

# 环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第3期

Vol.37 No.3

**2016**

中国科学院生态环境研究中心 主办  
科学出版社 出版



目次

一种气溶胶测量仪器标定系统的设计及性能评估 ..... 陈小彤, 蒋靖坤, 邓建国, 段雷, 郝吉明 (789)

空气细菌真菌污染的分级评价构建方法 ..... 张华玲, 姚大军, 张雨, 方子梁 (795)

2014年北京APEC期间大气醛酮污染物的污染特征与来源分析 ..... 何晓朗, 谭吉华, 郭送军, 马永亮, 贺克斌 (801)

北京市夏季不同O<sub>3</sub>和PM<sub>2.5</sub>污染状况研究 ..... 王占山, 张大伟, 李云婷, 董欣, 孙瑞雯, 孙乃迪 (807)

2013年1月南京北郊霾天气气溶胶的光学特性 ..... 王利朋, 马嫣, 郑军, 崔芬萍, 周瑶瑶 (816)

上海典型持续性PM<sub>2.5</sub>重度污染的数值模拟 ..... 常炉予, 许建明, 周广强, 吴剑斌, 谢英, 余钟奇, 杨辰 (825)

厦门室内多溴二苯醚的沉降通量、季节变化与人体暴露水平 ..... 韩文亮, 刘豫, 陈海明, 陈兴童, 范涛 (834)

复合催化膜生物反应器处理一氧化氮废气研究 ..... 黎宝仁, 陈洲洋, 王剑斌, 张再利, 樊青娟, 魏在山 (847)

环胶州湾污水处理厂排放口溶解有机氮生物可利用潜力研究 ..... 孔秀君, 张鹏, 杨南南, 梁生康 (854)

面向GOCI数据的太湖总磷浓度反演及其日内变化研究 ..... 杜成功, 李云梅, 王桥, 朱利, 吕恒 (862)

三峡库区支流澎溪河水华高发期环境因子和浮游藻类的时空特征及其关系 ..... 周川, 蔚建军, 付莉, 崔玉洁, 刘德富, 姜伟, Douglas Haffner, 张磊 (873)

三峡库区消落带水体DOM不同分子量组分三维荧光特征 ..... 陈雪霜, 江韬, 卢松, 魏世强, 王定勇, 闫金龙 (884)

黄河河南段水体中正构烷烃的分布特征与来源解析 ..... 冯精兰, 席楠楠, 张飞, 刘书卉, 孙剑辉 (893)

岩溶地下河流域表层土壤有机氯农药分布特征及来源分析 ..... 谢正兰, 孙玉川, 张媚, 余琴, 徐昕 (900)

长期不同耕作方式下紫色水稻土和上覆水中汞及甲基汞的分布特征 ..... 王欣悦, 唐振亚, 张成, 王永敏, 王定勇 (910)

长江口沉积物重金属赋存形态及风险特征 ..... 尹肃, 冯成洪, 李扬颀, 殷立峰, 沈珍瑶 (917)

涌湖表层沉积物营养盐和重金属分布及污染评价 ..... 熊春晖, 张瑞雷, 吴晓东, 冯立辉, 王丽卿 (925)

三峡库区典型支流库湾消落带沉积泥沙特征及重金属评价 ..... 王永艳, 文安邦, 史忠林, 严冬春, 朱波, 唐家良 (935)

海河干流水产品汞污染特征及摄入风险评估 ..... 童银栋, 张巍, 邓春燕, 王学军 (942)

三峡库区干支流落干期消落带土壤可转化态氮含量及分布特征 ..... 何立平, 刘丹, 于志国, 周斌, 杨振宇, 兰国新, 郭冬琴, 林俊杰 (950)

三峡水库消落带土壤与优势植物淹水后对土-水系统汞形态的影响 ..... 梁丽, 王永敏, 张成, 余亚伟, 安思危, 王定勇 (955)

不同灌溉模式下水稻田径流污染试验研究 ..... 周静雯, 苏保林, 黄宁波, 管毓堂, 赵堃 (963)

富营养化城市景观水体表观污染下的悬浮颗粒物粒度分布特征 ..... 贡丹燕, 潘杨, 黄勇, 包伟, 李倩倩 (970)

间歇曝气对垂直潜流人工湿地脱氮效果的影响 ..... 汪健, 李怀正, 甄葆崇, 刘振东 (980)

非水溶性醌加速菌GWF生物还原高氯酸盐的研究 ..... 张媛媛, 郭延凯, 张超, 梁晓红, 田秀蕾, 牛文钰, 廉静, 郭建博 (988)

紫外辐射对腐殖酸溶液理化性质及其混凝性能的影响 ..... 王文东, 张轲, 范庆海, 郑丹 (994)

类水滑石复合材料吸附去除水中硫酸根离子 ..... 顾怡冰, 马邕文, 王金泉, 王艳, 关泽宇 (1000)

富里酸对重金属在沉积物上吸附及形态分布的影响 ..... 李雨清, 何江, 吕昌伟, 樊明德, 王维, 张瑞卿, 谢志磊, 汪精华, 于波, 恩和, 丁涛 (1008)

铁有机骨架材料的快速合成及对阴离子染料的吸附性能 ..... 孙德帅, 刘亚丽, 张晓东, 秦婷婷 (1016)

富里酸-膨润土复合体对氟的吸附特性 ..... 方敦, 田华婧, 叶欣, 何次利, 但悠梦, 魏世勇 (1023)

3种低分子量有机酸对紫色土吸附菲的影响 ..... 谢黎, 陈本寿, 张进忠, 卢松, 江韬 (1032)

HDTMA改性蒙脱土对土壤Cr(VI)的吸附稳定化研究 ..... 蒋婷婷, 喻恺, 罗启仕, 吉敏, 林匡飞 (1039)

水热处理时间对污泥中氮磷钾及重金属迁移的影响 ..... 王兴栋, 林景江, 李智伟, 赵焕平, 余广炜, 汪印 (1048)

煤制气废水总酚负荷对反硝化的抑制效应研究 ..... 张玉莹, 陈秀荣, 王璐, 李佳慧, 徐燕, 庄有军, 于泽亚 (1055)

硫自养反硝化耦合厌氧氨氧化脱氮条件控制研究 ..... 周健, 黄勇, 刘忻, 袁怡, 李祥, 完颜德卿, 丁亮, 邵经纬, 赵蓉 (1061)

低温下活性污泥膨胀的微生物群落结构研究 ..... 端正花, 潘留明, 陈晓欧, 王秀朵, 赵乐军, 田乐琪 (1070)

游离氨(FA)耦合曝气时间对硝化菌活性的抑制影响 ..... 孙洪伟, 吕心涛, 魏雪芬, 赵华南, 马娟, 方晓航 (1075)

