ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第2期

Vol.35 No.2

2014

中国科学院生态环境研究中心 主办

科学出版社 出版

双奖期刊

环境科学
(HUANJING KEXUE) ENVIRONMENTAL SCIENCE
第35卷 第2期
2014年2月15日

目 次

我国环境空气中颗粒物达标统计要求研究 …… 王帅,丁俊男,王瑞斌,李健军,孟晓艳,杨彬,林宏(401)
北京城区 $PM_{2.5}$ 中致癌重金属季节变化特征及其来源分析 …… 陶俊,张仁健,段菁春,荆俊山,朱李华,陈忠明,赵岳,曹军骥(411)
北京地区冬春 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 污染水平时空分布及其与气象条件的关系 …… 赵晨曦,王云琦,王玉杰,张会兰,赵冰清(418)
北京市 $PM_{5.0}$ 可吸入颗粒物反演及其时空分布分析 …… 王艳慧,肖瑶(428)
杭州市春季大气超细颗粒物粒径谱分布特征 …… 谢小芳,孙在,杨文俊(436)
春节期间南京市大气气溶胶粒径分布特征 …… 王红磊,朱彬,沈利娟,刘晓慧,张泽锋,杨洋(442)
南京市大气颗粒物中有机碳和元素碳粒径分布特征 …… 吴梦龙,郭照冰,刘凤玲,刘杰,卢霞,姜琳娴(451)
忻州市环境空气 PM_{10} 中有机碳和元素碳污染特征分析 …… 史美鲜,彭林,刘效峰,牟玲,白慧玲,刘凤娴,杨花(458)
广州某工业区大气中 PCDD/Fs 含量水平及其季节性变化特征 …… 青宪,苏原,苏青,张素坤,任明忠(464)
燃煤电厂锅炉 $PM_{2.5}$ 排放危害度评价模型建立及案例分析 … 史妍婷,杜谦,高建民,边昕,王知溥,董鹤鸣,韩强,曹阳 (470)
中国南海大气降水化学特征 …… 肖红伟,龙爱民,谢露华,肖化云,刘丛强(475)
临安本底站酸雨长期观测特征分析 …… 李正泉, 马浩, 毛裕定, 冯涛(481)
北京城区大气氮湿沉降特征研究 …… 贺成武,任玉芬,王效科,毛宇翔(490)
烟雾箱与数值模拟研究苯和乙苯的臭氧生成潜势 …… 贾龙, 徐永福(495)
祁连山老虎沟 12 号冰川积雪中飞灰颗粒物的特征 …… 董志文,秦大河,秦翔,杜志恒,陈记祖,任贾文 (504)
生活垃圾填埋场作业面恶臭散发率研究 …… 羌宁,王红玉,赵爱华,袁文祥,邰俊,陈檬(513)
生物滴滤塔处理苯酚气体研究 …… 何觉聪,黄倩茹,陈洲洋,叶杞宏,罗雨薇,魏在山(520)
国Ⅴ柴油机燃用丁醇-柴油混合燃料颗粒粒径分布特性试验研究 …… 楼狄明,徐宁,范文佳,张涛(526)
翻堆频率对猪粪条垛堆肥过程温室气体和氨气排放的影响 …… 赵晨阳,李洪枚,魏源送,钟佳,郑嘉熹,韩圣慧,万合锋(533)
$CuBr_2$ 分解缓释-膜催化对零价汞的氧化性能研究 …… 胡林刚,瞿赞,晏乃强,郭永福,谢江坤,贾金平(541)
浙闽沿岸海域总溶解态无机锑的分布及影响因素研究 …… 张许州,任景玲,刘宗广,樊孝鹏,刘诚刚,吴莹(547)
基于双向算法的湖库允许纳污负荷量计算及案例 …… 贾海峰,郭羽(555)
北京平原区第四系地下水污染风险评价 …… 郭高轩,李宇,许亮,李志萍,杨庆,许苗娟(562)
不同季节辽河口营养盐的河口混合行为 …… 张晋华,于立霞,姚庆祯,田琳(569)
太滆南运河入湖河口沉积物氮素分布特征 …… 马久远,王国祥,李振国,张佳,周锋,魏宏农,欧媛(577)
亚热带地区潜流人工湿地木本植物筛选与净化潜力评价 …… 陈永华,吴晓芙,郝君,陈明利,朱光玉(585)
潜流人工湿地基质结构与水力特性相关性研究 …… 白少元,宋志鑫,丁彦礼,游少鸿,何珊(592)
凤眼莲对铜绿微囊藻生长及藻毒素与营养盐释放的影响 …… 周庆,韩士群,严少华,宋伟,刘国锋(597)
不同预氧化剂对长江原水氯(胺)化 DBPs 生成潜能的影响 …… 田富箱,徐斌,荣蓉,陈英英,张天阳,朱贺振(605)
溴化十六烷基吡啶改性沸石对水中菲的吸附作用 …… 李佳, 林建伟, 詹艳慧, 陈祖梅, 王鹏钧(611)
四环素光催化降解特性与选择性研究 …… 宋晨怡,尹大强(619)
微生物电解系统生物阴极的硫酸盐还原特性研究 …… 符诗雨,刘广立,骆海萍,张仁铎,章莹颖(626)
市政污水 A/DAT-IAT 系统中溶解性有机物表征与生态安全 …… 杨赛,周启星,华涛(633)
膜-生物反应器处理高盐废水膜面污染物特性研究 …… 李彬,王志伟,安莹,吴志超(643)
臭氧-曝气生物滤池组合工艺处理石化二级出水的试验研究 …… 刘明国,吴昌永,周岳溪,高祯,王佩超,杨琦,董德(651)
厌氧生物法处理果胶废水的研究 …… 陈兵兵,杨春平,黎想,代传花,彭蓝艳(657)
氧氟沙星在碳纳米管上的吸附机制研究 …… 赵兴兴,于水利,王哲(663)
平菇菌糠对废水中铜离子的生物吸附性能 …… 胡晓婧,藏婷婷,顾海东,金羽,曲娟娟(669)
基于流态化作用的吸附反应动力学和穿透特征 …… 王君,王瑶,黄星,袁益龙,陈瑞晖,周航,周丹丹(678)
广州城市污泥中重金属形态特征及其生态风险评价 …… 郭鹏然, 雷永乾, 蔡大川, 张涛, 吴锐, 潘佳钏 (684)
中国农田土壤重金属富集状况及其空间分布研究 …… 张小敏,张秀英,钟太洋,江洪(692)
废旧电容器封存点土壤中的 PCBs 污染特征和健康风险评价 …… 周玲莉,吴广龙,薛南冬,杨兵,李发生,丁琼,周丹丹,燕云仲,刘博,韩宝禄(704)
深圳市表层土壤多环芳烃污染及空间分异研究 …… 章迪,曹善平,孙建林,曾辉(711)
洋河流域万全段重金属污染风险及控制对策 …… 谭冰,王铁宇,朱朝云,李奇锋,徐笠,吕永龙(719)
施用组配固化剂对盆栽土壤重金属交换态含量及在水稻中累积分布的影响 …… 曾卉,周航,邱琼瑶,廖柏寒(727)
螯合剂复配对实际重金属污染土壤洗脱效率影响及形态变化特征 …… 尹雪,陈家军,吕策(733)
Pseudomonas sp. QJX-1 的锰氧化特性研究 …… 周娜娜,柏耀辉,梁金松,罗金明,刘锐平,胡承志,袁林江(740)
$n(NO_3^-\text{-N})/n(NO_2^-\text{-N})$ 对混培养菌与纯培养菌同步脱氮除硫的影响 …… 陈子爱,陈会娟,魏本平,刘刚金,邓良伟,吴力斌(746)
杭州市空气微生物群落碳代谢特征研究 …… 龚婵娟,许晶,方治国,楼秀芹,欧阳志云(753)
鼠李糖脂逆胶束体系中纤维素酶的后萃研究 …… 赵艳鸽,袁兴中,黄华军,崔凯龙,彭馨,彭子原,曾光明 (759)
黄海常见鱼类体内汞含量的种内和种间差异研究 …… 朱艾嘉, 许战洲, 柳圭泽, 邓丽杰, 方宏达, 黄良民(764)
3 种 PAEs 对蚯蚓的毒性作用和组织酶活性影响的研究 …… 王艳,马泽民,吴石金(770)
新型保水剂应用于土壤-小白菜系统的环境安全评价 …… 李希,贺纪正,郑袁明,郑明兰(780)
黄河三角洲翅碱蓬湿地硫化氢和羰基硫排放动态研究 …… 李新华,郭洪海,杨丽萍,朱振林,孙晓青(786)
农田土壤 N_2O 产生的关键微生物过程及减排措施 …… 朱永官, 王晓辉, 杨小茹, 徐会娟, 贾炎(792)
《环境科学》征订启事(691) 《环境科学》征稿简则(800) 信息(489,519,591,791)

