

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第5期

Vol.35 No.5

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

长三角地区秸秆燃烧排放因子与颗粒物成分谱研究	唐喜斌, 黄成, 楼晟荣, 乔利平, 王红丽, 周敏, 陈明华, 陈长虹, 王倩, 李贵玲, 李莉, 黄海英, 张钢锋 (1623)
南京市大气颗粒物中水溶性离子的粒径分布和来源解析	薛国强, 朱彬, 王红磊 (1633)
2011年春季沙尘天气影响下上海大气颗粒物及其化学组分的变化特征	李贵玲, 周敏, 陈长虹, 王红丽, 王倩, 楼晟荣, 乔利平, 唐喜斌, 李莉, 黄海英, 陈明华, 黄成, 张钢锋 (1644)
结合外场观测分析珠三角二次有机气溶胶的数值模拟	郭晓霜, 司徒淑婷, 王雪梅, 丁翔, 王新明, 闫才青, 李小滢, 郑玫 (1654)
2013年夏季嘉兴市一次光化学事件的观测分析	沈利娟, 李莉, 吕升, 张孝寒, 吴博, 章国骏, 王翥 (1662)
移动监测法测量厦门春秋季节近地面 CO ₂ 的时空分布	李燕丽, 邢振雨, 穆超, 杜可 (1671)
秸秆烟尘和灰烬中元素碳的稳定同位素组成	刘刚, 李久海, 徐慧, 吴丹, 刘艳 (1680)
连续测量大气·OH的化学电离飞行时间质谱仪的研制	窦健, 花磊, 侯可勇, 蒋蕾, 谢园园, 赵无垠, 陈平, 王卫国, 田地, 李海洋 (1688)
我国重点城市水源及水厂出水中乙草胺的残留水平	于志勇, 金芬, 李红岩, 安伟, 杨敏 (1694)
巢湖水体组分垂向分布特征及其对水下光场的影响	马孟泉, 张玉超, 钱新, 马荣华, 段洪涛 (1698)
京杭大运河(杭州段)典型断面水生植物多样性调查及其与水环境相关性研究	陆胤, 许晓路, 张德勇, 王莉, 朱旭妮, 冯凤, 周巧君, 谢鹏 (1708)
合肥市区典型景观水体氮磷污染特征及富营养化评价	李如忠, 刘科峰, 钱靖, 杨继伟, 张翩翩 (1718)
重庆园博园龙景湖新建初期内源氮磷分布特征及扩散通量估算	潘延安, 雷沛, 张洪, 单保庆, 李杰 (1727)
千岛湖库区及其主要入库河流水中有机氯农药残留污染特征及健康风险评价	唐访良, 张明, 徐建芬, 阮东德, 陈峰, 吴志旭, 程新良 (1735)
九龙江流域潜在病原菌污染分析	侯丽媛, 胡安谊, 马英, 于昌平 (1742)
江湖关系变化对鄱阳湖沉积物重金属分布及生态风险影响	刘婉清, 倪兆奎, 吴志强, 王圣瑞, 曾清如 (1750)
鄱阳湖-乐安河湿地水土环境中重金属污染的时空分布特征	简敏菲, 李玲玉, 徐鹏飞, 陈朴青, 熊建秋, 周雪玲 (1759)
典型岩溶水系统中溶解性有机质的运移特征	姚昕, 邹胜章, 夏日元, 许丹丹, 姚敏 (1766)
基于扰动分析方法的 AnnAGNPS 模型水文水质参数敏感性分析	席庆, 李兆富, 罗川 (1773)
混合胁迫条件下蓝藻运动特性研究	孙秀秀, 丛海兵, 高郑娟, 崔朝杰, 曹倩倩 (1781)
不同波长和强度光照对水体汞还原的影响	李希嘉, 钟紫旋, 孙荣国, 杨鲲, 王定勇 (1788)
地下水中常见离子对纳米零价铁除 Se(IV) 动力学的影响	杨文君, 郭迎庆, 杜尔登 (1793)
溴氧化铋可见光催化降解高效氯氟酯的研究	彭一荣, 赵小蓉, 贾漫珂, 周薇, 黄应平 (1798)
石墨烯基磁性复合材料吸附水中亚甲基蓝的研究	常青, 江国栋, 胡梦璇, 黄佳, 唐和清 (1804)
电化学氧化 PFOA 阳极材料筛选及其机制研究	卓琼芳, 邓述波, 许振成, 余刚 (1810)
典型抗生素在中国西南地区某污水处理厂中的行为和归趋	甘秀梅, 严清, 高旭, 张怡昕, 訾成方, 彭绪亚, 郭劲松 (1817)
颗粒状大孔阴树脂去除有机物以及缓解膜污染的效果与机制	何欢, 董秉直, 许光红, 闫昭辉 (1824)
石墨-活性炭纤维复合电极电吸附处理含盐废水的研究	周贵忠, 王兆丰, 王珣, 李文倩, 李少香 (1832)
酞基甲基化聚苯乙烯的制备及废水生化处理应用	张华雨, 许晴, 牛春梅, 王亚君, 侯正浩, 李绍英, 陈延明, 廉静, 吴士彬, 郭建博 (1838)
FePMo ₁₂ 催化电化学反应降解染料废水的研究	王栗, 岳琳, 郭建博, 杨景亮, 廉静, 罗晓, 王开红 (1843)
实际污水培养好氧颗粒污泥及其特性研究	杨淑芳, 张健君, 邹高龙, 杜至力 (1850)
SFBR 中好氧颗粒污泥的培养及特性研究	龙焙, 杨昌柱, 濮文虹, 杨家宽, 白俊, 王晶, 周玄月, 蒋国盛, 李春阳, 刘福标 (1857)
不同好/厌氧区容积负荷对生物膜/颗粒污泥耦合工艺脱氮除磷的影响	尹航, 刘畅, 高辉, 高大文 (1866)
黄原酸化废弃污泥吸附 Cu ²⁺ 研究	岑艳, 全向春, 姜晓满 (1871)
轮叶黑藻和穗花狐尾藻对铜的吸收机制研究	薛培英, 李国新, 赵全利 (1878)
不同烧制温度下玉米秸秆生物炭的性质及对苯的吸附性能	黄华, 王雅雄, 唐景春, 朱文英 (1884)
北京常见绿化树种叶片富集重金属能力研究	李少宁, 孔令伟, 鲁绍伟, 陈波, 高琛, 石媛 (1891)
泰州市区重金属污染的薛袋法与路生法评价研究	陈勤, 方炎明, 颜赞, 陈步金 (1901)
放牧对呼伦贝尔草甸草原土壤呼吸温度敏感性的影响	王旭, 闫瑞瑞, 邓钰, 闫玉春, 辛晓平 (1909)
苹果园土壤呼吸的变化及生物和非生物因素的影响	王蕊, 郭胜利, 刘庆芳, 张彦军, 姜继超, 郭慧敏, 李如剑 (1915)
重庆铁山坪森林土壤汞释放通量的影响因子研究	王琼, 罗遥, 杜宝玉, 叶芝祥, 段雷 (1922)
上海市郊区养殖场周边环境砷含量特征	奚功芳, 周守标, 丁海城, 姚春霞, 孔娟娟 (1928)
不同施氮量下水稻分蘖期光合碳向土壤碳库的输入及其分配的量化研究: ¹³ C 连续标记法	谭立敏, 吴昊, 李卉, 周萍, 李科林, 王久荣, 葛体达, 袁红朝, 吴金水 (1933)
污灌区盐分累积对土壤汞吸附行为影响的模拟研究	郑顺安, 李晓华, 徐志宇 (1939)
石灰干化污泥稳定后土壤中 Pb、Cd 和 Zn 浸出行为的研究	李翔, 宋云, 刘永兵 (1946)
大连市海产品中短链氯化石蜡的含量与分布研究	虞俊超, 王宝盛, 王亚韩, 孟梅, 陈茹, 江桂斌 (1955)
应用生物配体模型(BLM)研究辽河与太湖水体中铜对大型溞的急性毒性	周腾耀, 曹莹, 覃璐玫, 张亚辉, 曾鸿鸣, 闫振广, 刘征涛 (1962)
氧化铜纳米颗粒对水稻幼苗根系代谢毒性的研究	王淑玲, 张玉喜, 刘汉柱, 辛华 (1968)
吐温 80 对苏云金芽孢杆菌降解三苯基锡的促进机制	黄捷, 叶锦韶, 尹华, 彭辉, 马嘉雯, 唐立椿, 王惜若 (1974)
牛粪混合液微生物燃料电池长期运行稳定性研究	焦燕, 张国栋, 赵庆良 (1981)
针铁矿对城市生活垃圾有机组分厌氧发酵的影响	杨露露, 岳正波, 陈天虎, 王进 (1988)
城市生活垃圾集装箱转运过程中污染物产生状况研究	王晓媛, 刘殷华, 汪飞, 黄长缨, 陆峰, 谢冰 (1994)
铈插层黏土负载铁催化剂在 H ₂ S 选择性催化氧化过程中催化性能的研究	孙超, 张鑫, 郝郑平, 窦广玉, 孙春宝 (2002)
脱硫类水滑石衍生复合氧化物不同方法的制备与表征	祝春蕾, 王海林, 孙春宝 (2010)
固定污染源排气中 PM _{2.5} 采样方法综述	蒋靖坤, 邓建国, 李振, 李兴华, 段雷, 郝吉明 (2018)
产甲烷微生物研究概况	李煜珊, 李耀明, 欧阳志云 (2025)
《环境科学》征稿简则(1961) 《环境科学》征订启事(1967) 信息(1643, 1687, 1803, 1837)	