1株 *Arthrobacter arilaitensis* 菌的耐冷异养硝化和好氧反硝化作用 ..... 何腾霞, 倪九派, 李振轮, 孙权, 冶青, 徐义 (1082)

海洋菌株  $\gamma$ 3 的分离鉴定及其异养硝化-好氧反硝化特性 ..... 孙庆花, 于德爽, 张培玉, 林学政, 徐光耀, 李津 (1089)

几种不同方法估算农田表层土壤固碳潜力: 以甘肃庄浪县为例 ..... 师晨迪, 许明祥, 邱宇洁 (1098)

不同耕作方式下土壤水分状况对土壤呼吸的初期影响 ..... 张延, 梁爱珍, 张晓平, 陈升龙, 孙冰洁, 刘四义 (1106)

绿肥间作和秸秆覆盖对冬季油菜根际土壤有机碳及土壤呼吸的影响 ..... 周泉, 王龙昌, 熊瑛, 张赛, 杜娟, 赵琳璐 (1114)

黑岱沟露天煤矿排土场不同植被复垦土壤酶活性及理化性质研究 ..... 方瑛, 马任甜, 安韶山, 赵俊峰, 肖礼 (1121)

黄土丘陵区退耕时间序列梯度上草本植被群落与土壤C、N、P、K化学计量学特征 ..... 张海东, 汝海丽, 焦峰, 薛超玉, 郭美丽 (1128)

包头某铝厂周边土壤重金属的空间分布及来源解析 ..... 张连科, 李海鹏, 黄学敏, 李玉梅, 焦坤灵, 孙鹏, 王维大 (1139)

砷污染土壤复合淋洗修复技术研究 ..... 陈寻峰, 李小明, 陈灿, 杨麒, 邓琳静, 谢伟强, 钟宇, 黄斌, 杨伟强, 张志贝 (1147)

以预处理剩余污泥为燃料MFC产电性能及不连续供电的可行性 ..... 赵艳辉, 赵阳国, 郭亮 (1156)

废弃物焚烧飞灰中持久性自由基与二噁英及金属的关联探究 ..... 王天娇, 陈彤, 詹明秀, 郭颖, 李晓东 (1163)

淘汰落后产能政策对我国重点工业行业二噁英类减排的影响 ..... 耿静, 吕永龙, 任丙南, 王铁宇 (1171)

《环境科学》征订启事 (1138) 《环境科学》征稿简则 (1155) 信息 (824, 853, 883)

# 一种气溶胶测量仪器标定系统的设计及性能评估

陈小彤<sup>1</sup>, 蒋靖坤<sup>1,2\*</sup>, 邓建国<sup>1</sup>, 段雷<sup>1,2</sup>, 郝吉明<sup>1,2</sup>

(1. 清华大学环境学院, 北京 100084; 2. 国家环境保护大气复合污染来源与控制重点实验室, 北京 100084)

**摘要:** 对气溶胶测量仪器进行准确标定是保证大气环境及污染源颗粒物测量数据质量的重要前提. 本研究搭建了一套多分散在线标定气溶胶测量仪器的系统, 该系统采用超声气溶胶发生装置产生多分散颗粒物, 并用空气动力学粒径谱仪对颗粒物粒径分布进行测量. 评测结果表明该系统干燥腔室内气溶胶稳定、均匀, 且符合对数正态分布. 以采样器为例, 已有研究多使用单分散离线标定方法对采样器切割性能进行标定, 该方法操作繁琐、实验周期长. 利用多分散在线标定系统对 PM<sub>2.5</sub> 和 PM<sub>10</sub> 双级虚拟撞击采样器进行标定, 并与单分散离线标定方法进行了对比, 两套系统的标定结果呈现较好的一致性, 但多分散在线方法大大缩短了标定实验周期.

**关键词:** 气溶胶测量; 标定系统; 虚拟撞击器; 切割效率; 颗粒物传感器

中图分类号: X513; X830.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)03-0789-06 DOI: 10.13227/j.hjxx.2016.03.001

## Development and Performance Evaluation of a Supermicron Particle Generation System for Aerosol Instrument Calibration

CHEN Xiao-tong<sup>1</sup>, JIANG Jing-kun<sup>1,2\*</sup>, DENG Jian-guo<sup>1</sup>, DUAN Lei<sup>1,2</sup>, HAO Ji-ming<sup>1,2</sup>

(1. School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. State Environmental Protection Key Laboratory of Sources and Control of Air Pollution Complex, Beijing 100084, China)

**Abstract:** Accurate calibration of aerosol measurement instruments is critical for ensuring the data quality when sampling ambient particulate matter (PM) or those from emission sources. A system for calibrating these instruments was set up, which included an ultrasonic device to generate polydisperse supermicron particles, a chamber, and an aerodynamic particle spectrometer to measure particle size distribution. We verified its performance in stably generated testing aerosol with good spatial uniformity, controlled size distributions and concentrations. The testing aerosol generated had a lognormal distribution. A PM<sub>10</sub> and PM<sub>2.5</sub> two-stage virtual impactor was calibrated using this online method. Collection efficiencies of PM<sub>10</sub> and PM<sub>2.5</sub> stages calibrated by an off-line method using monodisperse particles were also used for comparison. The results from two different methods were consistent with each other. Though the off-line method has been widely used to calibrate PM samplers, it suffers from long experimental duration (2-3 days for calibrating one sampler). In contrast, the online method allows for a rapid calibration (less than half a day for calibrating one sampler).

**Key words:** aerosol measurement; calibration system; virtual impactor; collection efficiency; PM sensor

气溶胶是指气体及悬浮其中的液体或固体颗粒物所组成的体系, 有时也单指悬浮的颗粒物. 随着经济发展和人们生活水平的提高, 颗粒物污染 (PM<sub>10</sub> 和 PM<sub>2.5</sub>) 问题也越来越受到重视. 颗粒物污染会影响能见度和全球气候<sup>[1-4]</sup>, 对人体健康也有一定危害<sup>[5-8]</sup>, 因此我国最新的环境空气质量标准也增加了颗粒物的浓度限值<sup>[9]</sup>.

