

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第9期

Vol.35 No.9

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

长江三角洲地区霾判别方法的对比分析 刘晓慧,朱彬,高晋徽,张恩红,王红磊,陈焯鑫,王姝 (3239)

1980~2012年江苏省城市霾日的时空分布及成因分析 刘端阳,魏建苏,严文莲,吕军,孙燕 (3247)

瓦里关大气二氧化碳和甲烷时间变化特征 刘鹏,张国庆,王剑琼,吴昊,李宝鑫,王宁章 (3256)

上海城区PM_{2.5}中有机碳和元素碳变化特征及来源分析 张懿华,王东方,赵倩彪,崔虎雄,李娟,段玉森,伏晴艳 (3263)

亚青会期间南京市气溶胶中OC和EC的粒径分布 王红磊,朱彬,安俊琳,段卿,邹嘉南,沈利娟 (3271)

无锡市冬季典型天气PM_{2.5}中碳组分的污染特征 云龙龙,陆钊,张天舒,伍德侠,盛世杰,陆亦怀,刘建国 (3280)

高炉炼铁工艺细颗粒物PM_{2.5}排放特性分析 范真真,赵亚丽,赵浩宁,梁兴印,孙静雯,王保贵,王亚军 (3287)

重庆市北碚城区大气中VOCs组成特征研究 祁心,郝庆菊,吉东生,张军科,刘子锐,胡波,王跃思,江长胜 (3293)

双组分VOCs的催化氧化及动力学分析 卜龙利,杨力,孙剑宇,梁欣欣,虎雪姣,孟海龙 (3302)

汽车排放超细颗粒物浓度及粒径谱特征的实验研究 陆叶强,陈秋方,孙在,蔡志良,杨文俊 (3309)

疏勒河上游地表水水化学主离子特征及其控制因素 周嘉欣,丁永建,曾国雄,吴锦奎,秦甲 (3315)

河流库区沉积物-水界面营养盐及气态氮的释放过程和通量 陈朱虹,陈能汪,吴殷琪,莫琼利,周兴鹏,鲁婷,田蕴 (3325)

大辽河感潮段及其近海河口重金属空间分布及污染评价 张雷,秦延文,马迎群,赵艳民,时瑶 (3336)

雅鲁藏布江中段表层沉积物重金属形态分布及风险评价 柏建坤,李潮流,康世昌,陈鹏飞,王建力 (3346)

北京奥林匹克公园地表颗粒物粒度特征分析 李海燕,石安邦,瞿杨晨,岳靖淋 (3352)

黄河表层沉积物中类二噁英多氯联苯水平分布 李光耀,金军,何畅,王英,马召辉,李明园 (3358)

合肥城郊典型源头溪流不同渠道形态的氮磷滞留特征 李如忠,杨继伟,钱靖,董玉红,唐文坤 (3365)

基于水资源调度的平原河网区城市河道氮迁移转化研究 刘波,盛明,朱强,杨霜,檀炳超,范冉,南旭军,何茂阳,王国祥 (3373)

杭州湾潮滩湿地植物不同分解过程及其磷素动态 邵学新,梁新强,吴明,叶小齐,蒋科毅 (3381)

基于数据同化的太湖叶绿素多模型协同反演 李渊,李云梅,吕恒,朱利,吴传庆,杜成功,王帅 (3389)

天然日光辐照下两江交汇处溶解性有机质(DOM)光漂白过程:以涪江-嘉陵江为例 高洁,江韬,闫金龙,魏世强,王定勇,卢松,李璐璐 (3397)

利用紫外-可见吸收光谱估算三峡库区消落带水体、土壤和沉积物溶解性有机质(DOM)浓度 李璐璐,江韬,卢松,闫金龙,高洁,魏世强,王定勇,郭念,赵铮 (3408)

Cu₂O-Ag-AgBr/MA可见光催化剂的制备及其降解2-氯苯酚的研究 王冉,周雪峰,胡学香,胡春 (3417)

不同粒径零价铁活化过硫酸钠氧化降解酸性橙7的影响及动力学研究 李欢旋,王金泉,马邕文,黄明智,王艳,陈杨梅 (3422)

还原脱氯-生物联合降解2,4-二氯苯氧乙酸 周红艺,曾思思,梁思,韩鉴 (3430)

多介质土壤滤层系统(MSL)与潜流式人工湿地技术处理海水养殖废水的效能比较 宋颖,黄玉婷,葛川,张浩,陈昕,张志剑,罗安程 (3436)

不同碳源在污水处理过程中的变化规律研究 金鹏康,常晋,王先宝,刘柯君,王晓昌 (3443)

气升装置对厌氧氨氧化反应器脱氮效能的影响 李祥,张大林,黄勇,陈宗炬,袁怡 (3449)

微波及其组合工艺强化污泥厌氧消化研究 刘吉宝,倪晓棠,魏源送,佟娟,王亚炜 (3455)

“热水解-高温厌氧消化”工艺处理高含固率剩余污泥的中试研究 吴静,王广启,曹知平,李中华,胡玉瑛,王凯军,左剑恶 (3461)

温度对ABR-MBR复合工艺处理生活污水的影响及其微生物群落分析 吴鹏,陆爽君,徐乐中,刘捷,沈耀良 (3466)

污水处理厂尾水细菌群落结构分析 徐爱玲,任杰,宋志文,吴等等,夏岩 (3473)

沼液养殖钝顶螺旋藻的中试研究 国青青,刘锐,罗金飞,王根荣,陈吕军,刘笑 (3480)

内源呼吸过程溶解性代谢产物的光谱特性分析 李志华,张芹,白旭丽,刘毅 (3487)

基于呼吸图谱的自养菌与异养菌内源呼吸过程分析 李志华,白旭丽,张芹,刘毅,贺春博 (3492)

S-异丙甲草胺与镉对斜生栅藻光合作用的影响 陈彩东,胡晓娜,章小强,刘惠君 (3498)

影响浑太河流域鱼类群落结构的不同尺度环境因子分析 李艳利,李艳粉,徐宗学 (3504)

河口区新建河道轮虫群落演替及与水环境的关系 马文华,张玮,顾琬雯,张瑞雷,王丽卿 (3513)