固定污染源排气中 $\text{PM}_{2.5}$ 采样方法综述

蒋靖坤¹, 邓建国¹, 李振¹, 李兴华², 段雷¹, 郝吉明¹

(1. 清华大学环境学院, 北京 100084; 2. 北京航空航天大学化学与环境学院, 北京 100191)

摘要: 我国新的环境空气质量标准已于 2012 年颁布并将自 2016 年起全面实施. 为使新标准规定的细颗粒物($\text{PM}_{2.5}$)达标, 各地需对固定污染源排气中 $\text{PM}_{2.5}$ 进行监测和控制, 但目前国内尚无固定源 $\text{PM}_{2.5}$ 采样标准方法. 本文系统地介绍了国内外固定源 $\text{PM}_{2.5}$ 采样方法及相应的国际标准, 包括直接采样法和稀释采样法, 并分析了这些方法的优缺点及用于我国固定源 $\text{PM}_{2.5}$ 测量的可行性. 为了便于环境管理和监测, 建议确立基于虚拟惯性撞击原理的烟道内直接采样方法为标准方法, 用于测定固定源排气中的可捕集 $\text{PM}_{2.5}$; 为了评估固定源 $\text{PM}_{2.5}$ 排放对大气环境质量和健康的影响, 建议同时确立以烟道外稀释采样为基础的标准方法, 用于测定固定源排气中包括可捕集和可凝结的 $\text{PM}_{2.5}$.

关键词: 固定污染源; 细颗粒物($\text{PM}_{2.5}$); 惯性撞击分级器; 虚拟撞击器; 稀释采样

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)05-2018-07 DOI: 10.13227/j.hj.kx.2014.05.055

Sampling Methods for $\text{PM}_{2.5}$ from Stationary Sources: a Review

JIANG Jing-kun¹, DENG Jian-guo¹, LI Zhen¹, LI Xing-hua², DUAN Lei¹, HAO Ji-ming¹

(1. School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. School of Chemistry and Environment, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: The new China national ambient air quality standard has been published in 2012 and will be implemented in 2016. To meet the requirements in this new standard, monitoring and controlling $\text{PM}_{2.5}$ emission from stationary sources are very important. However, so far there is no national standard method on sampling $\text{PM}_{2.5}$ from stationary sources. Different sampling methods for $\text{PM}_{2.5}$ from stationary sources and relevant international standards were reviewed in this study. It includes the methods for $\text{PM}_{2.5}$ sampling in flue gas and the methods for $\text{PM}_{2.5}$ sampling after dilution. Both advantages and disadvantages of these sampling methods were discussed. For environmental management, the method for $\text{PM}_{2.5}$ sampling in flue gas such as impactor and virtual impactor was suggested as a standard to determine filterable $\text{PM}_{2.5}$. To evaluate environmental and health effects of $\text{PM}_{2.5}$ from stationary sources, standard dilution method for sampling of total $\text{PM}_{2.5}$ should be established.

Key words: stationary source; $\text{PM}_{2.5}$; impactor; virtual impactor; dilution sampling

目前我国大气环境问题越来越突出, 区域霾污染引起全社会关注. 霾污染主要是由大气中细颗粒物($\text{PM}_{2.5}$)增多导致的^[1]. 为了治理区域霾污染问题, 我国将从 2016 年 1 月 1 日起实施新的环境空气质量标准(GB 3095-2012)^[2], 其中增加了 $\text{PM}_{2.5}$ 的日均值和年均值标准. 我国 1990 ~ 2005 年期间排放的一次 $\text{PM}_{2.5}$ 中约 50% 来自固定污染源, 如火电厂、水泥厂、钢铁厂和工业锅炉等^[3]. 各地要达到新标准规定的浓度限制, 须对固定污染源的 $\text{PM}_{2.5}$ 排放进行管理和控制, 而监测固定源 $\text{PM}_{2.5}$ 的排放是其必要条件. 目前, 我国针对固定污染源排气中颗粒物的标准采样方法只有 GB 16147-1996^[4], 该方法仅规定了对总烟尘的采样方法, 尚无 $\text{PM}_{2.5}$ 的测定方法.

建立固定污染源 $\text{PM}_{2.5}$ 标准采样方法, 将有助于建立准确的 $\text{PM}_{2.5}$ 源排放清单和源谱库, 为 $\text{PM}_{2.5}$ 污染治理、细颗粒物健康风险评估和新空气质量标准

达标奠定基础. 本研究将对国内外固定污染源 $\text{PM}_{2.5}$ 的采样方法和相应的国际标准进行介绍, 并讨论这些方法应用于我国固定污染源 $\text{PM}_{2.5}$ 测定的可行性. 固定污染源排气中 $\text{PM}_{2.5}$ 由两部分组成: 一部分为可捕集 $\text{PM}_{2.5}$ (filterable $\text{PM}_{2.5}$); 另一部分为可凝结 $\text{PM}_{2.5}$ (condensable $\text{PM}_{2.5}$)^[5]. 可捕集 $\text{PM}_{2.5}$ 是指在烟道中烟气温度下可用滤膜或滤筒捕集到的空气动力学直径(D_a) $\leq 2.5 \mu\text{m}$ 的颗粒物. 而可凝结 $\text{PM}_{2.5}$ 是指在烟道中烟气温度下为气态的挥发和半挥发性物质在排放进入大气环境后稀释降温, 经均相和非均相成核形成的空气动力学直径(D_a) $\leq 2.5 \mu\text{m}$ 的颗粒物. 针对这两部分 $\text{PM}_{2.5}$ 有两种不同的采

收稿日期: 2013-09-16; 修订日期: 2013-11-11

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)