颗粒物浓度、粒径分布等参数是表征颗粒物污染所必需的, 这些参数通常用气溶胶测量仪器获取. 气溶胶测量仪器一般可分为两类, 一类是离线采样装置, 如旋风采样器、虚拟撞击采样器等; 另一类是实时在线测量仪器, 如光学粒子计数器、空气动力学粒径谱仪等. 使用这些仪器前, 一般都需对其测量准确性进行标定<sup>[10]</sup>. Sioutas 等<sup>[11]</sup> 用气溶胶发生器发生荧光素标记的单分散 PSL 小球 (聚苯乙烯乳胶粒子, polystyrene latex particles), 经过一段采样

时间后, 将采样器撞击板上和下游的特氟隆滤膜浸泡于乙酸乙酯中提取荧光素, 再用荧光光谱仪测量其浓度, 从而得出采样器切割性能. 该方法需要在采样后对滤膜和采样器等进行处理, 实验周期较长. John 等<sup>[12]</sup> 在标定多级撞击采样器时, 采用单分散颗粒物在线标定方法, 用单分散 PSL 小球产生标准气溶胶, 并用光学粒子计数器测量采样器上下游数浓度. 前两种方法均采用单分散颗粒物, 需产生不同粒径的颗粒物进行多次实验才能获得完整的切割效率曲线. Demokritou 等<sup>[13,14]</sup> 用气溶胶发生器产生多分散的 2 ~ 20 μm 空心玻璃球, 再用空气动力学粒

收稿日期: 2015-09-22; 修订日期: 2015-10-26

基金项目: 国家重点基础研究发展规划 (973) 项目 (2013CB228505); 国家高技术研究发展计划 (863) 项目 (2013AA065101, 2013AA065004); 大气颗粒物粒径谱仪研发及其在广西重点城市的应用项目 (20142100963)

作者简介: 陈小彤 (1993 ~), 女, 博士研究生, 主要研究方向为大气颗粒物测量, E-mail: ext15@mails.tsinghua.edu.cn

\* 通讯联系人, E-mail: jiangjk@mail.tsinghua.edu.cn

径谱仪对采样器上下游进行多次交替测量,得出采样器上下游数浓度和切割效率,该方法可在较短时间内获得采样器的切割性能. Marple 等<sup>[15]</sup>和 Hsiao 等<sup>[16]</sup>也曾用多分散颗粒物对采样器进行标定. 除了采样器外,目前有研究利用基于光学原理的颗粒物传感器测量大气颗粒物浓度. 常用的传感器包括 Sharp 公司的 GP2Y1010AU0F 和 Shinyei 公司的 PPD42NS 等,但需对这些颗粒物传感器进行标定<sup>[17,18]</sup>.

目前国内对采样器标定以单分散颗粒物离线测量的标定方法为主<sup>[19~22]</sup>,该方法每次只能标定单一粒径,做出完整的切割效率曲线往往需要较长时间,且操作较为繁琐,对基于光学传感器的颗粒物测量仪器的标定也尚不成熟,因此本文搭建了一套多分散颗粒物在线标定系统,可用于采样器切割性能和其他颗粒物测量仪器的标定,能够简化实验操作、缩短标定时间、提高标定效率.

## 1 标定系统设计

该系统主要由超声雾化气溶胶发生器、干燥稀释腔室(静态箱)、气溶胶测量装置(以采样器为例)以及空气动力学粒径谱仪组成,如图 1 所示.

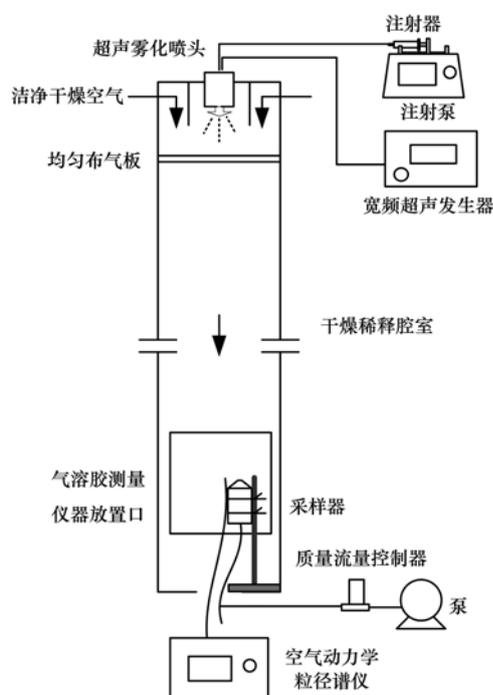


图 1 气溶胶测量仪器标定系统示意

Fig. 1 Schematic of the system for aerosol instrument calibration

### 1.1 气溶胶发生装置

超声雾化气溶胶发生器由超声雾化喷头(8700-60 KHz,美国 Sono-Tek 公司)、宽频超声发生器(06-

05018,美国 Sono-Tek 公司)和精密注射泵(美国 Sono-Tek 公司)组成. 用精密注射泵匀速向超声雾化喷头注入一定浓度的溶液,同时宽频超声发生器产生超声波,使得喷头处的压电晶体振荡,从而在喷头处产生液滴喷射<sup>[23,24]</sup>. 用纯水进行实验时,液滴峰值粒径为 32  $\mu\text{m}$ ,粒径分布满足对数正态分布.

相较于振动孔气溶胶发生器(VOAG)产生的颗粒物<sup>[25,26]</sup>,超声雾化法产生的颗粒物浓度更高(经 150  $\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$  的空气稀释后可达 100 ~ 300  $\text{cm}^{-3}$ )、多分散性更高(粒径分布的几何标准差 GSD 约为 1.4 ~ 2.0),更易于同时获得不同粒径颗粒物的切割效率,且可以通过调节注射泵进样速率调节颗粒物浓度,满足不同的浓度需求.

### 1.2 干燥稀释腔室

超声雾化喷头产生的液滴需要经过洁净干燥空气干燥,使溶剂蒸发,形成固体颗粒物,并同时达到稀释目的.

干燥稀释腔室尺寸主要根据液滴溶剂蒸发时间、气体流量(约 150  $\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$ )等确定,最终尺寸为 480 mm × 480 mm × 1 600 mm(长 × 宽 × 高). 为增强该标定系统的可扩展性,干燥稀释腔室顶部和底部均是可拆卸组件,可根据实验需要更换气溶胶发生装置等. 标定过程中,干燥稀释腔室需一直保持微正压状态,防止外界空气中颗粒物的干扰.

为防止颗粒物在腔室内壁上因静电效应而产生损失,腔室主体采用防静电有机玻璃. 为增强洁净空气和液滴的混合,提高干燥效果,采用了均匀布气板(使气体雷诺数超过 2 000,处于湍动状态). 干燥腔室需要注意密封,连接处采用橡胶圈、橡胶垫及涂玻璃胶等方式进行密封.

### 1.3 气溶胶测量仪器的放置

干燥稀释腔室末端颗粒物浓度稳定均匀,因此将采样器或其他气溶胶测量仪器放置于腔室末端. 以采样器为例,由于采样器形态各异,因此需要根据实际情况改变固定支撑装置. 图 1 中显示了一种采样器的固定方式,即用扎带将采样器固定在铁架台上,并用导电硅胶管分别连到采样器上下游.

### 1.4 气溶胶测量装置

该套标定系统采用空气动力学粒径谱仪(APS, model 3321, TSI 公司)进行颗粒物粒径及浓度的在线测量. 该仪器使颗粒物经过一个传感区域(两束激光装置),并通过测量颗粒物的飞行时间获得颗粒物粒径数据,再通过光信号的变化进行颗粒物计数. 为保证得到准确的粒径及浓度数据,实验前需

要用 PSL 小球对 APS 的测量准确度进行验证<sup>[27]</sup>.