Fontibacter sp. SgZ-2厌氧腐殖质/Fe(III)还原特性及电子传递机制研究 马晨,杨贵芹,陆琴,周顺桂 (3522)

基于UNMIX模型的夹皮沟金矿区土壤重金属源解析 艾建超,王宁,杨净 (3530)

石河子市土壤环境磁学特征及空间分布研究 杨涵,熊黑钢,陈学刚 (3537)

不同施磷量(KH₂PO₄)作用对Cu、Zn在红壤中的迁移转化 郭亮,李忠武,黄斌,王艳,张艳 (3546)

硫素对水稻吸收砷的生物有效性及其在土壤中的形态影响 杨世杰,唐冰培,王代长,饶伟,张亚楠,王丹,朱云集 (3553)

硫对土壤中硒形态变化及油菜硒吸收的影响 刘新伟,段碧辉,夏全杰,矫威,郭再华,胡承孝,赵竹青 (3564)

再生水灌溉对土壤化学性质及可培养微生物的影响 龚雪,王继华,关键飞,杨雪辰,陈黛慈 (3572)

西南喀斯特山区寿竹林地土壤微生物量与酶活性在不同坡位和剖面层次的分布特征 秦华军,何丙辉,赵旋池,李源,毛文韬,曾清平 (3580)

黔中喀斯特石漠化区不同土壤类型对常见植物叶片δ¹³C值的影响 杜雪莲,王世杰,罗绪强 (3587)

碳底物含量对厌氧条件下水稻土N₂、N₂O、NO、CO₂和CH₄排放的影响 陈诺,廖婷婷,王睿,郑循华,胡荣桂, Klaus Butterbach-Bahl (3595)

北京市典型绿化灌木阻滞吸附PM_{2.5}能力研究 梁丹,王彬,王云琦,张会兰,杨松楠,李昂 (3605)

污泥焚烧过程中氯化物对Cd迁移行为的影响 刘敬勇,卓钟旭,孙水裕,罗光前,李晓明,谢武明,王玉洁,杨佐毅,赵素莹 (3612)

京津冀区域生产和消费CO₂排放的时空特点分析 汪浩,陈操操,潘涛,刘春兰,陈龙,孙莉 (3619)

水泥工业大气污染物排放控制水平确立研究 任春,江梅,邹兰,李晓倩,魏玉霞,赵国华,张国宁 (3632)

《环境科学》征稿简则(3279) 《环境科学》征订启事(3545) 信息(3364,3486,3552,3563)

北京市典型绿化灌木阻滞吸附 $PM_{2.5}$ 能力研究

梁丹, 王彬*, 王云琦, 张会兰, 杨松楠, 李昂

(北京林业大学水土保持学院, 北京 100083)

摘要: 选取北京市典型绿化灌木物种大叶黄杨、小叶黄杨、紫叶小檗、矮紫杉, 结合气室模拟与实地观测的方法, 综合测定不同树种对 $PM_{2.5}$ 的吸附能力。同时, 收集 2012 年 12 月~2013 年 5 月间北京市区 $PM_{2.5}$ 浓度值, 分析了北京市冬春季 $PM_{2.5}$ 污染特征。结果表明, 由气室实验得到的 4 种植物对 $PM_{2.5}$ 阻滞吸附能力排序为: 紫叶小檗 > 小叶黄杨 > 矮紫杉 > 大叶黄杨, 其原因主要为叶片特征差异所致; 室外测量结果表明, 4 种植物吸附能力排序为: 小叶黄杨 > 紫叶小檗 > 矮紫杉 > 大叶黄杨。气室模拟与室外实测结果均表明, 小叶黄杨和紫叶小檗具有较强的阻滞吸附 $PM_{2.5}$ 的能力; 气室模拟与室外观测实验中植物阻滞吸附 $PM_{2.5}$ 能力的大小略有差异, 其原因应与植物结构相关。同时, 通过分析北京市 $PM_{2.5}$ 浓度的季节性变化, 发现北京市冬季的 $PM_{2.5}$ 浓度值尤为高, 且常绿灌木植物仍能表现出较好的阻滞吸附 $PM_{2.5}$ 的能力。

关键词: 灌木树种; $PM_{2.5}$; 气室模拟; 样地监测; 北京冬季

中图分类号: X17 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)09-3605-07 DOI: 10.13227/j.hjkk.2014.09.049

Ability of Typical Greenery Shrubs of Beijing to Adsorb and Arrest $PM_{2.5}$

LIANG Dan, WANG Bin, WANG Yun-qi, ZHANG Hui-lan, YANG Song-nan, LI Ang

(College of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: Four typical types of green shrubs of Beijing (*Euonymus japonicus*, *Buxus microphylla*, *Berberis thunbergii* cv. *atropurpurea*, *Taxus cuspidate* cv. *nana*) were selected to study their capacities in adsorbing and arresting $PM_{2.5}$ using both field observations and air chamber simulations. Concurrently, in order to analyze the pollution characteristics of Beijing in winter and spring, the $PM_{2.5}$ concentrations of December 2012 to May 2013 were collected. Experimental results showed that: From the gas chamber experiments, the ability to adsorb and arrest $PM_{2.5}$ was in the order of *Berberis thunbergii* cv. *atropurpurea* > *Buxus microphylla* > *Taxus cuspidate* cv. *nana* > *Euonymus japonicus*, mainly due to the differences in leaf characteristics; Outside measurement results showed that the ability to adsorb and arrest $PM_{2.5}$ was ranked as *Buxus microphylla* > *Berberis thunbergii* cv. *atropurpurea* > *Taxus cuspidate* cv. *nana* > *Euonymus japonicus*. Chamber simulation and outdoor observation showed that *Buxus microphylla* and *Berberis thunbergii* cv. *atropurpurea* had strong ability to adsorb and arrest $PM_{2.5}$; Meanwhile, the slight differences between the chamber simulation and outdoor observation results might be related to plant structure. Compared to tree species, the planting condition of shrub species was loose, and it greened quickly; By analyzing the Beijing $PM_{2.5}$ concentration values in winter and spring, it was found that the $PM_{2.5}$ concentration was particularly high in the winter of Beijing, and evergreen shrubs maintained the ability to adsorb and arrest $PM_{2.5}$.