国Ⅴ柴油机燃用丁醇-柴油混合燃料颗粒粒径分布特性试验研究

楼狄明,徐宁,范文佳,张涛
(同济大学汽车学院,上海 201804)

摘要: 在一台不做任何改动的国Ⅴ共轨柴油机上,运用发动机排气颗粒数量和粒径分析仪 EEPS,结合实测空燃比,在外特性以及最大转矩转速和额定转速两个不同转速的负荷特性下,对比研究了柴油机燃用不同体积分数(10%、15%、20%、30%、40%)的丁醇-柴油混合燃料(Bu10、Bu15、Bu20、Bu30、Bu40)和国Ⅴ柴油(D100)对排气颗粒数量浓度、质量浓度及颗粒数量浓度粒径分布特性的影响. 结果表明,外特性下,随着转速的升高,丁醇-柴油混合燃料和纯柴油的颗粒数量浓度粒径分布都向单峰对数正态分布转变. 随丁醇掺混比例的增加,核模态颗粒和小粒径聚集态颗粒排放数量浓度在各工况下都有不同程度的降低; 大粒径聚集态颗粒数量排放在低速低负荷时会略有增加,而在高速高负荷时会略有降低或基本不变. 掺混丁醇后,各工况的颗粒总数量浓度和总质量浓度都会降低,在高速高负荷时最明显.

关键词:丁醇; 颗粒粒径分布; 空燃比; 颗粒数量浓度; 颗粒质量浓度
中图分类号: X513 **文献标识码**: A **文章编号**: 0250-3301(2014)02-0526-07

Particulate Distribution Characteristics of Chinese Phrase V Diesel Engine Based on Butanol-Diesel Blends

LOU Di-ming, XU Ning, FAN Wen-jia, ZHANG Tao
(School of Automotive Studies, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: With a common rail diesel engine without any modification and the engine exhaust particle number and particle size analyzer EEPS, this study used the air-fuel ratio to investigate the particulate number concentration, mass concentration and number distribution characteristics of a diesel engine fueled with butanol-diesel blends(Bu10, Bu15, Bu20, Bu30 and Bu40) and petroleum diesel. The results show: for all test fuels, the particle number distributions turn to be unimodal. With the increasing of butanol, numbers of nucleation mode particles and small accumulation mode particle decrease. At low speed and low load conditions, the number of large accumulation mode particle increases slightly, but under higher speed and load conditions, the number does not increase. When the fuels contain butanol, the total particle number concentration and mass concentration in all conditions decrease and that is more obvious at high speed load.

Key words:butanol; particle size distribution; air/fuel ratio; particle number concentration; particle mass concentration

柴油机排放中的细微碳烟粒子对人类健康的危害早已被证明[1,2],因此,柴油机微粒排放浓度与尺寸分布的研究越来越受到人们重视. 近年来世界各国也在抓紧制定实施严格的微粒控制排放法规,其中欧Ⅴ排放标准已经开始对颗粒数量加以限制. 从对人体的危害性来说,微粒尺寸相对微粒质量更重要,其中 1 μm 直径级以下的微粒,由于它可以通过人体的呼吸直达肺部并沉积下来,对人体健康极为不利[3,4]. 碳粒上还吸附有多种有机物质,具有不同程度的诱变和致癌作用[5]. 所以,需要考察柴油及其替代燃料的 1 μm 直径级以下的颗粒排放特性.

从粒径上讲,机动车尾气中的细微颗粒物主要以两种形态存在[1,6,7]:核模态和聚积态. 核模态颗粒物($5\ nm < D_p < 50\ nm$):主要包括在尾气稀释和冷却过程中,挥发性有机物和硫酸盐因冷凝成核作用形成的颗粒及燃烧形成的固态碳和金属混合物. 在质量分布中,可能只占颗粒物总质量的 1% ~ 20%,但是在粒数分布中,所占总数比例可能超过 90%. 聚积态颗粒物($50\ nm < D_p < 1\ 000\ nm$):主要包括在燃烧过程中形成的碳黑颗粒及其表面吸附的一些挥发性物质.

丁醇是一种从生物质制取的新型替用燃料,具有与柴油互溶性好、热值较高、分子含氧、润滑性较好且来源广等优点[8~12],丁醇部分替代柴油已经成为一个研究热点. 但国内外现有的研究主要集中在丁醇-柴油混合燃料的喷油雾化特性和对发动机

收稿日期: 2013-05-02; **修订日期**: 2013-06-21
基金项目: 上海市科委科技攻关项目(10dz1210400)
作者简介: 楼狄明(1963 ~), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为柴油机替代燃料与性能优化, E-mail: loudiming@tongji.edu.cn

的性能、燃烧特性及排放特性的影响方面[13~21]，且对碳烟颗粒分布特性的研究主要集中在石化汽油、柴油及传统代用燃料上[22~24]．而关于丁醇-柴油混合燃料碳烟颗粒分布特性的研究很少．对此，本试验结合空燃比对比研究了丁醇-柴油混合燃料与纯柴油在外特性和负荷特性下的细微颗粒排放特性．

1　材料与方法

1.1　试验燃料

试验燃油为国Ⅴ柴油和丁醇组成的混合燃料（Bu10、Bu15、Bu20、Bu30 和 Bu40）对应丁醇的体积分数分别为：10%、15%、20%、30% 和 40% 及纯国Ⅴ柴油（D100）．试验燃料理化特性测试结果如表 1 所示[7]（部分燃料特性是经过拟合插值求得）．