### 1.5 标定原理

具体标定方法以采样器为例进行说明. 首先向干燥稀释腔室中通入洁净干燥的空气, 当腔室内颗粒物浓度降至 0 时, 用超声气溶胶发生装置发生气溶胶. 气溶胶稳定后, 用空气动力学粒径谱仪分别测量采样器上下游颗粒物粒径分布. 假设对于空气动力学粒径为  $D_{ai}$  的颗粒物, 采样器上下游浓度分别为  $c_{1i}$  和  $c_{2i}$ , 则采样器对该粒径颗粒物的切割效率  $\eta_i$  即为:

$$\eta_i = 1 - \frac{c_{2i}}{c_{1i}} \quad (1)$$

重复进行 3 次实验取平均值  $\bar{\eta}_i$ , 即为第  $i$  个粒径  $D_{ai}$  下的切割效率<sup>[28]</sup>.

## 2 标定系统评测

对该标定系统发生的气溶胶的粒径分布、稳定性和均匀性进行测试, 这些参数是评价标定系统的关键<sup>[29]</sup>.

### 2.1 气溶胶粒径分布

采用对人体和环境无毒无害的蔗糖溶液产生气溶胶. 称取一定质量的蔗糖(分析纯, 北京现代东方精细化学品有限公司)溶解于高纯水中, 再用注射器和孔径为  $0.45 \mu\text{m}$  的滤膜对溶液进行过滤, 并定容备用. 通过调节蔗糖溶液浓度, 可得出不同粒径分布的多分散颗粒物. 图 2 为两种不同质量浓度的蔗糖溶液 ( $1.04 \times 10^{-3} \text{g} \cdot \text{mL}^{-1}$  和  $3.45 \times 10^{-2} \text{g} \cdot \text{mL}^{-1}$ ) 发生的气溶胶的粒径分布, 峰值粒径

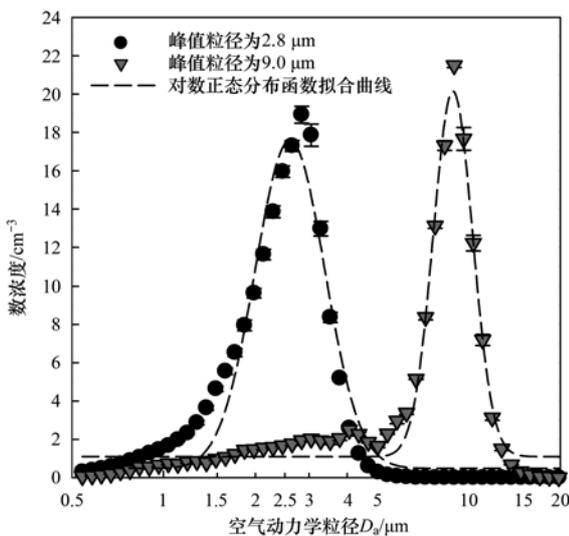


图 2 两种不同蔗糖浓度发生的气溶胶的粒径分布

Fig. 2 Size distribution of the aerosol generated using sucrose solutions of two different concentrations

分别为  $2.8 \mu\text{m}$  和  $9.0 \mu\text{m}$ , 总数浓度分别为  $192 \text{cm}^{-3}$  和  $170 \text{cm}^{-3}$ , 几何平均标准偏差 GSD 分别为 1.45 和 1.88, 用对数正态分布函数进行曲线拟合,  $R$  值分别为 0.98 和 0.99, 说明腔室中的气溶胶符合对数正态分布(由于 APS 给出的是不同粒径范围内的颗粒物数浓度, 因此图 2 中给出的并非严格意义上的粒径分布函数, 而是浓度-粒径图, 下同).

### 2.2 气溶胶稳定性

以峰值粒径为  $2.8 \mu\text{m}$ 、满足对数正态分布的蔗糖颗粒物为例, 对干燥稀释腔室中气溶胶的稳定性进行测试.

干燥腔室底部如图 3 所示, 腔室为长方体, 底部出口为圆形, 直径为  $10 \text{cm}$ . 根据采样器的放置位置(采样口与腔室底部距离  $H = 24 \text{cm}$ ), 在距圆心  $15 \text{cm}$  处设置 4 个测试点, 并在圆心处设置第 5 个测试点.

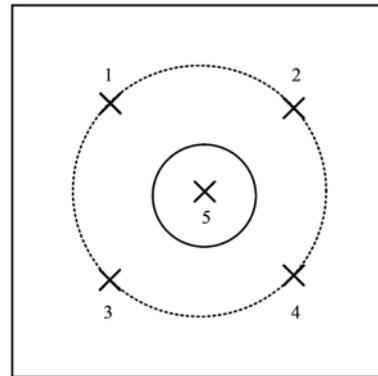


图 3 气溶胶均匀性测试选择的测试点

Fig. 3 Schematic of sampling locations for testing the spatial uniformity of generated aerosol

用  $10 \text{mL}$  注射器向超声雾化喷头注入蔗糖溶液, 注射速度为  $1.0 \text{mL} \cdot \text{min}^{-1}$ , 在每个测试点用 APS 进行颗粒物粒径分布测量. 结果表明, 颗粒物浓度上升阶段通常需要  $3 \sim 4 \text{min}$ , 稳定阶段可持续  $5 \text{min}$  以上(如使用容积更大的注射器, 稳定阶段可持续更长时间, 但  $5 \text{min}$  已足够完成标定). 图 4 为稳定阶段 5 个测试点不同粒径颗粒物的数浓度相对标准偏差. 在  $1 \sim 5 \mu\text{m}$  范围内, 颗粒物浓度随时间变化所导致的相对标准偏差均小于  $10\%$ , 说明该标定系统可以给气溶胶测量仪器标定提供粒径分布稳定的气溶胶.

### 2.3 气溶胶均匀性

气溶胶均匀性分为水平空间均匀性和垂直空间均匀性. 对图 3 中 5 个测试点进行粒径分布测量的结果如图 5 所示. 结果表明, 颗粒物在腔室的同一水平空间上分布均匀.