作者简介: 蒋靖坤(1980~), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为气溶胶测量和大气颗粒物成因, E-mail: jiangjk@tsinghua.edu.cn

样方法,即直接采样法和稀释采样法。直接采样法测定可捕集 $\text{PM}_{2.5}$,稀释采样法测定总的 $\text{PM}_{2.5}$ 排放,二者之差为可凝结 $\text{PM}_{2.5}$ 。

1 固定源 $\text{PM}_{2.5}$ 直接采样方法

固定污染源排气中 $\text{PM}_{2.5}$ 的直接采样方法是指将采样器直接伸入烟道中,在烟气温度下等速抽取一定量的烟气,使其通过收集介质,将其中 $\text{PM}_{2.5}$ 捕集在收集介质上的方法。该方法仪器结构简单,便于携带和操作。但直接采样方法只能采集烟气中的可捕集 $\text{PM}_{2.5}$ 。常用的直接采样法利用惯性力或离心力将烟气中的颗粒物进行分级获得 $\text{PM}_{2.5}$,然后用收集介质收集。主要的采样器有惯性撞击分级器 (impactor)、虚拟惯性撞击分级器 (virtual impactor) 和旋风分级采样器 (cyclone)。为保证准确测定烟气中的 $\text{PM}_{2.5}$,这些采样器均采用恒定流量的采样方式,且力争采样流速等于烟气流速,降低因颗粒物惯性运动而导致的采样偏差。

1.1 惯性撞击分级采样法

惯性撞击分级采样法的原理如图 1 所示,烟气通过加速喷嘴加速,然后 90° 变向运动,不同粒径颗粒物的惯性不同,即跟随气流运动的能力也不相同,小颗粒物容易随气流一起变向运动进入下游,而大颗粒物不容易跟随气流变向,从而撞到下方的收集板上。表征颗粒物跟随气流运动能力的参数称为斯托克斯数 (Stokes number)。如果某一粒径的颗粒物 50% 被捕集到收集板上,另外 50% 随气流进入下游,则称该粒径为该惯性撞击分级器的切割粒径 (D_{p50}),所对应的斯托克斯数记为 Stk_{50} 。粒径小于 D_{p50} 的颗粒物将主要随气流进入下游,粒径大于 D_{p50} 的颗粒物将主要被捕集到收集板上,从而实现对烟气中颗粒物的分级。

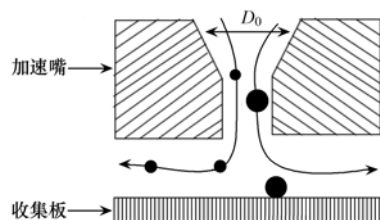


图 1 惯性撞击分级器原理示意

Fig. 1 Schematics of impactor

2009 年国际标准化组织提出了利用惯性撞击分级原理采集烟气系统中 $\text{PM}_{10}/\text{PM}_{2.5}$ 的标准采样方法 (ISO 23210:2009) [6]。该方法采用两级惯性撞击

分级器,如图 2 中所示,该标准方法是以 John 等 [7] 设计的双级撞击器为原型提出的,将烟气颗粒物分为 $D_a > 10 \mu\text{m}$ 、 $2.5 \mu\text{m} < D_a \leq 10 \mu\text{m}$ 和 $D_a \leq 2.5 \mu\text{m}$ 3 级,分级后的颗粒物被分别收集到两级收集板和滤膜上,滤膜上收集的颗粒物为 $\text{PM}_{2.5}$ 。然后用称重方式确定各级收集板和滤膜上颗粒物的重量,结合采样流量进而确定其质量浓度。双级惯性撞击分级器只适合采集浓度半小时平均值 $\leq 40 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 的烟气,不适合采集含有高浓度颗粒物的烟气,也不适合采集含有饱和水蒸汽的烟气,如湿法脱硫 (FGD) 出口烟气,因为水蒸汽凝结将改变颗粒物的空气动力学行为。

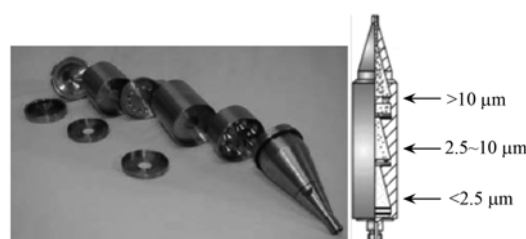


图 2 Johnas II 型惯性撞击分级器示意 [7]

Fig. 2 Schematics of Johnas II impactor

惯性撞击分级采样法测定 $\text{PM}_{2.5}$ 的准确性主要取决于分级器的切割效率曲线,而切割效率曲线的受分级器设计结构和收集板上的收集介质影响。不同的设计结构导致的颗粒物损失不一样,进而影响切割效率曲线的形状。收集板上的收集介质主要作用是将撞在其上的颗粒物黏附下来,不再进入气流中,也就是将颗粒物的动能耗散掉,保证颗粒物不反弹。图 3 给出了不同介质下 Johnas II 型撞击器的 $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 切割效率曲线。从中可看出在收集板上涂阿皮松脂 (Apiezon Grease) 的收集效果要比石英膜的好,因为脂对颗粒物的黏附能力更好。无论是 $\text{PM}_{2.5}$ 还是 PM_{10} ,石英膜的收集效果都不理想,这与 Johnas II 型撞击器流量较大有关,在常温下其流量约 $40 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$,颗粒物反弹和已捕集颗粒物的再悬浮比较严重。若按斯托克斯公式将采样流量调小,则切割效果会更好。若收集板涂阿皮松脂,虽然改善了切割效果,但如在称重后对采集的颗粒物进行后续化学分析,脂将会产生干扰 [9]。

我国规定固定源采样孔内径不小于 80 mm ,通常固定源采样口内径即为该值。Johnas II 型惯性撞击分级器最大直径约为 70 mm ,长度约为 350 mm ,适合我国固定源采样孔尺寸,可直接伸入烟道中进行采样。但由于存在颗粒物反弹和再悬浮的缺点,

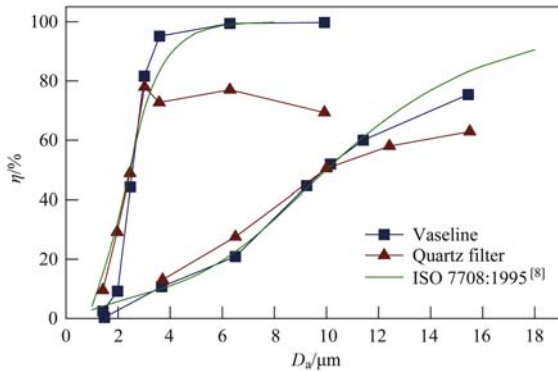


图3 不同收集介质下 Johnas II 撞击分级器的 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 切割效率曲线^[6]

Fig. 3 $PM_{2.5}$ and PM_{10} collection efficiencies of Johnas II impactor using different collecting medias

不适合采集高浓度烟尘。此外,高浓度烟尘也容易导致收集板过载,从而影响切割效率曲线。而我国相当一部分的固定源烟尘排放浓度较高($>100 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$),因此有必要开发适用于我国国情的 $PM_{2.5}$ 惯性撞击分级器。目前,用于国内固定源采样的惯性撞击器多为粒径分级更多的分级器,如 WY-八级分级采样器、十三级的低压荷电撞击器(ELPI)和八级的 Andersen 惯性分级采样器^[10,11],这些多级分级器操作复杂,且为烟道外采样,多为科学研究使用。

1.2 虚拟惯性撞击分级采样法(virtual impactor)