Key words: shrub species; $PM_{2.5}$; gas chamber simulation; plot monitoring; Beijing winter

$PM_{2.5}$ 是城市大气中重要的污染物之一, 它对人体健康、能见度和气候变化等方面的危害已被国内外学者证实^[1-3]。 $PM_{2.5}$ 本身有毒或者携带有毒物质, 能穿透人体呼吸道的防御结构(如鼻腔中的鼻纤毛等毛发状结构)进入人体内部, 对人体健康造成伤害^[4]。美国 EPA 进行的两项前瞻性研究结果表明, 心肺疾病死亡率的上升与大气 $PM_{2.5}$ 浓度增高有很高的相关性^[5], 短期高浓度 $PM_{2.5}$ 对人群健康有较大影响^[6]。同时, $PM_{2.5}$ 的质量浓度与能见度呈负相关关系, 高浓度的 $PM_{2.5}$ 含量会对城市交通和生活造成困扰^[7]。自工业革命以来, 人类活动产生的硫酸盐、有机物和烟尘等气溶胶不仅造成空气污染, 而且对气候变化造成影响^[8]。 $PM_{2.5}$ 等气溶胶颗粒物主要通过改变气温和降水模式来改变气候。

Fang 等^[9]的研究表明, $PM_{2.5}$ 对全球变暖有一定贡献。因此, 降低空气中 $PM_{2.5}$ 浓度对公众生活和健康有着重要意义。 $PM_{2.5}$ 很难在重力作用下沉降^[10], 它会长时间停留在大气中, 对空气造成污染。植被叶表面一般有一定的湿润度和粗糙度, 比较适合 $PM_{2.5}$ 捕获。同时, 植被的蒸腾作用可以增加空气湿度, 降低空气温度, 利于良好气象条件的形成。目前, 国内外的研究者先后展开了大量关于 $PM_{2.5}$ 的研究, 在其成分组成、来源、动态变化等方面取得了较为丰富的成果^[11-13]。植物在一定程度上可对 $PM_{2.5}$ 起到阻滞吸附作用, 但是阻滞吸附的过程是一个复杂的动

收稿日期: 2013-12-10; 修订日期: 2014-02-24

基金项目: 林业公益性行业科研专项(20130430103)

作者简介: 梁丹(1992~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为水土保持, E-mail: liangdanbjfu@163.com

* 通讯联系人, E-mail: wangbin1836@bjfu.edu.cn

态变化的过程,植被对 $PM_{2.5}$ 的影响和沉降机制的研究尚处起步阶段.

研究植物对 $PM_{2.5}$ 的阻滞吸附的方法主要有模型和气室模拟两种. Nowak 等^[14] 利用模型对美国 10 个城市中树木的 $PM_{2.5}$ 年阻滞吸附进行了计算, 结果得出 10 个城市中树木对 $PM_{2.5}$ 的年移除量为 4.7~64.5 t, 说明城市植物起着重要的净化 $PM_{2.5}$ 的作用. 用模型来研究植物对 $PM_{2.5}$ 的作用能估算出植物的年滞尘量, 对于城市造林绿化目标有着重要导向作用, 但由于没有针对性, 不能对植物阻滞吸附 $PM_{2.5}$ 的能力进行有效筛选. 吴志萍等^[15] 探究了 6 种城市绿地环境下空气 $PM_{2.5}$ 浓度的变化规律, 研究表明有乔木的绿地在春、秋、冬季空气中 $PM_{2.5}$ 浓度较低, 夏季较高, 而草坪覆被条件下, 空气中的 $PM_{2.5}$ 浓度在夏季较低. 目前国内对树木种间沉降 $PM_{2.5}$ 的能力差异鲜有研究, 方颖等^[16] 和余曼等^[17] 指出, 不同类型树木间的阻滞吸附颗粒物的差异较大, 其中灌木植物阻滞吸附能力最大, 常绿乔木次之, 落叶乔木最小. Hwang 等^[18] 通过气室模拟实验, 研究了日本赤松、东北红豆杉、美国梧桐、榉树和银杏这 5 种乔木树种阻滞吸附 $PM_{2.5}$ 的能力大小, 发现叶表面有明显主脉和细密绒毛的树木拦截 $PM_{2.5}$ 能力较强, 这一研究实现了植物阻滞吸附 $PM_{2.5}$ 过程的室内模拟, 但实验中 $PM_{2.5}$ 由氮气和乙炔燃烧产生, 与自然界中的 $PM_{2.5}$ 成分存在很大差异, 且局限于植物叶片, 植物不仅能通过叶片还能通过枝干表面有效地阻滞吸附大气颗粒物^[19,20].

随着城市化和工业化的快速发展, $PM_{2.5}$ 已成为北京市首要的大气污染物之一. 在 2013 年 1 月, 北京市雾霾天气为 26 d, 占该月总天数的 87%, 是 1954 年以来同期雾霾天气最多的一年, 这一现象引起了国内对 $PM_{2.5}$ 的广泛关注^[21], 北京市 $PM_{2.5}$ 污染治理刻不容缓. 城市绿化树种有净化城市空气和阻滞吸附 $PM_{2.5}$ 的作用^[22]. 为此, 笔者在总结国内外许多研究方法的基础上, 结合气室模拟实验和室外观测实验, 选取了大叶黄杨、小叶黄杨、矮紫杉、紫叶小檗等 4 种典型绿化灌木植物, 测定了在相同外界条件影响下 4 种植物阻滞吸附 $PM_{2.5}$ 的能力, 分析出这 4 种绿化灌木植物种中阻滞吸附 $PM_{2.5}$ 能力较强的植物种; 并利用北京市 2012 年 10 月~2013 年 5 月的 $PM_{2.5}$ 浓度值, 分析北京市冬春季节 $PM_{2.5}$ 污染状况, 说明灌木树种中的常绿灌木树种在北京市绿地建设中的重要意义.