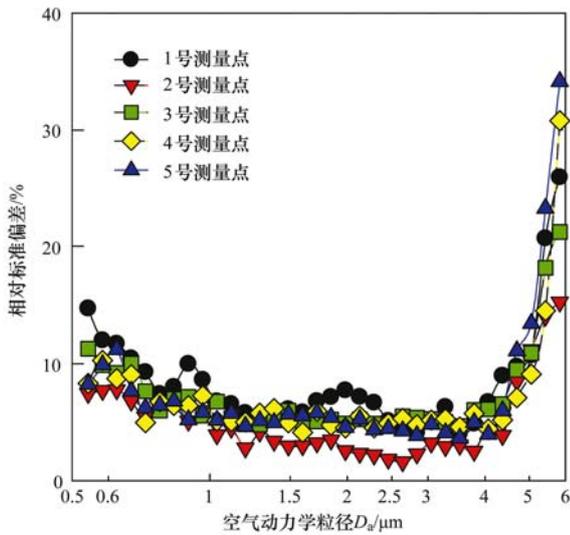


图4 各测试点不同粒径颗粒物浓度变化的相对标准偏差

Fig. 4 Relative standard deviation of particle concentration as a function of aerodynamic particle size

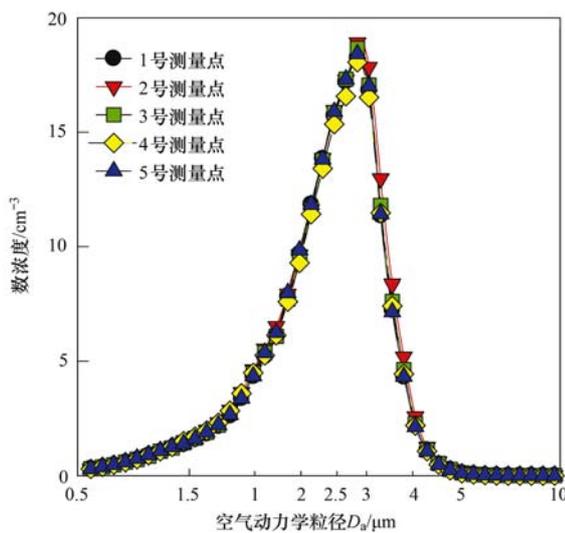


图5 干燥稀释腔内同一高度处(24 cm)各测量点颗粒物粒径分布的对比

Fig. 5 Comparison of particle size distributions sampled at different locations of the same height (24 cm) in the drying dilution chamber

对距底部不同高度的测试点进行颗粒物粒径分布测量,结果如图6所示,24~54 cm高度范围内,颗粒物分布均匀。因此进行标定实验时,气溶胶进样口建议放置于24~54 cm的高度范围内。

该标定系统距圆心15 cm的水平范围内及距底部24~54 cm的垂直范围内颗粒物分布均匀,能够满足不同形状、大小气溶胶测量仪器的标定实验。

### 3 标定系统的应用实例

分别产生峰值粒径为3.5  $\mu\text{m}$ 和9.6  $\mu\text{m}$ 的蔗糖颗粒物,对蒋靖坤等<sup>[21]</sup>设计的双级虚拟撞击采样

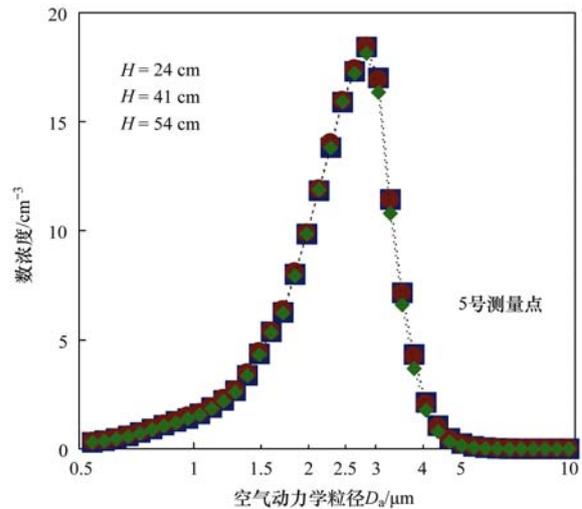


图6 干燥稀释腔内不同高度处颗粒物粒径分布的对比

Fig. 6 Comparison of particle size distributions sampled at different heights in the drying dilution chamber

器的 $\text{PM}_{2.5}$ 级和 $\text{PM}_{10}$ 级切割性能进行标定,该采样器与传统惯性采样器相似,利用颗粒物的惯性实现不同粒径颗粒物的分离,但虚拟撞击采样器没有集尘板,而是用收尘嘴代替。标定实验示意如图1所示,详细的气路连接如图7所示。三通阀1、2连通时,用空气动力学粒径谱仪测量切割器上游颗粒物浓度,颗粒物粒径分布稳定后,将三通阀1、3连通,对采样器下游颗粒物浓度进行测量,每隔1 min进行一次上下游切换。 $\text{PM}_{10}$ 级切割器标定流程类似,但切割器上游总流量变为 $25 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ ,次流仍为 $2 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ ,主流变为 $23 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ 。最后按式(1)对不同颗粒物粒径下采样器的切割效率进行计算,结果如图8所示。

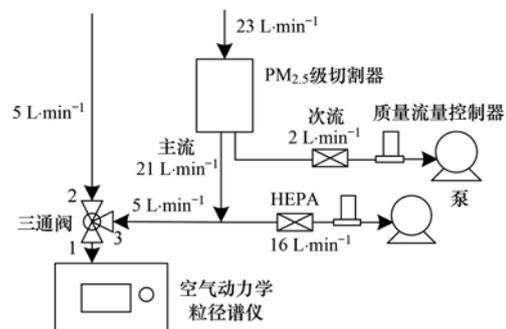


图7 标定虚拟撞击采样器 $\text{PM}_{2.5}$ 级切割性能的气路连接

Fig. 7 Setup to calibrate the collection efficiency of the  $\text{PM}_{2.5}$  virtual impactor

该标定系统得出的采样器切割性能曲线与胡国华等<sup>[20]</sup>用单分散离线方法标定的结果相近。拟合后获得的 $\text{PM}_{2.5}$ 级和 $\text{PM}_{10}$ 级 $D_{50}$ 分别为2.42  $\mu\text{m}$ 和