如图4所示,虚拟惯性撞击分级采样法的原理类似于惯性分级采样法,即利用不同粒径颗粒物的惯性不同进行分级采样。不同之处在于将传统撞击器下方的收集板替换为收口,收口中流过低速气流。虚拟惯性撞击分级器由上下同轴的两个喷嘴构成,下喷嘴因为收集大粒径颗粒物称为收口。当气流进入喷嘴后被加速,高速的气流然后一分为二,大部分气流 90° 变向,小部分气流则进入收口,两部分气流分别被称为主流和次流。小粒径的颗粒物惯性小,即斯托克斯数小,跟随气流一起运动;而大粒径的颗粒物惯性大,即斯托克斯数大,脱离主流,随着次流进入收口被收集。同样,如果某一粒径的颗粒物 50% 随主流进入下游,另外 50% 随次流进入收口,则称该粒径为切割粒径(D_{p50}),对应的斯托克斯数记为 Stk_{50} 。如此,粒径小于 D_{p50} 的颗粒物将主要随主流进入下游,粒径大于 D_{p50} 颗粒物将主要随次流被捕集到收口中,从而实现对烟气中颗粒物的分级。虚拟撞击器主要的几何参数包括喷嘴直径 D_0 、收口直径 D_1 、喷嘴距收口的距离 S 、喷嘴长度 L 、收

口顶端圆角 R 与喷嘴与收口同轴度 δ 。

2012 年国际标准化组织提出了利用虚拟惯性撞击原理采集烟气中 $PM_{10}/PM_{2.5}$ 的标准方法(ISO 13271:2012)^[12],该标准是以 Masashi 等^[13]设计的虚拟撞击分级器为原型提出的。如图5所示,该方法将烟气颗粒物分为 $D_a > 10 \mu\text{m}$ 、 $2.5 \mu\text{m} < D_a \leq 10 \mu\text{m}$ 和 $D_a \leq 2.5 \mu\text{m}$ 3 级,分级后的颗粒物被收集到滤膜上,然后用称重方式确定各级滤膜上颗粒物的重量。标准详细规定了虚拟撞击器几何参数的取值范围以及规范的操作流程。标准的使用范围如下:①由于不存在大颗粒物反弹和再悬浮问题,所以虚拟撞击器适合采集含有高浓度颗粒物的烟气,可高达 $200 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$;②最高烟气温度为 250°C ,这取决于采样器密封材料的耐受温度;③烟气温度高于露点温度,否则水蒸汽的凝结将改变颗粒物的空气动力学行为。

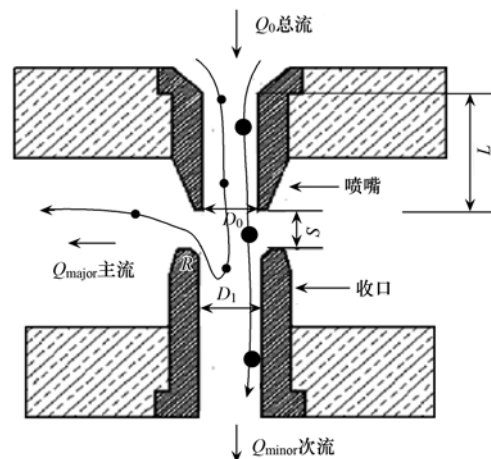


图4 虚拟撞击分级器原理示意

Fig. 4 Schematics of virtual impactor

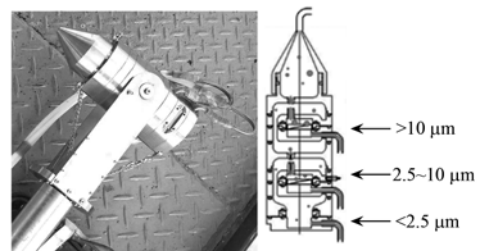


图5 Masashi 虚拟撞击分级器示意^[13]

Fig. 5 Schematics of the virtual impactor designed by Masashi

虚拟撞击分级器的切割效果取决于其几何参数和主流与次流的比值;主流与次流的比值决定了切割效率曲线的陡峭程度^[14];而几何参数决定了颗粒物的损失,如果损失严重,会进而影响到切割效率曲线。图6为虚拟撞击分级器切割效率曲线,与普

通撞击器切割效率曲线不同的是在小粒径范围内收集效率趋近于次流与总流的比值,该现象称为小粒子污染现象,是由于小粒径颗粒物按次流与主流的比例随次流进入下游所致,但因小颗粒物所占质量较小,其对计算 $PM_{2.5}$ 质量浓度的影响可忽略不计. 此外,虚拟撞击器的损失主要集中在切割点附近,实际损失主要发生在收口顶端,合理设计收口顶端的几何参数可使损失降到 5% 以下^[15].

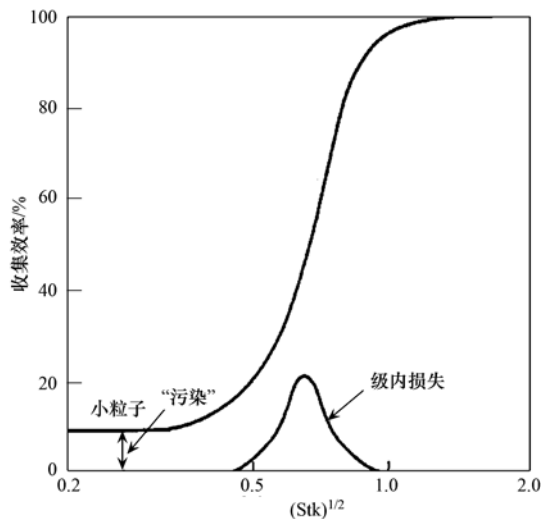


图 6 虚拟撞击分级器切割效率曲线

Fig. 6 Collection efficiency of virtual impactor

Masashi 等^[13]设计的虚拟撞击分级器的直径约为 72 mm,长度约为 248 mm. 如加上虚拟撞击器的固定装置,其直径将大于我国固定源烟气采样口 80 mm,导致其不能直接伸入烟道中进行采集,只能在烟道外使用延长的鹅脖管采样,这将增加颗粒物的损失. 相比于传统的撞击器,虚拟撞击器多了两路流量,增加了操作的复杂性. 虚拟撞击分级器的优点是不仅适用于低浓度烟尘采样,还适用于高浓度烟尘的采样,当选择合适的主流与次流比值,可使虚拟撞击器的切割效率符合 ISO 7708:1995 规定的

PM_{10} 与 $PM_{2.5}$ 切割效率要求^[8]. 因此如根据斯托克斯公式自行设计尺寸较小的虚拟撞击分级器,并选择适当的流量控制装置,则该方法可用于我国固定源 $PM_{2.5}$ 的采样.

1.3 旋风分级采样法

旋风分级采样法是迫使气流做旋转运动产生离心力对不同粒径的颗粒物进行分级的方法. 大粒径颗粒物所受离心力大,脱离气流沉积在分级器壁面上,小粒径颗粒物所受离心力小跟随气流流出分级器. Smith 等^[16]最初设计了五级旋风分级采样器,后采用了其中第一级与第四级用于固定源 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 采样,美国环保署 (US EPA) 将这种双级旋风采样方法规定为固定源 $PM_{2.5}$ 采样标准方法,即 USEPA 方法 201A^[5]. 如图 7 所示,第一级 PM_{10} 旋风采样器用来分割粒径大于 $10\ \mu m$ 的颗粒物,该级旋风与普通旋风气流路径不同,气流经顶端气流反向帽阻挡后从灰斗方向流向第二级 $PM_{2.5}$ 旋风采样器. $PM_{2.5}$ 旋风采样器与普通旋风气流路径一样,用来分割粒径大于 $2.5\ \mu m$ 的颗粒物. 二者之间有一段连接弯管. 粒径小于 $2.5\ \mu m$ 的颗粒物随气流从第二级旋风出气口流出,被后置滤膜捕集下来. 采样完成后用丙酮冲洗 PM_{10} 旋风的灰斗及锥体表面,后将冲洗液中丙酮蒸发,残留物则为 $D_a > 10\ \mu m$ 的颗粒物;同样地用丙酮清洗 $PM_{2.5}$ 旋风灰斗、锥体和二者之间的连接管,将丙酮蒸干后残留物为 $2.5\ \mu m < D_a \leq 10\ \mu m$ 的颗粒物; $PM_{2.5}$ 旋风出气口管路残留物以及后置滤膜上颗粒物为 $D_a \leq 2.5\ \mu m$ 颗粒物. 在采样过程中直接将 PM_{10} 与 $PM_{2.5}$ 旋风以及后置滤膜伸入烟道中进行采样,这样可采集烟气中可捕集 $PM_{2.5}$.