1 材料与方法

1.1 气室模拟实验

1.1.1 气室模拟装置

本研究基于总量平衡原理和数学微积分原理, 采用自制的气室模拟装置进行实验. 该装置主要由 3 部分组成(见图 1). 装置主体构架是用耐火耐高温塑料制成, 3 个气室的规格是 400 mm × 400 mm × 400 mm 的正方体, 鼓风机是用小型风扇改装, 所有管道为 PVC 管, 管直径为 25 mm.

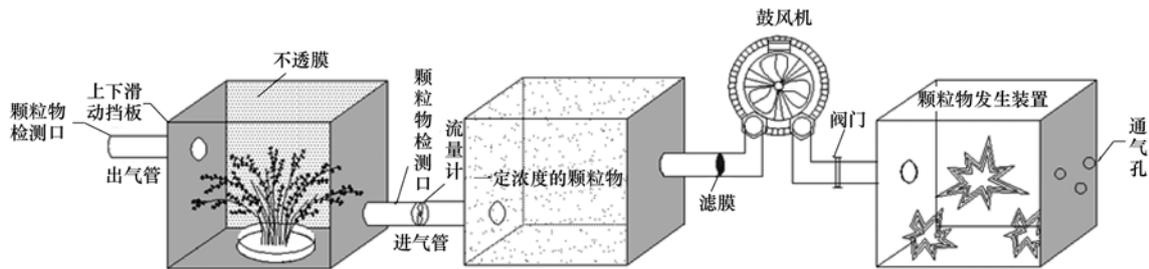


图 1 室内气室模拟示意

Fig. 1 Simulation diagram of indoor air chamber

该系统中, A 为吸收室, 吸收室底部固定一块大小合适的泡沫, 泡沫全用不透膜包上. 测量时, 供插植物枝条所用; B 为储气室, 用于气体的混合, 抽风机功率较小, 它对气流的影响在沉积室 B 中几乎完全消减, 进入 A 中的气流状态近似自然紊流态. 从颗粒物发生器中出来的气体, 经过扩散进入管道中, 经过管道进入混合室进行

混合; C 为颗粒物发生室(颗粒物发生装置), 在此装置中备置需要用于实验测量的颗粒物, 本实验中直接燃烧蜡烛、煤炭和香烟的混合物产生 $PM_{2.5}$.

1.1.2 典型树种的选择

选择北京市广泛应用的 4 种灌木绿化树种大叶黄杨、小叶黄杨、紫叶小檗、矮紫杉进行实验. 北

京市内植被物种丰富,大叶黄杨,小叶黄杨,紫叶小檗是北京市地区最常见的灌木绿化树种^[23]。王赞红等^[24]和李瑞雪等^[25]对石家庄市的大叶黄杨进行了研究,结果表明大叶黄杨的强滞尘能力是城市近地面层环境中清除颗粒物污染的重要机制。矮紫衫是北京市重要的珍贵园林绿化树种,它生长过程中释放的气体有杀菌和净化空气的作用。4种树种的形态特征见表1。

表1 4种绿化灌木树种的形态特征

Table 1 Morphological characteristic of the four kinds of greenery shrubs

树种	科名	植物形态
大叶黄杨 (<i>Euonymus japonicus</i>)	卫矛科	小枝略为四棱形,枝叶密生树冠球形。单叶对生,叶边缘有锯齿,叶光滑,表面深绿有光泽,革质
小叶黄杨 (<i>Buxus microphylla</i>)	黄杨科	树干灰白光洁,枝条密生,枝四棱形。叶对生,革质,椭圆或倒卵形,叶面无光或光亮,侧脉明显凸出;表面有柔毛,背面无毛
紫叶小檗 (<i>Berberis thunbergii</i> cv. <i>atropurpurea</i>)	小檗科	叶深紫色或红色,幼枝紫红色,老枝灰褐色或紫褐色,有槽,具刺。叶全缘,菱形或倒卵形,在短枝上簇生
矮紫衫 (<i>Taxus cuspidate</i> cv. <i>nana</i>)	红豆杉科	叶线形,直或弯微,较紫杉密而宽,先端常突出,正面深绿色有光泽,叶背后面有两条灰绿色气孔带;主枝上的叶呈螺旋状排列,羽状排列

表2 4个样地及其周围环境特征

Table 2 Characteristics of the four plots

植物种	样点	周围环境	样地面积/m ²	有无高大乔木
大叶黄杨	王庄路	交通干道,办公楼	40.52	无
小叶黄杨	双清路	交通干道,居民生活区,酒店	37.60	无
紫叶小檗	王庄路	交通干道,办公楼,餐饮	44.00	无
矮紫衫	清华东路	办公楼,人行道路,少有车辆	39.30	少量

根据北京市 PM_{2.5} 的主要组成物质及来源百分比^[27],用蜡烛、燃煤、香烟以质量比为 10:20:1 的比例配置燃料,将其分为等量的若干份,装入袋中,室温保存。一次室内实验设 5 次气室实验,分 1 次无植物空白对照组,4 次不同植物对 PM_{2.5} 的阻滞吸附能力测量实验,用植物单位面积吸附量表示其阻滞吸附能力大小。放入植物之前,向气室通入燃烧配置燃料产生的气体 10 min,让通气管上吸附的 PM_{2.5} 达到饱和。燃烧等量燃料,连续向密闭气室中鼓风,每 1 min 测量一次进气口和出气口的 PM_{2.5} 浓度(采用英国 Turnkey Instruments 公司生产的 Dust mate 粉尘检测仪),连续测量 10 次。图 1 中抽风机流量为 0.75 m³·min⁻¹,测量 10 min 流过沉积室的气体总体积为 7.50 m³。实验结束后再测量 2 次进出口浓度值,以确保实验中植物叶片阻滞吸附 PM_{2.5} 的量未达到饱和,以此减少实验误差。重复此实验 5 次。

1.1.4 数据处理

本研究测定 PM_{2.5} 的吸附总量及单位面积吸附量用以比较植物对 PM_{2.5} 的吸附能力大小。其中,叶

1.1.3 实验方法与步骤

一般认为所有的滞尘能够通过降水将尘埃颗粒洗出叶表,15 mL 的水量即可以冲洗掉植物叶片附着的尘埃颗粒,使植物重新滞尘^[26]。分别采集选取的 4 个样地(见表 2)的大叶黄杨、小叶黄杨、紫叶小檗、矮紫衫枝条,其大小基本相同,生长状况与部位基本一致,将采集的枝条带回实验室,用足量的蒸馏水对叶片和枝干进行清洗,洗净后擦干。