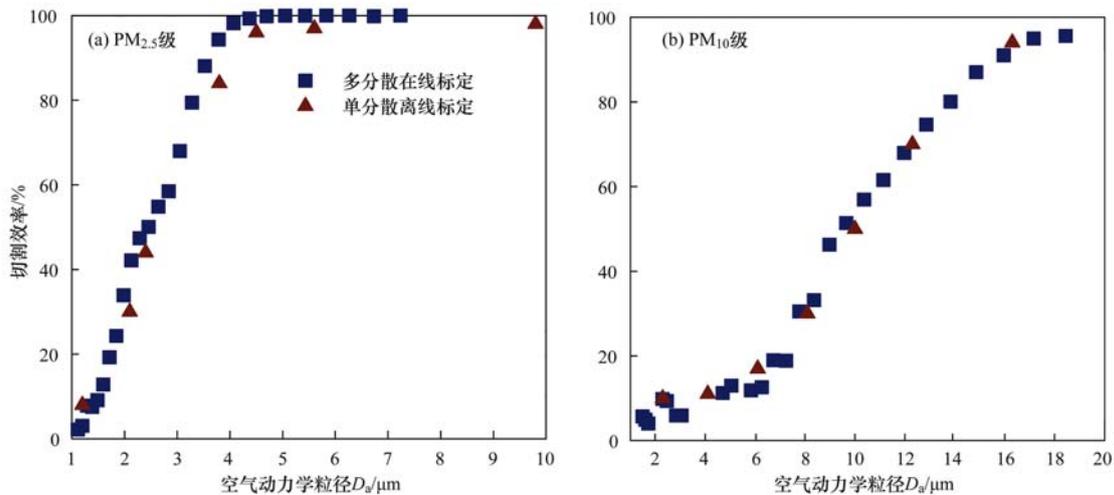


图8 虚拟撞击采样器切割效率的多分散在线标定结果和单分散离线标定结果对比

Fig. 8 Comparison of collection efficiencies of  $PM_{10}$  and  $PM_{2.5}$  virtual impactor tested using online and offline methods

9.81  $\mu\text{m}$ ,与离线方法得出的 2.49  $\mu\text{m}$  和 10.0  $\mu\text{m}$  的 50% 切割粒径也很相近. 但单分散离线标定实验周期较长,使用的荧光素铵对环境和健康也有一定的危害. 而多分散在线标定方法操作简便、实验周期短,且使用蔗糖溶液产生颗粒物,对环境和人体健康均不产生危害. 但单分散离线标定方法可以同时获得颗粒物在采样器中的损失,多分散在线标定系统难以获得该信息.

#### 4 结论

(1)设计了一种气溶胶测量仪器标定系统,该系统用超声雾化喷头产生多分散液滴,用干燥稀释腔室对液滴进行干燥和稀释形成稳定气溶胶,最后再用空气动力学粒径谱仪进行在线测量,实现对气溶胶测量仪器的标定.

(2)该系统可用蔗糖溶液产生稳定、均匀、呈现对数正态分布的颗粒物,且颗粒物峰值粒径和浓度都可以调节. 标定系统有效标定空间大,能适用于不同形状的气溶胶测量仪器的标定.

(3)该标定系统适用于采样器切割性能标定,且具有操作简便、实验周期短等优点,优于目前常用的离线标定方法. 以虚拟撞击采样器的标定结果为例,发现其标定结果与离线标定结果吻合较好.

(4)该标定系统具有较强的可拓展性. 由于干燥稀释腔室的可拆卸性,可以方便地更换气溶胶发生装置;由于气溶胶测量仪器标定原理的相似性,该标定系统也可以用来标定颗粒物传感器等在线气溶胶测量仪器.

致谢:感谢台湾“中央大学”萧大智教授对搭建

该套系统的指导和帮助.

#### 参考文献:

- [1] Watson J G. Visibility: science and regulation[J]. Journal of the Air & Waste Management Association, 2002, 52(6): 628-713.
- [2] 徐昶,叶辉,沈建东,等. 杭州大气颗粒物散射消光特性及霾天气污染特征[J]. 环境科学, 2014, 35(12): 4422-4430.
- [3] Cheng Z, Jiang J K, Chen C H, et al. Estimation of aerosol mass scattering efficiencies under high mass loading: case study for the megacity of Shanghai, China[J]. Environmental Science & Technology, 2015, 49(2): 831-838.
- [4] 陈一娜,赵普生,何迪,等. 北京地区大气消光特征及参数化研究[J]. 环境科学, 2015, 36(10): 3582-3589.
- [5] Cheng Z, Jiang J K, Fajardo O, et al. Characteristics and health impacts of particulate matter pollution in China (2001-2011)[J]. Atmospheric Environment, 2013, 65: 186-194.
- [6] Yang G H, Wang Y, Zeng Y X, et al. Rapid health transition in China, 1990-2010: findings from the global burden of disease study 2010[J]. The Lancet, 2013, 381(9882): 1987-2015.
- [7] 谢元博,陈娟,李巍. 雾霾重污染期间北京居民对高浓度  $PM_{2.5}$  持续暴露的健康风险及其损害价值评估[J]. 环境科学, 2014, 35(1): 1-8.
- [8] 陶俊,张仁健,段青春,等. 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[J]. 环境科学, 2014, 35(2): 411-417.
- [9] GB 3095-2012, 环境空气质量标准[S].
- [10] Kulkarni P, Baron P A, Willeke K. Aerosol measurement: principles, techniques, and applications[M]. New York: John Wiley & Sons, 2005. 449-478.
- [11] Sioutas C, Chang M C, Kim S, et al. Design and experimental characterization of a  $PM_{1}$  and a  $PM_{2.5}$  personal sampler[J]. Journal of Aerosol Science, 1999, 30(6): 693-707.

- [12] John A C, Kuhlbusch T A J, Fissan H, *et al.* Development of a PM<sub>10</sub>/PM<sub>2.5</sub> cascade impactor and in-stack measurements [J]. *Aerosol Science and Technology*, 2003, **37**(9): 694-702.
- [13] Demokritou P, Lee S J, Koutrakis P. Development and evaluation of a high loading PM<sub>2.5</sub> speciation sampler [J]. *Aerosol Science and Technology*, 2004, **38**(2): 111-119.
- [14] Demokritou P, Kavouras I G, Harrison D, *et al.* Development and evaluation of an impactor for a PM<sub>2.5</sub> speciation sampler [J]. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 2001, **51**(4): 514-523.
- [15] Marple V, Olson B, Romay F, *et al.* Second generation micro-orifice uniform deposit impactor, 120 moudu-ii: design, evaluation, and application to long-term ambient sampling [J]. *Aerosol Science and Technology*, 2014, **48**(4): 427-433.
- [16] Hsiao T C, Chen D R, Son S Y. Development of mini-cyclones as the size-selective inlet of miniature particle detectors [J]. *Journal of Aerosol Science*, 2009, **40**(6): 481-491.
- [17] Holstius D M, Pillarisetti A, Smith K R, *et al.* Field calibrations of a low-cost aerosol sensor at a regulatory monitoring site in California [J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2014, **7**(4): 1121-1131.
- [18] Wang Y, Li J Y, Jing H, *et al.* Laboratory evaluation and calibration of three low-cost particle sensors for particulate matter measurement [J]. *Aerosol Science and Technology*, 2015, **49**(11): 1063-1077.
- [19] 刘光铨, 王炎生, 陈明兰, 等. WY-1 型烟道用冲击式尘粒分级仪的研制 [J]. *环境工程*, 1985, **5**(1): 17-24.
- [20] 胡国华, 刘江, 刘彦昌, 等. WY 型冲击式尘粒分级仪的研制及应用 [J]. *卫生研究*, 2009, **38**(2): 223-225.
- [21] 蒋靖坤, 邓建国, 段雷, 等. 基于虚拟撞击原理的固定源 PM<sub>10</sub>/PM<sub>2.5</sub> 采样器的研制 [J]. *环境科学*, 2014, **35**(10): 3639-3643.
- [22] 刘道清, 季学李. 矩形喷嘴 PM<sub>2.5</sub> 惯性冲击采样器的研制 [J]. *中国环境监测*, 2006, **22**(6): 51-53.
- [23] 孙晓霞. 超声波雾化喷嘴的研究进展 [J]. *工业炉*, 2004, **26**(1): 19-23, 32.
- [24] Tarr M A, Zhu G X, Browner R F. Fundamental aerosol studies with an ultrasonic nebulizer [J]. *Applied Spectroscopy*, 1991, **45**(9): 1424-1432.
- [25] 陈魁, 白志鹏, 郭光焕. PM<sub>10</sub>-PM<sub>2.5</sub> 冲击采样器的研制与开发 [J]. *环境污染与防治*, 2009, **31**(6): 23-25.
- [26] Marjamäki M, Keskinen J, Chen D R, *et al.* Performance evaluation of the electrical low-pressure impactor (ELPI) [J]. *Journal of Aerosol Science*, 2000, **31**(2): 249-261.
- [27] Peters T M, Vanderpool R W, Wiener R W. Methodology for measuring PM<sub>2.5</sub> separator characteristics using an aerosizer [J]. *Aerosol Science and Technology*, 2001, **34**(5): 398-406.
- [28] HJ 93-2013, 环境空气颗粒物 (PM<sub>10</sub> 和 PM<sub>2.5</sub>) 采样器技术要求及检测方法 [S].
- [29] Marple V A, Rubow K L. An aerosol chamber for instrument evaluation and calibration [J]. *American Industrial Hygiene Association Journal*, 1983, **44**(5): 361-367.