由于旋风分级器的集尘表面积远大于撞击分级器收集板的表面积,所以不容易过载,可用于收集半小时平均值在 $50\ mg \cdot m^{-3}$ 以上的高浓度烟尘. 适用



图 7 双级旋风采样器示意^[16]

Fig. 7 Schematics of the two-stage cyclone sampler

温度同样取决于密封材料,一般不超过 250℃. 对于烟气温度低于露点温度的高湿烟气,该方法同样不适用.

如图 8 所示,旋风分级器对于 $PM_{2.5}$ 有很好的切割效果,影响切割效率曲线的主要因素为在采样过程中和后续丙酮清洗过程的颗粒物损失. 现有商业化的 PM_{10} 旋风采样器最大直径约为 150 mm, $PM_{2.5}$ 旋风采样器最大直径约为 100 mm,而我国固定源采样孔内径为 80 mm,所以上述采样器不能伸入烟道中进行采样,只能在烟道外使用延长的鹅脖管采样,这将不可避免地导致颗粒物损失. 此外需要对采样器加热保温,将额外增加操作的复杂性. 旋风分级采样法应用最大的限制在于采样完成后需要用丙酮清洗整个采样器,然后蒸干冲洗液中丙酮并称量,整个过程较为繁琐,不利用环境管理和监测部门使用.

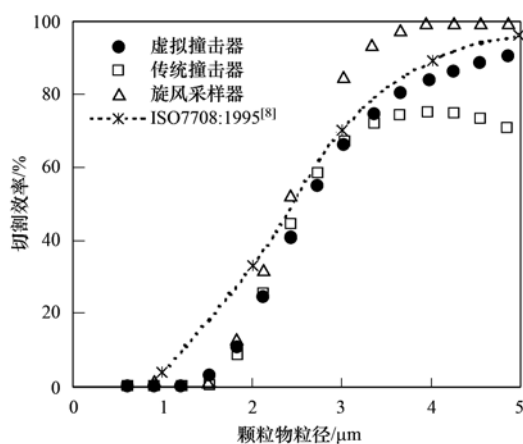


图 8 $PM_{2.5}$ 旋风分级采样器切割效率曲线^[13]

Fig. 8 Collection efficiency of $PM_{2.5}$ cyclone sampler

为了能采集可凝结颗粒物 (condensable particulate matter), US EPA 提出了方法 202^[5], 是在 201A 方法的基础上增加了冷凝管, 即在后置滤膜后增加了冷凝器、两个空吸收瓶和一个可凝结颗粒物的滤膜, 这些装置的温度都控制在 20 ~ 30℃, 从后置滤膜流出的烟气被冷却降温, 可凝结蒸气经成核形成颗粒物, 即可凝结颗粒物, 然后被收集在空吸收瓶中和滤膜上. 采样完成后用 N_2 吹洗空吸收瓶, 去除溶解的 SO_2 . 吹气完成后, 超声清洗采样管路如延长管路、冷凝器、空吸收瓶、膜夹和滤膜. 先用水超声提取无机组分, 再用正己烷超声提取有机组分, 然后干燥, 残留的部分进行称重. 提取的组分和残留的部分之和即为可凝结颗粒物.

方法 202 测量可凝结颗粒物, 而非可凝结 $PM_{2.5}$ 相对于固定源实际排放过程, 该方法将高估可凝结

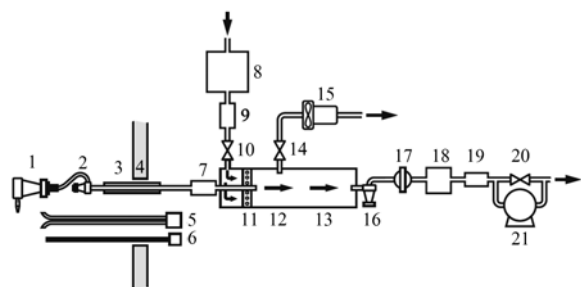
颗粒物, 因为高温烟气排放进入大气环境后稀释和降温同时发生, 而该方法将去除颗粒物的高温气体未经稀释直接冷凝, 可凝结蒸气的浓度将远高于真实排放过程稀释降温所对应的浓度. 此外方法 202 中 N_2 吹扫并不能完全去除 SO_2 等酸性气体的干扰^[17,18], 也会导致正偏差. 该方法在冷凝前去除了烟气温度下的可捕集 $PM_{2.5}$, 这也同固定源高温烟气排入大气环境后的过程有所不同.

2 固定源 $PM_{2.5}$ 稀释采样方法

稀释采样法的原理是通过一段采样管将高温烟气从烟道中引出, 然后再与不含颗粒物的洁净空气混合, 经稀释降温后烟气温度接近大气环境温度, 最后用常规大气颗粒物的采样方法进行测定. 该方法是一种基于大气环境的采样方法, 模拟了高温烟气从排气口出来与实际大气的混合过程, 是最接近固定源排放颗粒物在大气环境中真实状态的方法. 经稀释后采集的 $PM_{2.5}$ 既包括可捕集 $PM_{2.5}$, 也包括可凝结 $PM_{2.5}$, 因此稀释采样方法被认为是更准确的固定源 $PM_{2.5}$ 采样方法^[19~23], 其结果比直接采样法测得的可捕集 $PM_{2.5}$ 的质量浓度高. 由于以下一些优点, 稀释采样方法深受研究人员的青睐: ①目前稀释采样方法已经成为机动车排放因子测定的标准方法; ②稀释采样法颗粒物测定条件与烟羽条件相似, 可用于颗粒物源解析及其健康影响评价; ③避免了直接采样方法所遇到的高温、高湿和高污染物浓度等问题, 所以检测手段多样化; ④可使用常规大气颗粒物采样方法进行采样; ⑤可用大气颗粒物在线分析技术分析颗粒物物理化学特征, 方便建立源指纹特征; ⑥简化了可凝结颗粒物的分析过程.

稀释采样方法的主要装置称为稀释通道, 是该方法最关键的部分. 稀释通道主要的参数包括稀释比、停留时间和混合段雷诺数. 稀释通道原理相对简单, 各国学者根据需要设计了各种各样的稀释通道, 有正压稀释, 也有负压稀释^[24~27]. 为了保证烟气与稀释气充分混合, 稀释通道多采用湍流混合方式. 稀释过程是挥发和半挥发物质与颗粒物以及颗粒物与颗粒物相互作用的动力学过程, 包括成核、凝结和聚并, 须有足够的停留时间才能保证颗粒物粒径分布达到稳定^[28]. 经过多年的探索, 2013 年国际标准化组织提出了稀释采样法的标准 (ISO 25597:2013)^[29], 该标准是以 England 等^[30,31] 设计的便携式稀释通道为原型提出的. 如图 9 所示, 该方法利用 PM_{10} - $PM_{2.5}$ 两级旋风采样器去除烟气中空

气动力学直径大于 $2.5\ \mu\text{m}$ 的颗粒物,然后稀释冷凝,之后用一个旋风采样器去除 $D_a > 2.5\ \mu\text{m}$ 的颗粒物,然后用滤膜采集 $\text{PM}_{2.5}$,最后称重. 该标准详细地规定了稀释通道的参数:稀释比应大于等于 20:1,停留时间应不小于 10 s,稀释后滤膜处的温度小于等于 42°C (Teflon 滤膜),相对湿度小于 70%.