面积的计算采用称重法。实验完成后,将 4 种植物枝条上的叶片用剪刀小心剪下,装入牛皮纸中,从 4 种植物叶片中随机抽取 10 片。用铅笔将叶片轮廓描在坐标纸上,数出轮廓中的方格数,算出 10 片叶片的表面积,用万分之一天平称量 10 片叶片质量。则植物总叶面积 S_1 用以下公式计算:

$$S_1 = (M \cdot S) / m$$

式中, M 为植物叶片总重, m 为 10 片叶片重量, s 为 10 片叶片表面积

把枝条看作圆柱体,枝条表面积计算公式:

$$S_2 = \pi d/2 + \pi \cdot d \cdot h$$

式中, d 为枝条的底面直径, $\pi d/2$ 为圆柱的上下底面积之和, h 为枝条长。

将每种植物进出口 PM_{2.5} 浓度值的所有数据点描在“时间-浓度”坐标上,用数学积分法算出平均值。单位面积植物吸附 PM_{2.5} 量 A 计算公式如下:

$$A = (\rho_1 \cdot V - \rho_2 \cdot V) / (S_1 + S_2)$$

式中, ρ_1 是对照组气体 PM_{2.5} 平均浓度, ρ_2 是空白组气体 PM_{2.5} 平均浓度; V 为气体总体积。

1.2 室外观测与数据来源

1.2.1 室外 PM_{2.5} 浓度观测方法

在北京林业大学周边选取 4 个样地,样地面积及其周围特征见表 2,在每个样地内部均匀的设 3 个检测点.每周选取 1 d 非雨雪天气,采用英国 Turnkey Instruments 公司生产的 Dust mate 粉尘检测仪,分别测量每个检测点距地面垂直高度 0.20 m 处样地内部 PM_{2.5} 浓度值,并测量大气中距地面 0.20 m 处 PM_{2.5} 浓度值作为参考值,1 min 记 1 次数,每次测量 10 min.

1.2.2 北京市 PM_{2.5} 污染浓度数据来源

本研究所用数据从“全国城市空气质量实时发布平台”获取,包括北京市海淀区(海淀区万柳)、朝阳区(奥体中心)、西城区(官园)和东城区(天坛)这 4 个检测点从 2012 年 12 月~2013 年 5 月的 PM_{2.5} 浓度日均值.4 个检测点有典型代表性,基本能代表北京市区的 PM_{2.5} 污染情况,北京市 PM_{2.5} 浓度日均值用 4 个检测点的日均值表示.

2 结果与分析

2.1 植物叶片特征对其阻滞吸附 PM_{2.5} 能力的影响

利用气室模拟实验数据,绘制柱状图对比并分析 4 种典型绿化灌木植物单位面积阻滞吸附 PM_{2.5} 的量的差异,如图 2 所示.从中可知,5 次实验中植物单位面积吸附 PM_{2.5} 的量的顺序均为紫叶小檗 > 小叶黄杨 > 矮紫杉 > 大叶黄杨.计算气室模拟实验数据累积总量及每种植物种阻滞吸附 PM_{2.5} 的量的平均值(图 3).小叶黄杨、紫叶小檗、矮紫杉和大叶黄杨平均单位面积吸附 PM_{2.5} 的量分别为 1.67、2.41、1.51、0.91 μg·cm⁻²,可见大叶黄杨阻滞吸附 PM_{2.5} 能力最小.这与王赞红等^[24]得出的大叶黄杨有很强的滞尘能力的结果不符,这可能与大叶黄杨

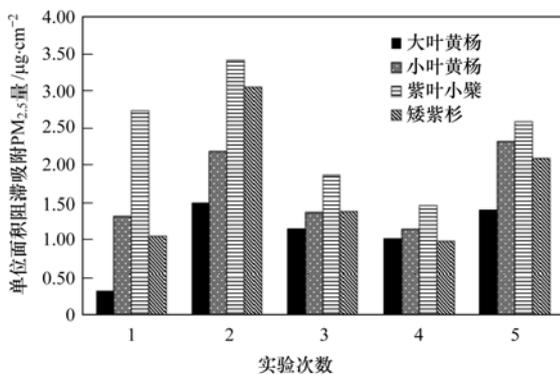
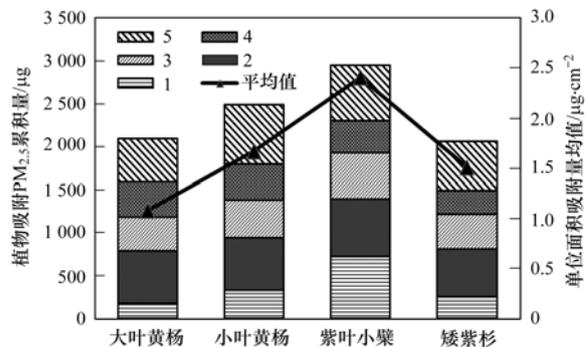


图 2 室内实验中 4 种植物阻滞吸附 PM_{2.5} 量的比较

Fig. 2 Comparison of the PM_{2.5} amount that the four plants arrested in the indoor trails

滞尘的粒径较大以及大叶黄杨叶面积丰富有关.4 种植物的总表面积累积值及平均值见图 4,大叶黄杨的总表面积累积值最大,其他 3 种物种相差不大.植物对 PM_{2.5} 的阻滞吸附能力大小与叶表面粗糙度有关,叶表面越粗糙,颗粒物吸附能力越强^[28].进一步地,短而密的绒毛利于滞尘,长而稀疏的绒毛有时候不利于滞尘^[29].贾彦等^[30]采用显微图像分析对 7 种绿化植物叶片滞尘能力进行了测定,发现叶表有沟状组织和气孔且气孔排列无序的植物滞尘能力比较强.王建辉等^[31]对植物单位叶片面积的滞尘量进行了研究,发现叶表有褶皱时滞尘能力较强,叶片光滑或有蜡质时滞尘能力相对较弱.大叶黄杨叶片蜡质且光滑,因此大叶黄杨单位面积阻滞吸附 PM_{2.5} 的量最小;同时发现,清晨紫叶小檗叶表面湿润,有黏性物质,靠植物叶表面特殊的分泌物沾粘降尘的效果最为稳定^[22],利于 PM_{2.5} 的阻滞吸附.