由表 1 可以看出，丁醇-柴油混合燃料与石化柴油相比，密度变化不大，氧含量较高，热值较高，黏度略小，十六烷值略低．

表 1　试验燃油的主要理化特性

Table 1　Physiochemical properties of fuels

燃油项目	D100	Bu10	Bu15	Bu20	Bu30	Bu40
密度(20℃)/kg·m^{-3}	821.9	820.0	819.2	818.4	816.8	815.7
黏度/mm^2·s^{-1}	4.535	3.886	3.869	3.852	3.818	3.734
十六烷值	52.3	47.8	45.2	42.6	37.3	33.0
低热值/MJ·kg^{-1}	43.88	42.62	42.07	41.52	40.42	39.09
碳含量/%	86.12	83.85	82.91	81.98	80.1	77.92
氢含量/%	13.84	14.08	13.85	13.62	13.16	13.71
氧含量/%	0.35	2.07	3.24	4.4	6.73	8.36

1.2　试验样机

试验发动机为某排放标准（TAS）满足国Ⅴ要求的四冲程、6 缸、直列增压中冷、电控高压共轨柴油发动机，排量为 8.82 L，压缩比为 17.3，额定功率为184 kW，额定转速为2 200 r·min^{-1}；最大转矩为1 000 N·m，所对应转速为1 400 r·min^{-1}．

1.3　试验台架及测试设备

运用 SCHENCK Dynas2400 重型发动机台架试验系统：AVLAPA4F4 电力测功机控制发动机转速-转矩；AVL735 动态油耗仪测量油耗；燃油温度由 AVL753 燃油温度控制器控制在 38℃；发动机冷却水的温度由 AVL553 水冷却装置控制在 80℃；机油温度由 AVL554 机油冷却装置控制在 90℃．

3090EEPS 发动机尾气颗粒物粒径分布测定仪检测范围是 5.6 ~ 560 nm．扫描迁移率粒度测定仪（SMPS）的测量时间从 30 s ~ 5 min 不等，EEPS 分光计则每 0.1 s 就能得到一个完整的颗粒物粒径分布．试验对颗粒排放采用了两级稀释，总稀释比为 250∶1．一级稀释系统采用旋转盘稀释器对排气进行稀释，稀释比为 100∶1，稀释所用的空气为加热后的含湿空气；二级稀释采用一个流量计对进气流量进行补偿，并同时对排气进行稀释，稀释比为 2.5∶1．最终进入 EEPS 的被测气体状态维持在标准状况附近．测试系统进排气系统布置如图 1 所示．

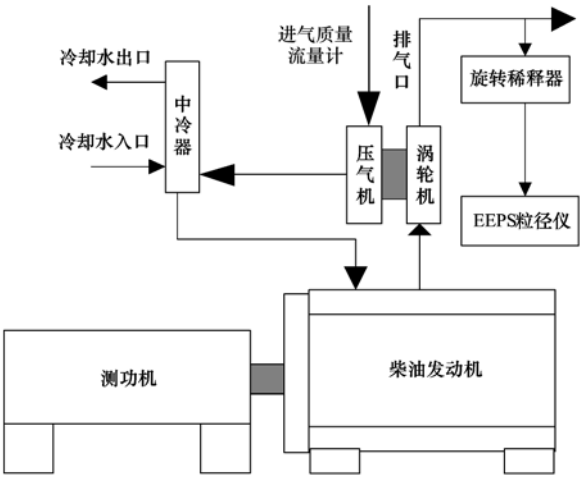

图 1　台架测试系统

Fig. 1　Test system of diesel engine

2　结果与分析

2.1　外特性下颗粒数量排放特性

2.1.1　粒径分布特性

图 2 所示为外特性下燃用不同配比丁醇-柴油混合燃料对颗粒粒径分布的影响．图 3 为外特性下实测空燃比随转速变化．从图 2 可以看出：外特性下，随转速升高，丁醇-柴油混合燃料的颗粒粒径分布特性跟纯柴油类似：各粒径对应数量浓度增加，其中小粒径核模态以及大粒径聚集态颗粒排放数量浓度增加幅度较小，而粒径在 30 ~ 80 nm 左右的颗粒排放数量浓度增加显著，这使得粒径分布由峰值特性不明显到单峰对数正态分布过渡．其中燃用 Bu40 时粒径为 52.3 nm 的颗粒排放从 800 r·min^{-1} 时的 7.1 × 10^7 cm^{-3} 上升到了2 200 r·min^{-1}时的 3.5