## CONTENTS

Development and Performance Evaluation of a Supramicron Particle Generation System for Aerosol Instrument Calibration .....	CHEN Xiao-tong,JIANG Jing-kun,DENG Jian-guo, <i>et al.</i> ( 789 )
Establishment of Assessment Method for Air Bacteria and Fungi Contamination .....	ZHANG Hua-ling, YAO Da-jun, ZHANG Yu, <i>et al.</i> ( 795 )
Chemical Characteristics and Sources of Atmospheric Carbonyls During the 2014 Beijing APEC .....	HE Xiao-lang, TAN Ji-hua, GUO Song-jun, <i>et al.</i> ( 801 )
Different Air Pollution Situations of O <sub>3</sub> and PM <sub>2.5</sub> During Summer in Beijing .....	WANG Zhan-shan, ZHANG Da-wei, LI Yun-ting, <i>et al.</i> ( 807 )
Aerosol Optical Properties in the Northern Suburb of Nanjing During Haze Days in January 2013 .....	WANG Li-peng, MA Yan, ZHENG Jun, <i>et al.</i> ( 816 )
A Numerical Study of Typical Heavy Air Pollution Episode of PM <sub>2.5</sub> in Shanghai .....	CHANG Lu-yu, XU Jian-ming, ZHOU Guang-qiang, <i>et al.</i> ( 825 )
Indoor Deposition Flux, Seasonal Variations and Human Exposure Levels of Polybrominated Diphenyl Ethers in Xiamen, China .....	HAN Wen-liang, LIU Yu, CHEN Hai-ming, <i>et al.</i> ( 834 )
Nitric Oxide Removal with a Fe-TiO <sub>2</sub> /PSF Hybrid Catalytic Membrane Bioreactor .....	LI Bao-ren, CHEN Zhou-yang, WANG Jian-bin, <i>et al.</i> ( 847 )
Potential Bioavailability of Dissolved Organic Nitrogen in the Discharge Outlets of Sewage Treatment Plants Around the Jiaozhou Bay .....	KONG Xiu-jun,ZHANG Peng,YANG Nan-nan, <i>et al.</i> ( 854 )
Inversion Model and Daily Variation of Total Phosphorus Concentrations in Taihu Lake Based on GOCI Data .....	DU Cheng-gong, LI Yun-mei, WANG Qiao, <i>et al.</i> ( 862 )
Temporal and Spatial Distribution of Environmental Factors and Phytoplankton During Algal Bloom Season in Pengxi River, Three Gorges Reservoir .....	ZHOU Chuan, YU Jian-jun, FU Li, <i>et al.</i> ( 873 )
Three-dimensional Fluorescence Spectral Characteristics of Different Molecular Weight Fractionations of Dissolved Organic Matter in the Water-level Fluctuation Zones of Three Gorges Reservoir Areas .....	CHEN Xue-shuang, JIANG Tao, LU Song, <i>et al.</i> ( 884 )
Distribution Characteristics and Source Apportionment of <i>n</i> -Alkanes in Water from Yellow River in Henan Section .....	FENG Jing-lan, XI Nan-nan, ZHANG Fei, <i>et al.</i> ( 893 )
Distribution Characteristics and Source Identification of Organochlorine Pesticides in Surface Soil in Karst Underground River Basin .....	XIE Zheng-lan, SUN Yu-chuan, ZHANG Mei, <i>et al.</i> ( 900 )
Effects of Long-term Different Tillage Methods on Mercury and Methylmercury Contents in Purple Paddy Soil and Overlying Water .....	WANG Xin-yue, TANG Zhen-ya, ZHANG Cheng, <i>et al.</i> ( 910 )
Speciation and Risk Characteristics of Heavy Metals in the Sediments of the Yangtze Estuary .....	YIN Su, FENG Cheng-hong, LI Yang-yang, <i>et al.</i> ( 917 )
Distribution and Pollution Assessment of Nutrient and Heavy Metals in Surface Sediments from Lake Gehu in Southern Jiangsu Province, China .....	XIONG Chun-hui, ZHAGN Rui-lei, WU Xiao-dong, <i>et al.</i> ( 925 )
Characteristics of Deposited Sediment and Assessment of Heavy Metals in Typical Tributaries Bay Riparian Zone of the Three Gorges Reservoir .....	WANG Yong-yan, WEN An-bang, SHI Zhong-lin, <i>et al.</i> ( 935 )
Pollution Characteristics Analysis and Risk Assessment of Total Mercury and Methylmercury in Aquatic Products of the Haihe Stem River .....	TONG Yin-dong, ZHANG Wei, DENG Chun-yan, <i>et al.</i> ( 942 )
Distribution and Content of Transferable Nitrogen in the Soil of Water Level Fluctuating Zones of Mainstream and Its Tributary of Three Gorges Reservoir Areas During the Dry Period .....	HE Li-ping, LIU Dan, YU Zhi-guo, <i>et al.</i> ( 950 )
Effect of Soil and Dominant Plants on Mercury Speciation in Soil and Water System of Water-Level-Fluctuation Zone in the Three Gorges Area .....	LIANG Li, WANG Yong-min, ZHANG Cheng, <i>et al.</i> ( 955 )
Runoff Pollution Experiments of Paddy Fields Under Different Irrigation Patterns .....	ZHOU Jing-wen, SU Bao-lin, HUANG Ning-bo, <i>et al.</i> ( 963 )
Grain Size Distribution Characteristics of Suspended Particulate Matter as Influenced by the Apparent Pollution in the Eutrophic Urban Landscape Water Body .....	GONG Dan-yan, PAN Yang, HUANG Yong, <i>et al.</i> ( 970 )
Effect of Intermittent Aeration on Nitrogen Removal Efficiency in Vertical Subsurface Flow Constructed Wetland .....	WANG Jian, LI Huai-zheng, ZHEN Bao-chong, <i>et al.</i> ( 980 )
Effect of Non-dissolved Quinone on Perchlorate Reduction by Strain GWF .....	ZHANG Yuan-yuan, GUO Yan-kai, ZHANG Chao, <i>et al.</i> ( 988 )