1、2、3、4、5 分别代表第 1、2、3、4、5 次实验,下同
图 3 植物吸附 PM_{2.5} 累积量与平均单位面积吸附量

Fig. 3 Cumulative amount of PM_{2.5} that arrested by plants and the amount of PM_{2.5} that arrested by per unit area

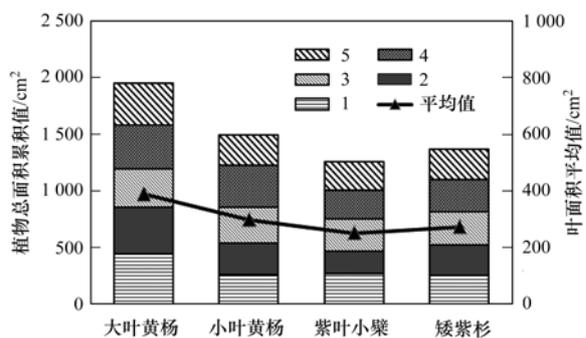


图 4 5 次实验植物总面积累积值与平均值

Fig. 4 Total area of every test plant and the average value in the five tests

2.2 植被结构对其阻滞吸附 PM_{2.5} 能力的影响

一般直接测量不同样地 PM_{2.5} 浓度值的差异用以表征不同样地净化 PM_{2.5} 能力差异^[15],这可能会

因样地局部的颗粒物浓度差异及气流影响造成较大的实验误差. 本研究用样地外的大气 $PM_{2.5}$ 浓度值与样地内部 3 个监测点 $PM_{2.5}$ 浓度均值之差表征该物种吸附细颗粒能力的大小, 称这个差值为净化系数, 避免了因样地颗粒物浓度差异和气流影响造成的误差, 具有一定的可信度. 取 20 组数据净化系数的平均值, 以柱状图表示在图 5 中. 紫叶小檠和小叶黄杨净化系数为正值; 大叶黄杨和矮紫杉净化系数为负值. 一般认为, 植物群内 $PM_{2.5}$ 平均浓度明显低于植物群外时, 体现了该植物种的滞尘效应^[32], 这表明紫叶小檠和小叶黄杨对 $PM_{2.5}$ 的阻滞吸附效应较强, 而大叶黄杨和矮紫杉对 $PM_{2.5}$ 的阻滞吸附作用较弱. 4 种灌木群阻滞吸附 $PM_{2.5}$ 能力的顺序为小叶黄杨 > 紫叶小檠 > 矮紫杉 > 大叶黄杨. 室内实验结果与室外实验结果并不完全一致, 这可能与植被的结构有关. Beckett 等^[33] 和 Lovett 等^[34] 的研究表明, 植物树冠结构、枝叶密度对大气颗粒物的阻滞能力存在很大影响. 4 种典型绿化灌木树种的枝条形态特征如图 6. 大叶黄杨叶片集中在枝条上部, 且修剪严重, 因此大叶黄杨的滞尘能力较低; 小叶黄杨枝叶密集且分布均匀, 树形结构紧密, 能有效的降低风速, 并能减少叶片上阻滞吸附的 $PM_{2.5}$ 被再次吹起; 紫叶小檠枝条细长, 叶片均匀分布在枝条上, 但其树形呈伞形, 上部枝条密集, 下部稀疏, 虽其单位面积阻滞吸附 $PM_{2.5}$ 的量比小叶黄杨多, 但其整株植物阻滞吸附 $PM_{2.5}$ 的能力较小叶黄杨弱; 矮紫杉枝条和叶片均较丰富, 但其阻滞吸附 $PM_{2.5}$ 能力最弱, 这可能与其叶片结构有关.