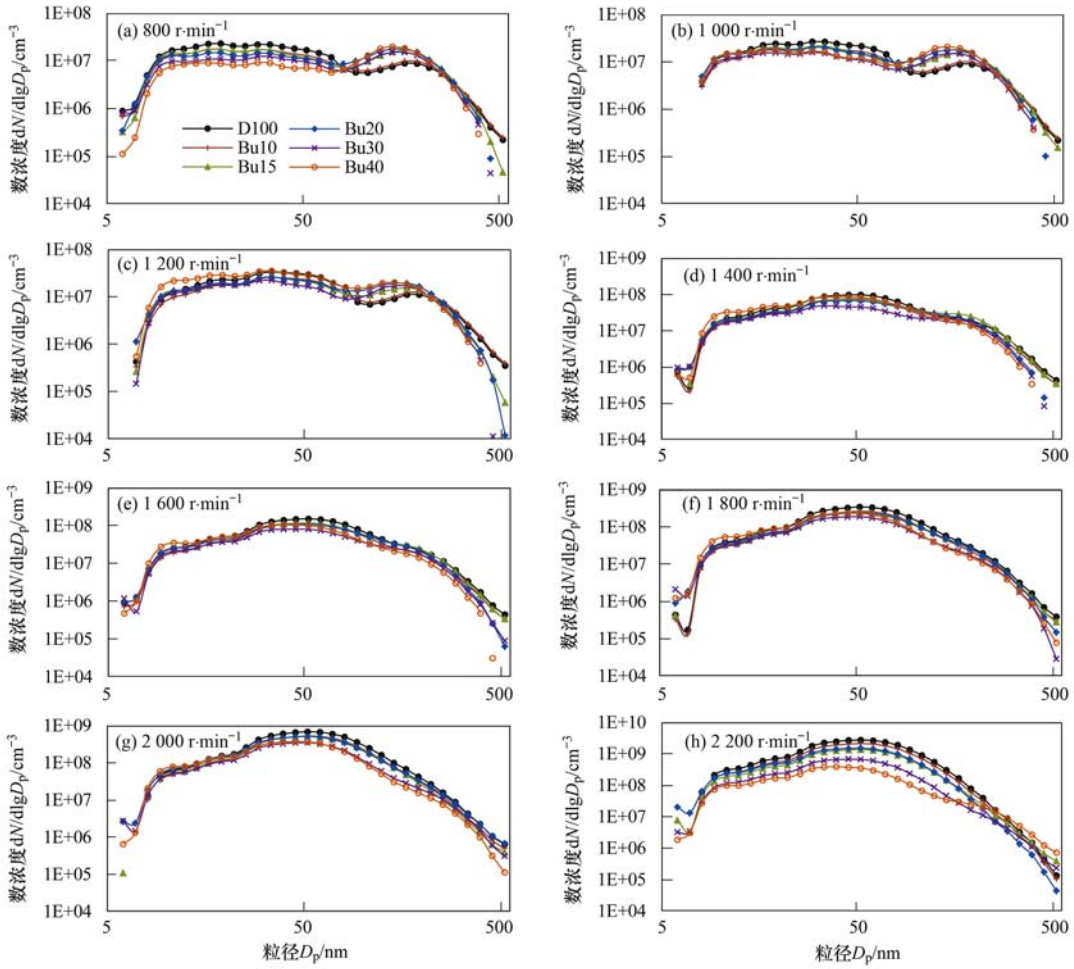

图 2 外特性下颗粒粒径分布

Fig. 2 Particulate distribution characteristics of WOT

$\times 10^9$ cm^{-3},增加了 50 多倍,这个范围内的颗粒可看作是聚集度不高或者 HC 吸附较少又或者被氧化变小后的碳粒以及核模态颗粒冷凝聚合形成的,是小粒径聚集态颗粒. 出现上述变化一方面是因为转速增加,循环作用时间变短,燃料不完全燃烧产生的一次碳粒的凝并作用减弱,进而形成的聚集态颗粒粒径较小; 另一方面合理的进气组织和喷油策略,导致空燃比随转速增加而变大,如图 3,氧浓度升高,再加上排气温度升高,氧化作用使颗粒的 $m(\mathrm{H})/m(\mathrm{C})$ 比降低,聚集态颗粒粒径减小[24].

掺混丁醇后核模态及小粒径聚集态颗粒排放降低,这是因为丁醇分子内存在含氧羟基,能够大大降低芳香烃(PAH)先导物不饱和碳氢碎片的生成,导致 PAH 等高分子有机物形成的二次核模态颗粒物减小[25]. 掺混丁醇对大粒径聚集态颗粒排放的影响,随转速增大表现不同:低速时,随丁醇掺混比例的升高,大粒径聚集态颗粒排放数量有所增加; 而在中高速时,排放基本不变或略有减少. 这是因为: 低速时,缸内温度较低,丁醇汽化潜热较高使缸内温度进一步降低,导致油滴雾化不均匀,局部缺氧现象加重,燃料不完全燃烧产生的一次碳粒增加,在低速时较长的作用时间下,凝并成较多的大粒径聚集态颗粒. 同时,丁醇黏度较小也会导致喷油锥角增大,引起油束重叠,造成局部燃料过浓,燃料混合恶化. 而中高速时,进气气流能量增加,缸内温度升高,丁醇汽化潜热高的影响减弱,油滴雾化改善,大粒径聚集态颗粒排放增加不大. 可见,丁醇分子内氧对于

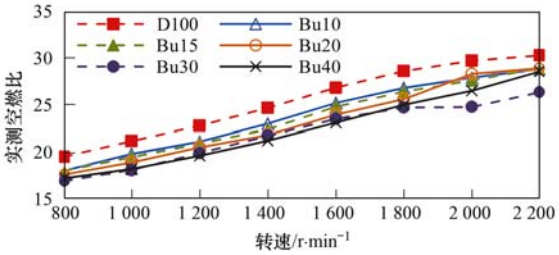

图 3 外特性下空燃比随转速的变化

Fig. 3 A/F of WOT

初始碳粒和小粒径聚集态的氧化效果更明显，对大粒径颗粒氧化效果不是很明显.

2.1.2　外特性下颗粒排放总数量浓度和总质量浓度

图 4、图 5 所示分别为外特性下燃用不同配比丁醇-柴油混合燃料对颗粒排放总数量浓度和总质量浓度的影响. 可见，外特性下丁醇-柴油混合燃料的颗粒排放总数量浓度和总质量浓度变化趋势跟纯柴油相似：都随转速升高先是缓慢增加，当转速大于 2 000 r·min^{-1}后，颗粒数量浓度和质量浓度急剧升高，其中 Bu40、Bu30、Bu20、Bu15、Bu10 和 D100 在2 200 r·min^{-1}时相对 800 r·min^{-1}时，颗粒数量浓度分别增加了 15.9、25.4、40.8、48.0、68.6 和 74.6 倍，颗粒质量浓度分别增加 2.7、2.8、5.9、6.0、10.5 和 11.5 倍. 这是因为随着转速升高，循环周期和油气混合时间变短，燃烧恶化. 2 000 r·min^{-1}后实测空燃比如图 3，不再随转速变大，而进气温度继续升高，形成更多高温缺氧区域，循环周期更短，燃烧更恶化，颗粒排放增加. 同时，颗粒总质量浓度增加幅度远小于总数量浓度增加幅度，是因为随转速增加，循环作用时间变短，聚并的碳粒减少.

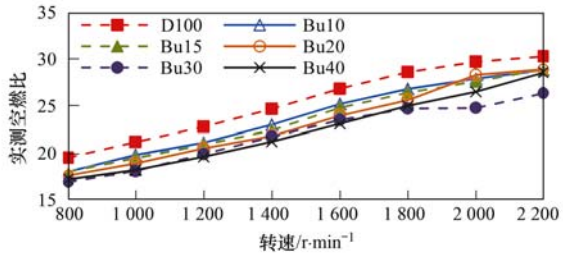

图 4　外特性下颗粒总数量浓度随转速变化

Fig. 4　Total particle number concentration of WOT

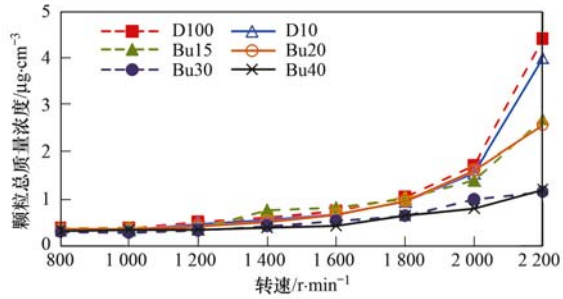

图 5　外特性下颗粒总质量浓度随转速变化

Fig. 5　Total particle mass concentration of WOT

掺混丁醇后会降低颗粒排放且随转速增大越来越明显：在转速为 800 r·min^{-1}时，Bu10、Bu15、Bu20、Bu30 和 Bu40 的颗粒总数量浓度相对 D100 分别下降 16.4%、7.9%、11.9%、28.6% 和 32.9%，总质量浓度分别下降 9.0%、5.3%、5.5%、20.0% 和 15.1%. 而在转速为2 200 r·min^{-1}时，Bu10、Bu15、Bu20、Bu30 和 Bu40 的颗粒总数量浓度相对 D100 分别下降 15.1%、38.8%、41.6%、73.7% 和 72.6%，总质量浓度分别下降了 25.0%、73.7%、72.6%、100.0% 和 100.1%，效果更明显. 这主要随着转速的升高，进气温度升高，进气能量增大，削弱了气化潜热大不利于油滴雾化以及缸内温度低缩小着火极限的不利，让丁醇分子内含氧的优势得以体现，对高分子有机物及小粒径碳烟颗粒的抑制及氧化效果明显，因此颗粒数量随丁醇掺混比例增加降低明显.