1. PM_{10} cyclone; 2. $\text{PM}_{2.5}$ cyclone; 3. 加热采样管; 4. 采样口;
5. 皮托管; 6. 温度传感器; 7. 流量计; 8. 清洁空气发生器;
9. 流量计; 10. 调节阀; 11. 布气孔板; 12. 混合室; 13. 停留室;
14. 旁路阀; 15. 大流量风机; 16. $\text{PM}_{2.5}$ cyclone; 17. 滤膜;
18. 冷凝水装置; 19. 流量计; 20. 调节阀; 21. 采样泵

图9 稀释采样法采集 $\text{PM}_{2.5}$ 的示意^[29]

Fig. 9 Schematics of $\text{PM}_{2.5}$ dilution sampling

由于目前的稀释采样系统比较复杂和庞大,而许多固定源采样现场空间狭小,加之稀释采样系统操作繁琐,在一定程度上限制了其大范围的推广. 早期的稀释采样系统稀释后的气体在停留室的停留时间一般在 80 s,新的 ISO 25597 规定了停留时间应不小于 10 s,将会大大降低停留室的尺寸,有利于其现场应用. 此外,稀释采样法属于烟道外采样,需要一段管路将烟气引出,这将导致颗粒物的损失,主要的损失机制为重力沉降、惯性碰撞、扩散损失、静电损失和热泳力损失. 为减少颗粒物损失,采样管路应尽可能短,尽量避免使用弯管. 在一定的流量下采样管的直径应介于不发生重力沉降的最大直径与不发生惯性碰撞损失的最小直径之间,例如 USEPA 旋风采样器流量约为 $10.65\ \text{L}\cdot\text{min}^{-1}$,采样管路直径应在 10 ~ 13 mm 之间^[29],管路为金属材质(例如不锈钢管)以避免静电损失,采样管的加热温度略高于烟气温度. 近年来,清华大学、北京大学、南开大学和北京航空航天大学等国内单位已搭建了稀释采样系统并用于科学研究,且积累了一些排放源的排放因子数据,目前这些稀释系统已经从最初的庞大笨重变为可便携^[27,32~34]. 因为稀释采样法测量的 $\text{PM}_{2.5}$ 更能代表其在大气环境中的真实状态,包括了可捕集 $\text{PM}_{2.5}$ 和可凝结 $\text{PM}_{2.5}$,能更准确

评估固定源排放的 $\text{PM}_{2.5}$ 对大气环境质量以及人体健康的影响,因此建议我国建立测定固定源总 $\text{PM}_{2.5}$ 排放的稀释采样法标准,规定合适的稀释比、停留时间、最终稀释温度和相对湿度等参数.

3 结论

(1)直接采样法简单,采样器便携,适合环境管理和监测部门使用. 建议我国建立基于虚拟惯性撞击原理的直接采样法标准,并开发适于我国固定源烟尘排放浓度的虚拟撞击采样器,用于采集可捕集 $\text{PM}_{2.5}$.

(2)稀释采样法结果更能代表固定源排放的 $\text{PM}_{2.5}$ 在实际大气中的真实状态,利于大气环境质量和健康效应评估,建议我国建立固定源 $\text{PM}_{2.5}$ 稀释采样法标准,用于采集包括可捕集和可凝结的 $\text{PM}_{2.5}$.

(3)随着烟气颗粒物分级采样的进展,我国固定源采样孔内径(80 mm)的规定已经限制了部分分级采样器的使用;建议针对现有的固定源采样孔尺寸,设计尺寸较小的采样器以实现烟道内采样;对于新建和改扩建的固定源,应将采样孔内径设计为不小于 150 mm.

参考文献:

- [1] 贺克斌, 杨复沫, 段凤魁, 等. 大气颗粒物与区域复合污染 [M]. 北京: 科学出版社, 2011. 139-306.
- [2] GB 3095-2012, 环境空气质量标准[S]. 2012.
- [3] Lei Y, Zhang Q, He K B, et al. Primary anthropogenic aerosol emission trends for China, 1990- 2005 [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2011, 11(3): 931-954.
- [4] GB 16157-1996, 固定污染源排气中颗粒物测定与气态污染物采样方法[S]. 1996.
- [5] USEPA Method 201a and 202, Methods for measurement of filterable PM_{10} and $\text{PM}_{2.5}$ and measurement of condensable particulate matter emissions from stationary sources[S]. 2010.
- [6] ISO 23210: 2009, Stationary source emissions-Determination of $\text{PM}_{10}/\text{PM}_{2.5}$ mass concentration in flue gas --Measurement at low concentrations by use of impactors[S]. 2009.
- [7] John A C, Kuhlbusch T A J, Fissan H, et al. Development of a $\text{PM}_{10}/\text{PM}_{2.5}$ cascade impactor and in-stack measurements[J]. Aerosol Science and Technology, 2003, 37(9): 694-702.
- [8] ISO 7708: 1995, Air quality -Particle size fraction definitions for health-related sampling [S]. 1995.
- [9] Parve T, Loosaar J, Mahhov M, et al. Emission of fine particulates from oil shale fired large boilers [J]. Oil Shale, 2011, 28(1S): 152-161.
- [10] 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): 17-24.
- [11] 原永涛, 魏玉珍, 张滨渭, 等. 多级冲击采样器用于发电厂烟道飞灰采样的探讨[J]. 热力发电, 2012, 39(5): 77-81.

