiao-ling, <i>et al.</i> (1125)
Plant N Status in the Alpine Grassland of the Qinghai-Tibet Plateau; Base on the N:P Stoichiometry	ZHANG Ren-yi, XU Dang-hui, CHEN Ling-yun, <i>et al.</i> (1131)
Development and Succession of Artificial Biological Soil Crusts and Water Holding Characteristics of Topsoil	WU Li, CHEN Xiao-guo, ZHANG Gao-ke, <i>et al.</i> (1138)
Carbon Dioxide Assimilation Potential, Functional Gene Amount and RubisCO Activity of Autotrophic Microorganisms in Agricultural Soils	CHEN Xiao-juan, WU Xiao-hong, JIAN Yan, <i>et al.</i> (1144)
Dynamics of Microbes and Enzyme Activities During Litter Decomposition of <i>Pinus massoniana</i> Forest in Mid-subtropical Area	SONG Ying, GU Xi-rong, YAN Hai-yuan, <i>et al.</i> (1151)
Levels and Possible Sources of Organochlorine Pesticides (OCPs) in Camphor (<i>Cinnamomum camphora</i>) Tree Bark from Southern Jiangsu, China	ZHOU Li, ZHANG Xiu-lan, YANG Wen-long, <i>et al.</i> (1159)
Combined Stress of Enhanced UV-B Radiation and 1,2,4-Trichlorobenzene Contamination on the Growth of Green Vegetable	LIU Cui-ying, FAN Jian-ling, XU Xiang-hua (1164)
Effect of Ectomycorrhizae on Heavy Metals Sequestration by Thermostable Protein in Rhizosphere of <i>Pinus tabulaeformis</i> Under Cu and Cd Stress	ZHANG Ying-wei, CHAI Li-wei, WANG Dong-wei, <i>et al.</i> (1169)
Isolation and Characterization of a Halotolerant <i>p</i> -nitroaniline Degrading Strain S8	SONG Cai-xia, DENG Xin-ping, LI Tian, <i>et al.</i> (1176)
Optimized Cultivation of a Bioflocculant M-C11 Produced by <i>Klebsiella pneumoniae</i> and Its Application in Sludge Dewatering	LIU Jie-wei, MA Jun-wei, LIU Yan-zhong, <i>et al.</i> (1183)
Speciation Analysis of Lead Losses from Anthropogenic Flow in China	LIANG Jing, MAO Jian-su (1191)
Establishment and Application of Pollutant Discharge-Environment Quality Model	LI Ming-sheng, SUN Yuan, CHEN Yuan-hang, <i>et al.</i> (1198)
Advances in the Pathway and Molecular Mechanism for the Biodegradation of Microcystins	YAN Hai, WANG Hua-sheng, LIU Xiao-lu, <i>et al.</i> (1205)

《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)

2014年3月15日 35卷 第3期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 3 Mar. 15, 2014

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: 90.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行