2.2　负荷特性颗粒排放特性

2.2.1　粒径分布特性

图 6、图 7 所示分别为最大转矩转速1 400 r·min^{-1}下和额定转速2 200 r·min^{-1}下燃用不同配比丁醇-柴油混合燃料对颗粒粒径分布的影响. 图 8 为负荷特性下实测空燃比随负荷的变化. 从图 6 中可以看出：在1 400 r·min^{-1}时，10% 负荷时核模态所占比例较高，从 10% 负荷到 25% 负荷，核模态比例降低明显，而后随负荷增加变化很小. 因为 10% 负荷时，空燃比较大，燃料被稀释，且缸内温度较低，使燃烧结束后残余 HC 增多，这有利于核模态颗粒生成；随着负荷的增加，缸内温度升高，这一现象将得到很大改善. 而随着负荷增加，小粒径聚集态颗粒逐渐增加，聚集态颗粒平均当量动力学直径变小，其中燃用 Bu40 时，10% 负荷下聚集态颗粒平均当量动力学直径为 155.2 nm，而 100% 负荷时减小到 119.6 nm；小粒径聚集态颗粒排放的显著增加使得粒径分布也是向单峰对数正态分布转变. 这是因为随着负荷的增大，循环喷油量增加，空燃比下降，如图 8(a)，加之缸内温度升高，导致高温缺氧区域增多，一次碳粒形成较多，在相同时间内聚并形成的聚集态颗粒就会增加. 而缸内温度的升高，又会使碳粒氧化作用加强，粒径减小.

由图 7 可以看出，额定转速2 200 r·min^{-1}时颗粒粒径分布也在向单峰对数正态分布转变：随负荷增加，大粒径聚集态颗粒所占比例逐渐减小，小粒径聚集态颗粒所占比例增加，聚集态颗粒平均当量动力学直径变小，以 D100 为例，10% 负荷时为 161.7 nm，到 100% 负荷时就减小为 116.7 nm.

随丁醇掺混比例的增加，在最大转矩转速1 400 r·min^{-1}和额定转速2 200 r·min^{-1}时都呈现相同的规律：核模态和小粒径聚集态颗粒排放有所降低，且

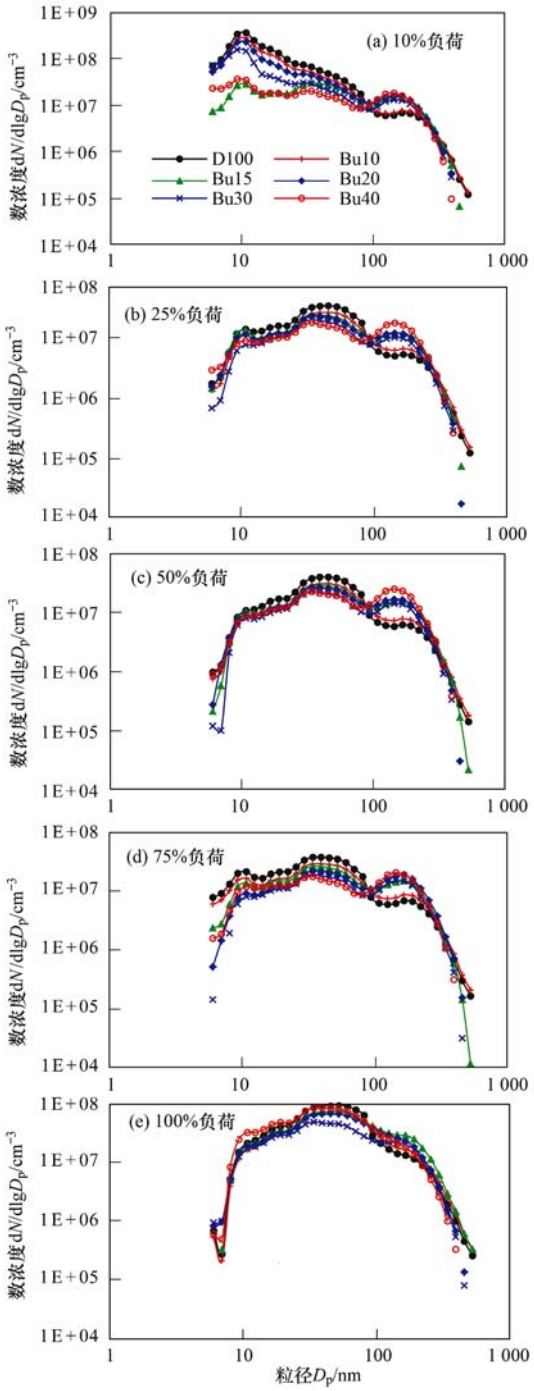

图 6 最大转矩转速 1 400 r·min^{-1}颗粒粒径分布特性

Fig. 6 Particulate distribution characteristics of maximum torque speed

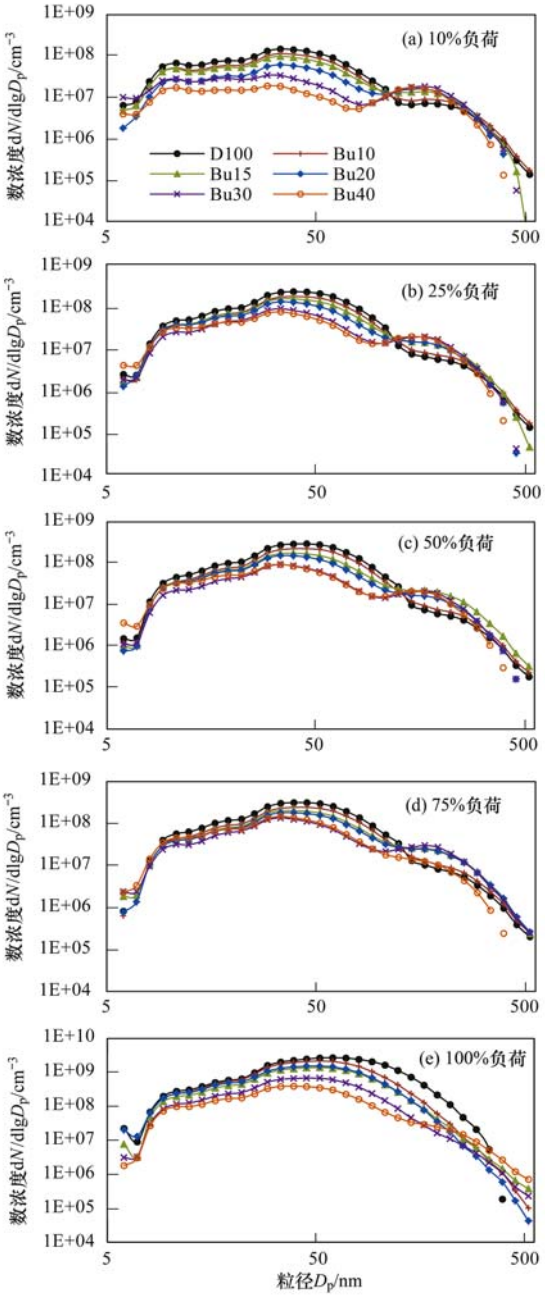

图 7 额定转速 2 200 r·min^{-1}颗粒粒径分布特性

Fig. 7 Particulate distribution characteristics of rated speed

在高速高负荷时最明显,而大粒径凝聚态颗粒只有在低负荷时略有上升. 这主要是因为丁醇分子内含羟基也会抑制 HC 的增长,且随负荷增加,温度升高,效果更加明显,使 HC 浓度下降,PAH 等高分子有机物生成量减少,核模态颗粒排放降低,小粒径聚集态颗粒排放数量也会因氧化降低. 而凝聚态颗粒排放的上升则主要是由于掺混丁醇后导致发动机进气减少,空燃比下降(如图 8),缸内温度下将,油滴雾化不理想导致的.