- [12] ISO 13271: 2012, Stationary source emissions-Determination of $PM_{10}/PM_{2.5}$ mass concentration in flue gas -Measurement at higher concentrations by use of virtual impactors[S]. 2012.
- [13] Wada M, Tsukada M, Kondo A, *et al.* Separation characteristics of a multi-stage VIS impactor for $PM_{10}/PM_{2.5}$ mass concentration measurement in a stack of a stationary source [J]. Journal of the Society of Powder Technology, Japan, 2009, **46**(6): 467-475.
- [14] Marple V A, Chien C M. Virtual impactors: A theoretical study [J]. Environmental Science and Technology, 1980, **14**(8): 976-984.
- [15] Loo B W, Cork C P. Development of high efficiency virtual impactors [J]. Aerosol Science and Technology, 1988, **9**(3): 167-176.
- [16] Smith W B, Wilson R R Jr, Harris D B. A five-stage cyclone system for in situ sampling [J]. Environmental Science & Technology, 1979, **13**(11): 1387-1392.
- [17] England G C, Zielinska B, Loos K, *et al.* Characterizing $PM_{2.5}$ emission profiles for stationary sources: comparison of traditional and dilution sampling techniques [J]. Fuel Processing Technology, 2000, **65-66**: 177-188.
- [18] Corio L A, Sherwell J. In-stack condensible particulate matter measurements[J]. Journal of the Air & Waste Management Association, 2000, **50**(2): 207-218.
- [19] Wien S, England G, Loos K, *et al.* $PM_{2.5}$ Speciation profiles and emission factors from petroleum industry gas-fired sources [A]. In: International emission inventory conference, "one atmosphere, one inventory, many challenges[C]. Denver, CO, 2001. 1-13.
- [20] Lipsky E M, Pekney N J, Walbert G F, *et al.* Effects of dilution sampling on fine particle emissions from pulverized coal combustion[J]. Aerosol Science and Technology, 2004, **38**(6): 574-587.
- [21] Lipsky E M, Robinson A L. Effects of dilution on fine particle mass and partitioning of semi-volatile organics in diesel exhaust and wood smoke [J]. Environmental Science & Technology, 2006, **40**(1): 155-162.
- [22] Kim D S, Hopke P K, Casuccio G S, *et al.* Comparison of particles taken from the ESP and plume of a coal-Fired power-plant with background aerosol-particles [J]. Atmospheric Environment, 1989, **23**(1): 81-84.
- [23] Lee S W, He I, Young B. Important aspects in source $PM_{2.5}$ emissions measurement and characterization from stationary combustion systems[J]. Fuel Processing Technology, 2004, **85**(6): 687-699.
- [24] Niemelä V, Lamminen E, Laitinen A. A novel method for particle sampling and size-classified electrical charge measurement at power plant environment [A]. In: 11th International Conference on Electrostatic Precipitation, Hangzhou: Zhejiang University Press, 2008. 228-233.
- [25] Hildemann L M, Cass G R, Markowski G R. A dilution stack sampler for collection of organic aerosol emissions: Design, characterization and field tests [J]. Aerosol Science and Technology, 1989, **10**(1): 193-204.
- [26] Li X H, Wang S X, Duan L, *et al.* Design of a compact dilution sampler for stationary combustion sources [J]. Journal of the Air & Waste Management Association, 2011, **61**(11): 1124-1130.
- [27] Lee S W, Herage T, Dureau R, *et al.* Measurement of $PM_{2.5}$ and ultra-fine particulate emissions from coal-fired utility boilers [J]. Fuel, 2013, **108**: 60-66.
- [28] Lipsky E, Stanier C O, Pandis S N, *et al.* Effects of sampling conditions on the size distribution of fine Particulate matter emitted from a pilot-scale pulverized-coal combustor [J]. Energy Fuels, 2002, **16**(2): 302-310.
- [29] ISO 25597: 2013, Stationary source emissions-test method for determining $PM_{2.5}$ and PM_{10} mass in stack gases using cyclone samplers and sample dilution [S]. 2013.
- [30] England G C, Watson J G, Chow J C, *et al.* Dilution-based emissions sampling from stationary sources: Part 1-compact sampler methodology and performance [J]. Journal of the Air & Waste Management Association, 2007, **57**(1): 65-78.
- [31] England G C, Watson J G, Chow J C, *et al.* Dilution-based emissions sampling from stationary sources: Part 2-gas-fired combustors compared with other fuel-fired systems [J]. Journal of the Air & Waste Management Association, 2007, **57**(1): 79-93.
- [32] 周楠, 曾立民, 于雪娜, 等. 固定源稀释通道的设计和外墙测试研究[J]. 环境科学学报, 2006, **26**(5): 764-772.
- [33] 李兴华, 段雷, 郝吉明, 等. 固定燃烧源颗粒物稀释采样系统的研制与应用[J]. 环境科学学报, 2008, **28**(3): 458-463.
- [34] 孔少飞, 白志鹏, 陆炳, 等. 固定源排放颗粒物采样方法的研究进展[J]. 环境科学与技术, 2011, **34**(12): 88-94.