2.3 常绿灌木树种在北京市绿地建设中的意义

2.3.1 北京市大气 $PM_{2.5}$ 冬季污染情况

北京市的冬季为采暖期, 采暖燃烧源对细颗粒物 $PM_{2.5}$ 的贡献较大, 沙尘天气则对粗颗粒物的贡献

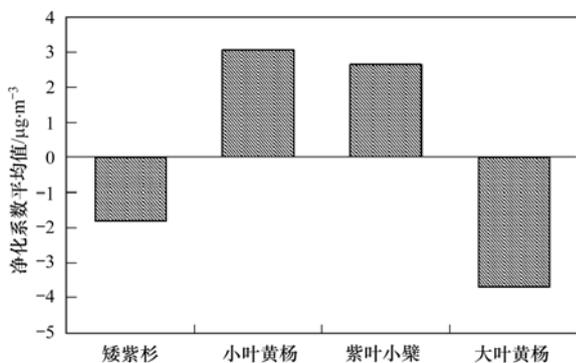


图 5 室外实验净化系数均值

Fig. 5 Mean value of purification coefficient in the outdoor experiment

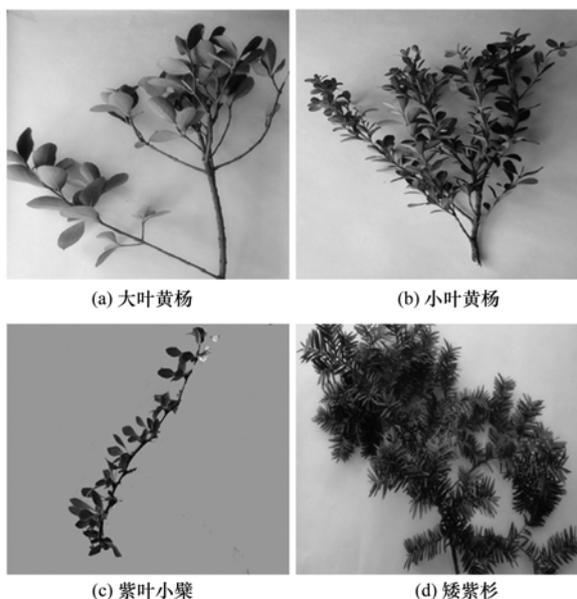


图 6 4 种典型绿化树种枝条形态

Fig. 6 Photos of the branch shapes of the four typical green shrubs

较大. 利用北京市 2012 年 12 月 ~ 2013 年 5 月的每日 $PM_{2.5}$ 浓度均值计算每月 $PM_{2.5}$ 浓度均值, 表示在图 7 中. 从中数据可知, 北京市 2012 年 12 月 ~ 2013 年 5 月, $PM_{2.5}$ 浓度的月均值居高不下, 在 1 月达到最大值 $173.00 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 1 月也是集中供暖的高峰期. 北京市冬季的 $PM_{2.5}$ 浓度值比春季的 $PM_{2.5}$ 浓度值要高 (见图 8), 北京市冬季的 $PM_{2.5}$ 平均浓度值已严重超过了标准. 杨复沫等^[35] 对北京市四季 $PM_{2.5}$ 浓度值进行了观测, 也发现除冬季较高之外, 可能是由于冬季采暖燃煤增多造成的, 在其他季节 $PM_{2.5}$ 平均浓度没有明显变化, 北京市 $PM_{2.5}$ 呈现出冬季达到峰值的特征.

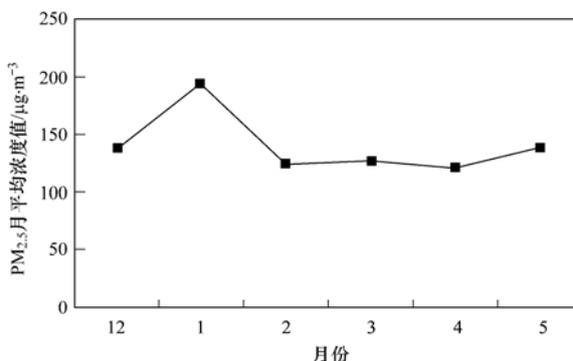


图 7 北京市 2012 年 12 月 ~ 2013 年 5 月平均 $PM_{2.5}$ 浓度大小比较

Fig. 7 Comparison of the monthly average $PM_{2.5}$ concentration of Beijing in 2012-12-2013-05

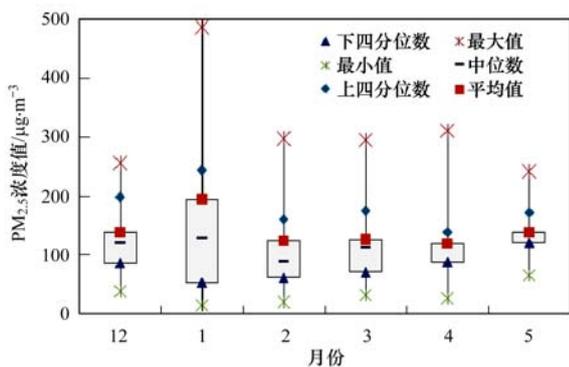


图8 北京市2012年12月~2013年5月
PM_{2.5}浓度值箱线图

Fig. 8 Box plots of PM_{2.5} concentration of
Beijing in 2012-12-2013-05

2.3.2 常绿灌木植物在北京市绿地建设中的作用

大叶黄杨、小叶黄杨和矮紫杉是北京市典型绿化灌木树种中的常绿树种,在北京市冬季景观绿地建设中有重要作用. 王雷等^[36]对北京市6种针叶树叶面附着颗粒物的理化特性进行了研究,结果表明,由于受地面扬尘影响,低矮叶片比高处叶片的颗粒物附着密度大,这说明灌木植物对PM_{2.5}阻滞吸收有一定的位置优势. 高大的乔木主要阻滞吸附空气中的降尘和飘尘,而灌木主要阻滞吸附地面扬尘. 在北京冬季,燃煤取暖导致PM_{2.5}排放量增多,且由于温度较低,空气混合层高度下降,PM_{2.5}浓度增加,而阔叶树种都已落叶,其叶片滞尘能力变为零,只有针叶树种和常绿灌木树种起到主要的滞尘作用,季静等^[37]提出常绿植物在冬季能持续发挥吸附PM_{2.5}的作用. 因此,大叶黄杨、小叶黄杨、矮紫杉等常绿灌木树种在冬季发挥着很大的阻滞吸附PM_{2.5}的作用.

3 结论

(1)气室模拟实验中4种绿化灌木树种单位叶面积阻滞吸附PM_{2.5}能力排序为:紫叶小檗>小叶黄杨>矮紫杉>大叶黄杨. 其原因应与植物叶片形态特征有关. 室外实验中4种绿化灌木树种阻滞吸附PM_{2.5}能力排序为:小叶黄杨>紫叶小檗>矮紫杉>大叶黄杨. 其原因应与植被结构有关.

(2)综合室内外实验结果,阻滞吸附PM_{2.5}能力较强的绿化灌木植被为小叶黄杨和紫叶小檗.

(3)在冬季北京市PM_{2.5}浓度达到峰值,大叶黄杨、小叶黄杨和矮紫杉是北京市典型绿化灌木树种中的常绿树种,对北京市冬季景观绿地建设和空气

质量改善有着重要的作用.