2.2.2 负荷特性颗粒排放总数量浓度和总质量浓度

图 9、图 10 所示分别为最大转矩转速和额定转速负荷特性下燃用不同配比丁醇-柴油混合燃料对颗粒排放总数量浓度和总质量浓度的影响. 由图 9 和图 10 可知,在1 400 r·min^{-1}负荷特性下, 10% 负荷时,颗粒总数量浓度较高,以 D100 为例, 10% 负荷相对 25% 和 50% 负荷时分别高出了 2.3 倍和 4.3 倍; 而后随负荷增加,颗粒总数量浓度略有升高;

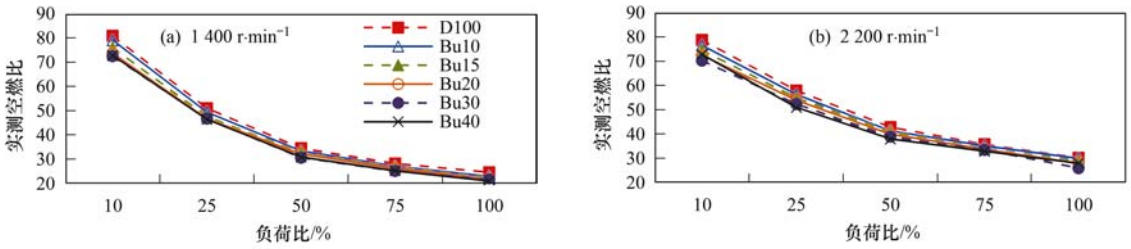

图 8　负荷特性下实测空燃比随负荷变化

Fig. 8　A/F of load

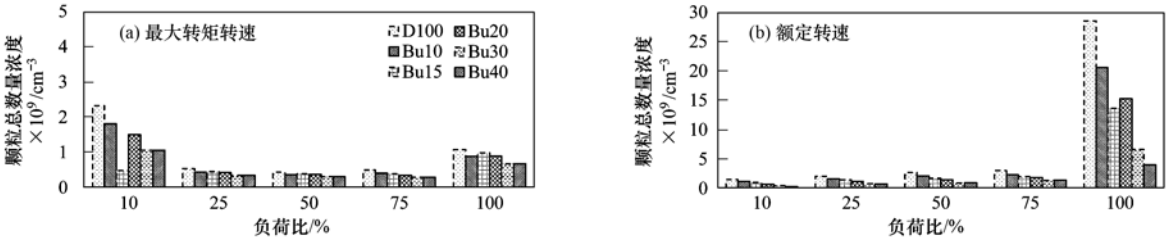

图 9　负荷特性下颗粒总数量浓度随负荷变化

Fig. 9　Total particle number concentration of load

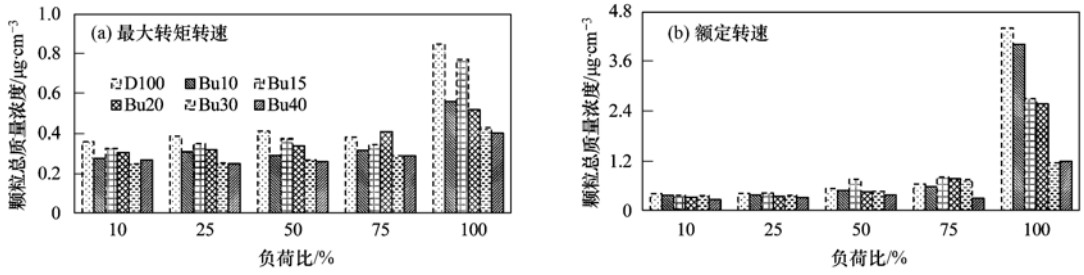

图 10　负荷特性下颗粒总质量浓度随负荷变化

Fig. 10　Total particle mass concentration of load

在 100% 负荷时，颗粒数量浓度又会较大幅度升高，其中 D100 在 100% 负荷相对 75% 负荷增加了 1.16 倍；但颗粒总质量浓度，只有在 100% 负荷时大幅增加，可见低速低负荷时颗粒总数浓度升高是由温度较低导致着火极限变窄，核模态颗粒排放增多引起的. 而在2 200 r·min^{-1}负荷特性下，颗粒总数量浓度和总质量浓度随着负荷的升高都增大. 高负荷时颗粒总数量浓度增加则是因为高负荷时高温缺氧造成聚集态颗粒排放增加，高速时更明显是因为高速时循环周期更短，燃烧恶化.

而随着丁醇掺混比例的增加，各个工况下颗粒排放总数量浓度和总质量浓度都有所降低，高速高负荷时降低最明显. 其中3 000 r·min^{-1}的 100% 负荷时 Bu40、Bu30、Bu20、Bu15、Bu10 相对 D100 颗粒排放总数量浓度分别降低 80.5%、67.6%、25.8%、33.7% 和 10.0%，总质量浓度分别降低了 72.6%、73.7%、41.6%、38.8% 和 10.5%. 这是因为高速高负荷时的进气气流能量以及缸内温度的增加使其分子内含氧的优势得以更好体现，促进了颗粒和 HC 的氧化.

3　结论

(1)外特性下，随着转速的升高，颗粒粒径分布都向单峰对数正态分布的转变，这主要是因为小粒径聚集态颗粒物比例增加明显.

(2)外特性下，掺混丁醇后，核模态颗粒和小粒径聚集态颗粒都会减小. 低速时，大粒径聚集态颗粒排放会随丁醇掺混比例的增加而增加，中高速时，大粒径聚集态颗粒数目基本不变.

(3)负荷特性下，低速低负荷时，核模态颗粒所占比例较大，随负荷增加，核模态颗粒比例下降，小粒径聚集态颗粒比例增加. 随丁醇掺混比例的增

加,核模态和小粒径聚集态颗粒排放有降低的趋势.

(4)掺混丁醇后,各工况的颗粒排放总数量浓度和总质量浓度都会降低,在高速高负荷时最明显.

参考文献:

[1] Kittelson D B. Engines and nanoparticles: a review [J]. Journal of Aerosol Science, 1998, **29**(5-6): 575-588.

[2] Johnson T V. Diesel emission control in review [J]. SAE Technical Paper, 2006-01-0030, 2006.

[3] Scholl K W, Sorenson S C. Combustion of soybean oil methyl ester in a direct injection diesel engine[J]. SAE Paper 930934. Warrendale, PA: SAE Inc. 1993.

[4] 李腾腾, 秦孔建, 方茂东, 等. 混合动力客车颗粒物排放特性的研究[J]. 汽车工程, 2011, **33**(4): 309-313.

[5] 曲凌夫. 汽车与环境污染[J]. 生态经济, 2010, (7): 146-149.

[6] Brown J E, Clayton M J, Harris D B, *et al*. Comparison of the particle size distribution of heavy-duty diesel exhaust using a dilution tailpipe sampler and an in-plume sampler during on-road operation [J]. Journal of the Air & Waste Management Association, 2000, **50**(8): 1407-1416.