CONTENTS

Emission Factors and PM Chemical Composition Study of Biomass Burning in the Yangtze River Delta Region	TANG Xi-bin, HUANG Cheng, LOU Sheng-rong, <i>et al.</i> (1623)
Size Distributions and Source Apportionment of Soluble Ions in Aerosol in Nanjing	XUE Guo-qiang, ZHU Bin, WANG Hong-lei (1633)
Characteristics of Particulate Matters and Its Chemical Compositions During the Dust Episodes in Shanghai in Spring, 2011	LI Gui-ling, ZHOU Min, CHEN Chang-hong, <i>et al.</i> (1644)
Numerical Modeling Analysis of Secondary Organic Aerosol (SOA) Combined with the Ground-based Measurements in the Pearl River Delta Region	GUO Xiao-shuang, SITU Shu-ping, WANG Xue-mei, <i>et al.</i> (1654)
Observation of a Photochemical Event in Jiaying During Summer 2013	SHEN Li-juan, LI Li, LÜ Sheng, <i>et al.</i> (1662)
Spatial and Temporal Variations of Near Surface Atmospheric CO ₂ with Mobile Measurements in Fall and Spring in Xiamen, China	LI Yan-li, XING Zhen-yu, MU Chao, <i>et al.</i> (1671)
Isotope Compositions of Elemental Carbon in the Smoke and Ash from Crop Straw Combustion	LIU Gang, LI Jiu-hai, XU Hui, <i>et al.</i> (1680)
Development of a Chemical Ionization Time-of-Flight Mass Spectrometer for Continuous Measurements of Atmospheric Hydroxyl Radical	DOU Jian, HUA Lei, HOU Ke-yong, <i>et al.</i> (1688)
Residual Levels of Acetochlor in Source Water and Drinking Water of China's Major Cities	YU Zhi-yong, JIN Fen, LI Hong-yan, <i>et al.</i> (1694)
Vertical Distribution of Water Quality and Its Influence on Underwater Light Field in Lake Chaohu	MA Meng-xiao, ZHANG Yu-chao, QIAN Xin, <i>et al.</i> (1698)
Correlation Between Aquatic Plant Diversity and Water Environment in the Typical Sites of Hangzhou Section of the Beijing-Hangzhou Grand Canal	LU Yin, XU Xiao-lu, ZHANG De-yong, <i>et al.</i> (1708)
Nitrogen and Phosphate Pollution Characteristics and Eutrophication Evaluation for Typical Urban Landscape Waters in Hefei City	LI Ru-zhong, LIU Ke-feng, QIAN Jing, <i>et al.</i> (1718)
Distribution of Nitrogen and Phosphorus in the Sediments and Estimation of the Nutrients Fluxes in Longjing Lake, Chongqing City, During the Initial Impoundment Period	PAN Yan-an, LEI Pei, ZHANG Hong, <i>et al.</i> (1727)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Organochlorine Pesticides (OCPs) in the Water of Lake Qiandao and Its Major Input Rivers	TANG Fang-liang, ZHANG Ming, XU Jian-fen, <i>et al.</i> (1735)
Distribution of Potential Pathogenic Bacteria in the Jiulong River Watershed	HOU Li-yuan, HU An-yi, MA Ying, <i>et al.</i> (1742)
Influence of the River-lake Relation Change on the Distribution of Heavy Metal and Ecological Risk Assessment in the Surface Sediment of Poyang Lake	LIU Wan-qing, NI Zhao-kui, WU Zhi-qiang, <i>et al.</i> (1750)
Spatiotemporal Variation Characteristics of Heavy Metals Pollution in the Water, Soil and Sediments Environment of the Lean River-Poyang Lake Wetland	JIAN Min-fei, LI Ling-yu, XU Peng-fei, <i>et al.</i> (1759)
Dissolved Organic Matter (DOM) Dynamics in Karst Aquifer Systems	YAO Xin, ZOU Sheng-zhang, XIA Ri-yuan, <i>et al.</i> (1766)
Sensitivity Analysis of AnnAGNPS Model's Hydrology and Water Quality Parameters Based on the Perturbation Analysis Method	XI Qing, LI Zhao-lu, LUO Chuan (1773)
Movement Characteristics of <i>Cyanobacteria</i> Under Stress of Water-Lifting Aeration	SUN Xiu-xiu, CONG Hai-bing, GAO Zheng-juan, <i>et al.</i> (1781)
Influence of Light Wavelength and Intensity on the Reduction of Divalent Mercury in Aquatic System	LI Xi-jia, ZHONG Zi-xuan, SUN Rong-guo, <i>et al.</i> (1788)
Dynamic Effects of Commonly Co-Existing Anions on the Removal of Selenite from Groundwater by Nanoscale Zero-Valent Iron	YANG Wen-jun, GUO Ying-qing, DU Er-deng (1793)
BiOBr Promoted the Photocatalytic Degradation of Beta-cypermethrin Under Visible Light	PENG Yi-zhu, ZHAO Xiao-rong, JIA Man-ke, <i>et al.</i> (1798)
Adsorption of Methylene Blue from Aqueous Solution onto Magnetic Fe ₃ O ₄ /Graphene Oxide Nanoparticles	CHANG Qing, JIANG Guo-dong, HU Meng-xuan, <i>et al.</i> (1804)
Selection of Electrochemical Anodic Materials for PFOA Degradation and Its Mechanism	ZHUO Qiong-fang, DENG Shu-bo, XU Zhen-cheng, <i>et al.</i> (1810)
Occurrence and Fate of Typical Antibiotics in a Wastewater Treatment Plant in Southwest China	GAN Xiu-mei, YAN Qing, GAO Xu, <i>et al.</i> (1817)
Effects and Mechanism on Removing Organics and Reduction of Membrane Fouling Using Granular Macro-Porous Anion Exchange Resin in Drinking Water Treatment	HE Huan, DONG Bing-zhi, XU Guang-hong, <i>et al.</i> (1824)
Research on Treatment of High Salt Wastewater by the Graphite and Activated Carbon Fiber Composite Electrodes	ZHOU Gui-zhong, WANG Zhao-feng, WANG Xuan, <i>et al.</i> (1832)
Preparation and Application of the Quinonyl Chloromethylation Polystyrene in Biological Treatment of Wastewater	ZHANG Hua-yu, XU Qing, NIU Chun-mei, <i>et al.</i> (1838)
Enhanced Electro-Catalytic Oxidation of Dye Wastewater with FeMo ₁₂ Adopted Catalyst	WANG Li, YUE Lin, GUO Jian-bo, <i>et al.</i> (1843)
Formation and Characterization of Aerobic Granules in a Pilot-scale Reactor for Real Wastewater Treatment	YANG Shu-fang, ZHANG Jian-jun, ZOU Gao-long, <i>et al.</i> (1850)
Research on Cultivation of Aerobic Granular Sludge and Its Characteristics in Sequencing Fed Batch Reactor	LONG Bei, YANG Chang-zhu, PU Wen-hong, <i>et al.</i> (1857)
Effect of Different Volume Loading of Aerobic/Anaerobic Zone on Nitrogen and Phosphorus Removal by Biofilm and Granular Sludge Coupling Process	YIN Hang, LIU Chang, GAO Hui, <i>et al.</i> (1866)
Adsorption of Cu ²⁺ by Xanthate-Functionalized Waste Sludge	CEN Yan, QUAN Xiang-chun, JIANG Xiao-man (1871)
Mechanisms of Copper Uptake by Submerged Plant <i>Hydrilla verticillata</i> (L. f.) Royle and <i>Myriophyllum spicatum</i> L.	XUE Pei-ying, LI Guo-xin, ZHAO Quan-li (1878)
Properties of Maize Stalk Biochar Produced Under Different Pyrolysis Temperatures and Its Sorption Capability to Naphthalene	HUANG Hua, WANG Ya-xiong, TANG Jing-chun, <i>et al.</i> (1884)
Beijing Common Green Tree Leaves' Accumulation Capacity for Heavy Metals	LI Shao-ming, KONG Ling-wei, LU Shao-wei, <i>et al.</i> (1891)
Assessment of Heavy Metal Contamination by Moss-bag Method and Road-dust Method for Taizhou Urban Area	CHEN Qin, FANG Yan-ming, YAN Yun, <i>et al.</i> (1901)
Effect of Grazing on the Temperature Sensitivity of Soil Respiration in Hulunber Meadow Steppe	WANG Xu, YAN Rui-rui, DENG Yu, <i>et al.</i> (1909)
Variation Characteristic in Soil Respiration of Apple Orchard and Its Biotic and Abiotic Influencing Factors	WANG Rui, GUO Sheng-li, LIU Qing-fang, <i>et al.</i> (1915)
Influencing Factors of Mercury Emission Flux from Forest Soil at Tieshanping, Chongqing	WANG Qiong, LUO Yao, DU Bao-yu, <i>et al.</i> (1922)
Characteristics of Arsenic Content in the Livestock Farms' Surrounding Environment in Shanghai Suburbs	XI Gong-fang, ZHOU Shou-biao, DING Hai-cheng, <i>et al.</i> (1928)
Input and Distribution of Rice Photosynthesized Carbon in the Tillering Stage Under Different Nitrogen Application Following Continuous ¹³ C Labeling	TAN Li-min, WU Hao, LI Hui, <i>et al.</i> (1933)
Simulation Study on the Effect of Salinity on the Adsorption Behavior of Mercury in Wastewater-Irrigated Area	ZHENG Shun-an, LI Xiao-hua, XU Zhi-yu (1939)
Leaching Behavior of Pb, Cd and Zn from Soil Stabilized by Lime Stabilized Sludge	LI Xiang, SONG Yun, LIU Yong-bing (1946)
Levels and Distribution of Short Chain Chlorinated Paraffins in Seaford from Dalian, China	YU Jun-chao, WANG Thanh, WANG Ya-wei, <i>et al.</i> (1955)
Application of Biotic Ligand Model for the Acute Toxicity of Copper to <i>Daphnia magna</i> in Water of Liaohe River and Taihu Lake	ZHOU Teng-yao, CAO ying, QIN Lu-mei, <i>et al.</i> (1962)
Phytotoxicity of Copper Oxide Nanoparticles to Metabolic Activity in the Roots of Rice	WANG Shu-ling, ZHANG Yu-xi, LIU Han-zhu, <i>et al.</i> (1968)
Enhancing Effect of Tween 80 on Degradation of Triphenyltin by <i>Bacillus thuringiensis</i>	HUANG Jie, YE Jin-shao, YIN Hua, <i>et al.</i> (1974)
Long-term Performance of Microbial Fuel Cell Using Manure as Substrate	JIAO Yan, ZHANG Guo-dong, ZHAO Qing-liang (1981)
Influence of Goethite on Anaerobic Fermentation of Organic Fraction of Municipal Solid Waste (OFMSW)	YANG Lu-lu, YUE Zheng-bo, CHEN Tian-hu, <i>et al.</i> (1988)
Pollutants Produced in Municipal Refuse Container During Transfer Process	WANG Xiao-yuan, LIU Yin-hua, WANG Fei, <i>et al.</i> (1994)
Selective Catalytic Oxidation of H ₂ S over Supported Fe Catalysts on CeO ₂ -Intercalated Laponite Clay	SUN Chao, ZHANG Xin, HAO Zheng-ping, <i>et al.</i> (2002)
Preparation by Different Methods and Characterization of Desulfurization Mixed Oxides Derived from Hydrotalcites	ZHU Chun-lei, WANG Hai-lin, SUN Chun-bao (2010)
Sampling Methods for PM _{2.5} from Stationary Sources: a Review	JIANG Jing-kun, DENG Jian-guo, LI Zhen, <i>et al.</i> (2018)
A Research Overview of Methanogens	LI Yu-shan, LI Yao-ming, OUYANG Zhi-yun (2025)

《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5月15日 35卷 第5期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 5 May 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