Effects of UV Radiation on the Physicochemical Properties and Coagulation Properties of Humic Acid Solution .....	WANG Wen-dong, ZHANG Ke, FAN Qing-hai, <i>et al.</i> ( 994 )
Removal of Sulfate Ions from Aqueous Solution by Adsorption with Hydrotalcite-like Composite .....	GU Yi-bing, MA Yong-wen, WAN Jin-quan, <i>et al.</i> ( 1000 )
Effects of Fulvic Acid on Adsorption and Form Distribution of Heavy Metals on Sediments .....	LI Yu-qing, HE Jiang, LÜ Chang-wei, <i>et al.</i> ( 1008 )
Rapid Synthesis of Metal Organic Framework and Its Adsorption Properties on Anionic Dyes .....	SUN De-shuai, LIU Ya-li, ZHANG Xiao-dong, <i>et al.</i> ( 1016 )
Adsorption Properties of Fluorine onto Fulvic Acid-Bentonite Complex .....	FANG Dun, TIAN Hua-jing, YE Xin, <i>et al.</i> ( 1023 )
Influence of Three Low-Molecular-Weight Organic Acids on the Adsorption of Phenanthrene in Purple Soil .....	XIE Li, CHEN Ben-shou, ZHANG Jin-zhong, <i>et al.</i> ( 1032 )
Adsorptive Stabilization of Soil Cr(VI) Using HDTMA Modified Montmorillonite .....	JIANG Ting-ting, YU Kai, LUO Qi-shi, <i>et al.</i> ( 1039 )
Effects of Hydrothermal Treatment Time on the Transformations of N, P, K and Heavy Metals in Sewage Sludge .....	WANG Xing-dong, LIN Jing-jiang, LI Zhi-wei, <i>et al.</i> ( 1048 )
Inhibition of Denitrification by Total Phenol Load of Coal Gasification Wastewater .....	ZHANG Yu-ying, CHEN Xiu-rong, WANG Lu, <i>et al.</i> ( 1055 )
Element Sulfur Autotrophic Denitrification Combined Anaerobic Ammonia Oxidation .....	ZHOU Jian, HUANG Yong, LIU Xin, <i>et al.</i> ( 1061 )
Changes of Microbial Community Structure in Activated Sludge Bulking at Low Temperature .....	DUAN Zheng-hua, PAN Liu-ming, CHEN Xiao-ou, <i>et al.</i> ( 1070 )
Synergetic Inhibitory Effect of Free Ammonia and Aeration Phase Length Control on the Activity of Nitrifying Bacteria .....	SUN Hong-wei, LÜ Xin-tao, WEI Xue-fen, <i>et al.</i> ( 1075 )
Heterotrophic Nitrification and Aerobic Denitrification of the Hypothermia Aerobic Denitrification Bacterium: <i>Arthrobacter arilaitensis</i> .....	HE Teng-xia, NI Jiu-pai, LI Zhen-lun, <i>et al.</i> ( 1082 )
Isolation, Identification and Nitrogen Removal Characteristics of a Heterotrophic Nitrification-Aerobic Denitrification Strain y3 Isolated from Marine Environment .....	SUN Qing-hua, YU De-shuang, ZHANG Pei-yu, <i>et al.</i> ( 1089 )
Estimation of Topsoil Carbon Sequestration Potential of Cropland Through Different Methods: A Case Study in Zhuanglang County, Gansu Province .....	SHI Chen-di, XU Ming-xiang, QIU Yu-jie ( 1098 )
Priming Effects of Soil Moisture on Soil Respiration Under Different Tillage Practices .....	ZHANG Yan, LIANG Ai-zhen, ZHANG Xiao-ping, <i>et al.</i> ( 1106 )
Effects of Green Manure Intercropping and Straw Mulching on Winter Rape Rhizosphere Soil Organic Carbon and Soil Respiration .....	ZHOU Quan, WANG Long-chang, XIONG Ying, <i>et al.</i> ( 1114 )
Heidaigou Opencast Coal Mine: Soil Enzyme Activities and Soil Physical and Chemical Properties Under Different Vegetation Restoration .....	FANG Ying, MA Ren-tian, AN Shao-shan, <i>et al.</i> ( 1121 )
C, N, P, K Stoichiometric Characteristic of Leaves, Root and Soil in Different Abandoned Years in Loess Plateau .....	ZHANG Hai-dong, RU Hai-li, JIAO Feng, <i>et al.</i> ( 1128 )
Soil Heavy Metal Spatial Distribution and Source Analysis Around an Aluminum Plant in Baotou .....	ZHANG Lian-ke, LI Hai-peng, HUANG Xue-min, <i>et al.</i> ( 1139 )
Mixture Leaching Remediation Technology of Arsenic Contaminated Soil .....	CHEN Xun-feng, LI Xiao-ming, CHEN Can, <i>et al.</i> ( 1147 )
Performance of Electricity Generation and Feasibility of Discontinuous Power Supply of MFC by Using Pretreated Excess Sludge as Fuel .....	ZHAO Yan-hui, ZHAO Yang-guo, GUO Liang ( 1156 )
Correlation of Persistent Free Radicals, PCDD/Fs and Metals in Waste Incineration Fly Ash .....	WANG Tian-jiao, CHEN Tong, ZHAN Ming-xiu, <i>et al.</i> ( 1163 )
Effects of Eliminating Backward Production Capacities on Reduction of Dioxin Emissions in Key Industries .....	GENG Jing, LÜ Yong-long, REN Bing-nan, <i>et al.</i> ( 1171 )

# 《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 刘 毅 汤鸿霄 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)

2016年3月15日 第37卷 第3期

## ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 3 Mar. 15, 2016

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	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. sciencecp. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencecp. 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: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行