[7] 范文佳. 柴油机燃用丁醇-柴油混合燃料的数值模拟与试验研究[D]. 上海: 同济大学, 2013.

[8] 黄格省, 李振宇, 张兰波, 等. 生物丁醇的性能优势及技术进展[J]. 石油技术与应用, 2012, **30**(3): 254-259.

[9] Jin C, Yao M F, Liu H F, *et al*. Progress in the production and application of *n*-butanol as a biofuel [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2011, **15**(8): 4080-4106.

[10] Mate Z, Andras H, Artur T. Butanol as a diesel extender option for internal combustion engines [J]. SAE Technical Paper. 2010-01-0481.

[11] Karabektas M, Hosoz M. Performance and emission characteristics of a diesel engine using isobutanol-diesel fuel blends [J]. Renewable Energy, 2009, **34**(6): 1554-1559.

[12] 曾现军, 邓建, 孔华, 等. 丁醇作为车用替代燃料的研究进展[J]. 小型内燃机与摩托车, 2012, **40**(1): 76-80.

[13] Al-Hasan M I, Al-Momany M. The effect of iso-butanol-diesel blends on engine performance[J]. Transport, 2008, **23**(4): 306-310.

[14] Rakopoulos D C, Rakopoulos C D, Giakoumis E G, *et al*. Effects of butanol-diesel fuel blends on the performance and emissions of a high-speed DI diesel engine [J]. Energy Conversion and Management, 2010, **51**(10): 1989-1997.

[15] Rakopoulos D C, Rakopoulos C D, Hountalas D T, *et al*. Investigation of the performance and emissions of bus engine operating on butanol/diesel fuel blends [J]. Fuel, 2010, **89**(10): 2781-2790.

[16] 张全长, 尧命发, 郑尊清, 等. 正丁醇对柴油机低温燃烧和排放的影响[J]. 燃烧科学与技术, 2010, **16**(4): 363-368.

[17] 韩志玉, 周庭波, 陈征, 等. 基于废气再循环的丁醇/柴油混合燃料的燃烧特性[J]. 燃烧科学与技术, 2013, **19**(1): 37-42.

[18] 韩志玉,邱赞卿,陈征,等. 丁醇比例对柴油-丁醇复合喷油燃烧的影响[J]. 燃烧科学与技术,2013, **19**(3): 200-205.

[19] 杜标. 乘用车柴油机燃用丁醇柴油混合燃料的试验研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2011.

[20] Dogan O. The influence of *n*-butanol/diesel fuel blends utilization on a small diesel engine performance and emissions [J]. Fuel, 2011, **90**(7): 2467-2472.

[21] Yao M F, Wang H, Zheng Z Q, *et al*. Experimental study of *n*-butanol additive and multi-injection on HD diesel engine performance and emissions [J]. Fuel, 2010, **89**(9): 2191-2201.

[22] 潘锁柱, 裴毅强, 宋崇林, 等. 汽油机颗粒物数量浓度排放及粒径的分布特性[J]. 燃烧科学与技术, 2012, **18**(2): 181-185.

[23] 谭丕强, 胡志远, 楼狄明. 车用发动机燃用生物柴油的颗粒数量排放[J]. 汽车安全与节能学报, 2010, **1**(1): 83-88.

[24] 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.

[25] 蒋德明, 黄佐华. 内燃机替代燃料燃烧学[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2007. 247-250.

HUANJING KEXUE

Environmental Science (monthly)

Vol. 35 No. 2

Feb. 15, 2014

CONTENTS

Form of the Particulate Matter Ambient Air Standards in China ····· WANG Shuai, DING Jun-nan, WANG Rui-bin, *et al.* (401)

Seasonal Variation of Carcinogenic Heavy Metals in $PM_{2.5}$ and Source Analysis in Beijing ····· TAO Jun, ZHANG Ren-jian, DUAN Jing-chun, *et al.* (411)

Temporal and Spatial Distribution of $PM_{2.5}$ and PM_{10} Pollution Status and the Correlation of Particulate Matters and Meteorological Factors During Winter and Spring in Beijing ····· ZHAO Chen-xi, WANG Yun-qi, WANG Yu-jie, *et al.* (418)

Inversion and Spatial-Temporal Distribution Analysis on $PM_{5.0}$ Inhalable Particulate in Beijing ····· WANG Yan-hui, XIAO Yao (428)

Characterization of Ultrafine Particle Size Distribution in the Urban Atmosphere of Hangzhou in Spring ····· XIE Xiao-fang, SUN Zai, YANG Wen-jun (436)

Size Distributions of Aerosol During the Spring Festival in Nanjing ····· WANG Hong-lei, ZHU Bin, SHEN Li-juan, *et al.* (442)

Size Distributions of Organic Carbon and Elemental Carbon in Nanjing Aerosol Particles ····· WU Meng-long, GUO Zhao-bing, LIU Feng-ling, *et al.* (451)

Characterization of Organic and Elemental Carbon in PM_{10} in Xinzhou City ····· SHI Mei-xian, PENG Lin, LIU Xiao-feng, *et al.* (458)

Seasonal Variation of Concentrations and Distribution Characteristics of PCDD/Fs in Atmosphere of an Industrial Area, Guangzhou ····· QING Xian, SU Yuan, SU Qing, *et al.* (464)

Hazard Evaluation Modeling of Particulate Matters Emitted by Coal-Fired Boilers and Case Analysis ····· SHI Yan-ting, DU Qian, GAO Jian-min, *et al.* (470)

Chemical Characteristics of Precipitation in South China Sea ····· XIAO Hong-wei, LONG Ai-min, XIE Lu-hua, *et al.* (475)

Analysis of Acid Rain Characteristics of Lin'an Regional Background Station Using Long-term Observation Data ····· LI Zheng-quan, MA Hao, MAO Yu-ding, *et al.* (481)

Characteristics of Atmospheric Nitrogen Wet Deposition in Beijing Urban Area ····· HE Cheng-wu, REN Yu-fen, WANG Xiao-ke, *et al.* (490)

Studies of Ozone Formation Potentials for Benzene and Ethylbenzene Using a Smog Chamber and Model Simulation ····· JIA Long, XU Yong-fu (495)

Characteristics of Fly Ash Particles Deposition in the Snowpack of Laohugou Glacier No. 12 in Western Qilian Mountains, China ····· DONG Zhi-wen, QIN Da-he, QIN Xiang, *et al.* (504)

Odor Emission Rate of Municipal Solid Waste from Landfill Working Area ····· QIANG Ning, WANG Hong-yu, ZHAO Ai-hua, *et al.* (513)

Gaseous Phenol Removal in a Bio-Trickling Filter ····· HE Jue-cong, HUANG Qian-ru, CHEN Zhou-yang, *et al.* (520)

Particulate Distribution Characteristics of Chinese Phrase V Diesel Engine Based on Butanol-Diesel Blends ····· LOU Di-ming, XU Ning, FAN Wen-jia, *et al.* (526)

Effects of Turning Frequency on Emission of Greenhouse Gas and Ammonia During Swine Manure Windrow Composting ····· ZHAO Chen-yang, LI Hong-mei, WEI Yuan-song, *et al.* (533)

Oxidation of Mercury by $CuBr_2$ Decomposition Under Controlled-Release Membrane Catalysis Condition ····· HU Lin-gang, QU Zan, YAN Nai-qiang, *et al.* (541)

Distributions and Influencing Factors of Total Dissolved Inorganic Antimony in the Coastal Area of Zhejiang and Fujian ····· ZHANG Xu-zhou, REN Jing-ling, LIU Zong-guang, *et al.* (547)

Calculation of Allowable Pollution Loads for Lake and Reservoir Based on Bi-direction Algorithm and Its Case Study ····· JIA Hai-feng, GUO Yu (555)

Risk Assessment of Quaternary Groundwater Contamination in Beijing Plain ····· GUO Gao-xuan, LI Yu, XU Liang, *et al.* (562)

Mixing Behavior of Nutrients in Different Seasons at Liaohe Estuary ····· ZHANG Jin-hua, YU Li-xia, YAO Qing-zhen, *et al.* (569)

Distribution of Nitrogen in the Sediment of Taige South River Estuary ····· MA Jiu-yuan, WANG Guo-xiang, LI Zhen-guo, *et al.* (577)

Selection and Purification Potential Evaluation of Woody Plant in Vertical Flow Constructed Wetlands in the Subtropical Area ····· CHEN Yong-hua, WU Xiao-fu, HAO Jun, *et al.* (585)

Correlation of Substrate Structure and Hydraulic Characteristics in Subsurface Flow Constructed Wetlands ····· BAI Shao-yuan, SONG Zhi-xin, DING Yan-li, *et al.* (592)

Impacts of *Eichhornia crassipes* (Mart.) Solms Stress on the Growth Characteristics, Microcystins and Nutrients Release of *Microcystis aeruginosa* ····· ZHOU Qing, HAN Shi-qun, YAN Shao-hua, *et al.* (597)

Effects of Different Pre-oxidants on DBPs Formation Potential by Chlorination and Chloramination of Yangtze River Raw Water ····· TIAN Fu-xiang, XU Bin, RONG Rong, *et al.* (605)

Adsorption of Phenanthrene from Aqueous Solution on Cetylpyridinium Bromide (CPB)-Modified Zeolite ····· LI Jia, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, *et al.* (611)

Characteristics and Selectivity of Photocatalytic-Degradation of Tetracycline Hydrochloride ····· SONG Chen-yi, YIN Da-qiang (619)

Characterization of Biocatalysed Sulfate Reduction in a Cathode of Microbial Electrolysis System ····· FU Shi-yu, LIU Guang-li, LUO Hai-ping, *et al.* (626)

Characteristics of Dissolved Organic Matter in A/DAT-IAT System for Municipal Wastewater Treatment Based on Ecological Safety ····· YANG Sai, ZHOU Qi-xing, HUA Tao (633)

Membrane Surface Fouling Properties in MBRs for High-Salinity Wastewater Treatment ····· LI Bin, WANG Zhi-wei, AN Ying, *et al.* (643)

Treatment of Petrochemical Secondary Effluent by Ozone-biological Aerated Filter ····· LIU Ming-guo, WU Chang-yong, ZHOU Yue-xi, *et al.* (651)

Treatment of Pectin Wastewater by Anaerobic Biological Process ····· CHEN Bing-bing, YANG Chun-ping, LI Xiang, Det *al.* (657)

Sorption Mechanism of Ofloxacin by Carbon Nanotubes ····· ZHAO Xing-xing, YU Shui-li, WANG Zhe (663)

Biosorption Characteristics of Cu^{2+} by Spent Substrate of Pleurotus Oyster ····· HU Xiao-jing, ZANG Ting-ting, GU Hai-dong, *et al.* (669)

Adsorption Dynamics and Breakthrough Characteristics Based on the Fluidization Condition ····· WANG Jun, WANG Yao, HUANG Xing, *et al.* (678)

Characteristics of Speciation and Evaluation of Ecological Risk of Heavy Metals in Sewage Sludge of Guangzhou ····· GUO Peng-ran, LEI Yong-qian, CAI Da-chuan, *et al.* (684)

Spatial Distribution and Accumulation of Heavy Metal in Arable Land Soil of China ····· ZHANG Xiao-min, ZHANG Xiu-ying, ZHONG Tai-yang, *et al.* (692)

Pollution Patterns and Health Risk Assessment for Polychlorinated Biphenyls in Soils from a Capacitor Storage Site ····· ZHOU Ling-li, WU Guang-long, XUE Nan-dong, *et al.* (704)

Occurrence and Spatial Differentiation of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Surface Soils from Shenzhen, China ····· ZHANG Di, CAO Shan-ping, SUN Jian-lin, *et al.* (711)

Risk Assessment and Countermeasures of Heavy Metals Pollution in Wanquan Segment of Yanghe River ····· TAN Bing, WANG Tie-yu, ZHU Zhao-yun, *et al.* (719)

Effects of Group Matching Curing Agent on Exchangeable Pb, Cd, Zn Contents in the Potted Soils and their Accumulation in Rice Plants ····· ZENG Hui, ZHOU Hang, QIU Qiong-yao, *et al.* (727)

Impact of Compounded Chelants on Removal of Heavy Metals and Characteristics of Morphologic Change in Soil from Heavy Metals Contaminated Sites ····· YIN Xue, CHEN Jia-jun, LÜ Ce (733)

Characterization of Manganese Oxidation by *Pseudomonas* sp. QJX-1 ····· ZHOU Na-na, BAI Yao-hui, LIANG Jin-song, *et al.* (740)

Effects of the Ratio of NO_3^--N to NO_2^--N on the Removal of Sulfide and Nitrogen by Mixed Culture and Pure Culture ····· CHEN Zi-ai, CHEN Hui-juan, WEI Ben-ping, *et al.* (746)

Carbon Metabolic Characteristics of Airborne Microbes in Hangzhou ····· GONG Chan-juan, XU Jing, FANG Zhi-guo, *et al.* (753)

Study on the Backward Extraction of Cellulase in Rhamnolipid Reverse Micelles ····· ZHAO Yan-ge, YUAN Xing-zhong, HUANG Hua-jun, *et al.* (759)

Inner- and Inter-Species Differences of Mercury Concentration in Common Fishes from the Yellow Sea ····· ZHU Ai-jia, XU Zhan-zhou, LIU Gui-ze, *et al.* (764)

Study on the Effect of Enzymatic Activity and Acute Toxicity of Three PAEs on *Eisenia foetida* ····· WANG Yan, MA Ze-min, WU Shi-jin (770)

Environmental Safety Assessment on the New Super Absorbent Polymers Applied into a Soil-Chinese Cabbage System ····· LI Xi, HE Ji-zheng, ZHENG Yuan-ming, *et al.* (780)

Study on Dynamics of Hydrogen Sulfide and Carbonyl Sulfide Emission Fluxes from *Suaeda salsa* Marsh in the Yellow River Estuary ····· LI Xin-hua, GUO Hong-hai, YANG Li-ping, *et al.* (786)

Key Microbial Processes in Nitrous Oxide Emissions of Agricultural Soil and Mitigation Strategies ····· ZHU Yong-guan, WANG Xiao-hui, YANG Xiao-ru, *et al.* (792)

《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 2 月 15 日　35 卷　第 2 期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

（Monthly　Started in 1976）

Vol. 35　No. 2　Feb. 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