参考文献:

- [1] 吴兑,刘敏汉,梁延刚,等. 粤港细粒子(PM_{2.5})污染导致能见度下降与灰霾天气形成的研究[J]. 环境科学学报, 2012, 32(11): 2660-2669.
- [2] 董凤鸣,莫运政,李国星,等. 大气颗粒物(PM₁₀/PM_{2.5})与人群循环系统疾病死亡关系的病例交叉研究[J]. 北京大学学报(医学版), 2013, 45(3): 398-404.
- [3] 陈薪. PM_{2.5}——力掀环境革命 促进绿色发展——专访国家应对气候变化战略研究和国际合作中心主任李俊峰[J]. 低碳世界, 2012, 11(3): 22-25.
- [4] 徐映如,王丹侠,张建文,等. PM₁₀和PM_{2.5}危害、治理及标准体系的概况[J]. 职业与健康, 2013, 29(1): 117-119.
- [5] 戴海夏,宋伟民. 大气PM_{2.5}的健康影响[J]. 国外医学:卫生学分册, 2001, 28(5): 299-303.
- [6] 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.
- [7] 宋明,韩素芹,张敏,等. 天津大气能见度与相对湿度和PM₁₀及PM_{2.5}的关系[J]. 气象与环境学报, 2013, 29(2): 34-41.
- [8] 师华定,高庆先,张时煌,等. 空气污染对气候变化影响与反馈的研究评述[J]. 环境科学研究, 2012, 25(9): 974-980.
- [9] Fang Y Y, Fiore A M. Using synthetic tracers as a proxy for summertime PM_{2.5} air quality over the Northeastern United States in physical climate models [J]. Geophysical Research Letters, 2013, 40(10): 755-760.
- [10] 赵晨曦,王玉杰,王云琦,等. 细颗粒物(PM_{2.5})与植被关系的研究综述[J]. 生态学杂志, 2013, 32(8): 2203-2210.
- [11] Dan M, Zhuang G S, Li X X, et al. The characteristics of carbonaceous species and their sources in PM_{2.5} in Beijing [J]. Atmospheric Environment, 2004, 38(3): 3443-3452.
- [12] Li X R, Wang Y S, Guo X Q, et al. Seasonal variation and source apportionment of organic and inorganic compounds in PM_{2.5} and PM₁₀ particulates in Beijing, China [J]. Journal of Environmental Sciences, 2013, 25(4): 741-750.
- [13] Sandeep P, Saradhi I, Pandit G. Seasonal variation of black carbon in fine particulate matter (PM_{2.5}) at the tropical coastal city of Mumbai, India [J]. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology, 2013, 91(5): 605-610.
- [14] Nowak D J, Hirabayashi S, Bodine A, et al. Modeled PM_{2.5} removal by trees in Ten U. S. Cities and associated health effects [J]. Environmental Pollution, 2013, 178(8): 395-402.
- [15] 吴志萍,王成,侯晓静,等. 6种城市绿地空气PM_{2.5}浓度变化规律的研究[J]. 安徽农业大学学报, 2008, 35(4): 494-498.
- [16] 方颖,张金池,王玉华. 南京市主要绿化树种对大气固体悬浮物净化能力及规律研究[J]. 生态与农村环境学报, 2007, 23(2): 36-40.
- [17] 余曼,汪正祥,雷耘,等. 武汉市主要绿化树种滞尘效应研究[J]. 环境工程学报, 2009, 3(7): 1333-1339.

- [18] Hwang H J, Yook S J, Ahn K H. Experimental investigation of submicron and ultrafine soot particle removal by tree leaves [J]. *Atmospheric Environment*, 2011, **45**(38): 6987-6994.
- [19] 王蕾, 刘连友, 王志, 等. 北京市园林植物吸附 PM₁₀与 SO₂总量及其健康效益[J]. *环境科学与技术*, 2006, **29**(9): 1-3.
- [20] 丁宇, 李贵才, 路旭, 等. 空间异质性及绿色空间对大气污染的削减效应——以大珠江三角洲为例[J]. *地理科学进展*, 2011, **30**(11): 1415-1421.
- [21] 王秦, 陈曦, 何公理, 等. 北京市城区冬季雾霾天气 PM_{2.5}中元素特征研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2013, **33**(6): 1441-1445.
- [22] 郭伟, 申屠雅瑾, 郑述强, 等. 城市绿地滞尘作用机理和规律的研究进展[J]. *生态环境学报*, 2010, **26**(6): 146-1470.
- [23] 孟雪松, 欧阳志云, 崔国发, 等. 北京城市生态系统植物种类构成及其分布特征[J]. *生态学报*, 2004, **24**(10): 2200-2206.
- [24] 王赞红, 李纪标. 城市街道常绿灌木植物叶片滞尘能力及滞尘颗粒物形态[J]. *生态环境*, 2006, **15**(2): 327-330.
- [25] 李瑞雪, 张明军, 张永芳. 石家庄大叶黄杨叶片滞尘量及滞尘颗粒物的粒度[J]. *城市环境与城市生态*, 2009, **22**(1): 15-19.
- [26] 柴一新, 祝宁, 韩焕金. 城市绿化树种的滞尘效应——以哈尔滨市为例[J]. *应用生态学报*, 2002, **13**(9): 1121-1126.
- [27] 朱先磊, 张远航, 曾立民, 等. 北京市大气细颗粒物 PM_{2.5}的来源研究[J]. *环境科学研究*, 2005, **18**(5): 1-5.
- [28] 杨洪斌, 邹旭东, 汪宏宇, 等. 关于大气环境中 PM_{2.5}的研究进展与展望[J]. *气象与环境学报*, 2012, **28**(3): 77-82.
- [29] Wang H X, Shi H, Li Y Y. Relationships between leaf surface characteristics and dust-capturing capability of urban greening plant species [J]. *The Journal of Applied Ecology*, 2010, **21**(12): 3077-3082.
- [30] 贾彦, 吴超, 董春芳, 等. 7种绿化植物滞尘的微观测定[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2012, **43**(11): 2362-2366.
- [31] 王建辉, 刘奕清, 邹敏. 永川城区主要绿化植物的滞尘效应[J]. *环境工程学报*, 2013, **7**(3): 1079-1084.
- [32] 古琳, 王成, 王晓磊, 等. 无锡惠山三种城市游憩林内细颗粒物 PM_{2.5}浓度变化特征[J]. *应用生态学报*, 2013, **24**(9): 2485-2493.
- [33] Beckett K P, Freer-Smith P H, Taylor G. The capture of particulate pollution by trees at five contrasting urban sites [J]. *Arboricultural Journal*, 2000, **24**(2-3): 209-230.
- [34] Lovett G M, Lindberg S E. Concentration and deposition of particles and vapors in a vertical profile through a forest canopy [J]. *Atmosphere Environment*, 1992, **26**(8): 1469-1476.
- [35] 杨复沫, 贺克斌, 马永亮, 等. 北京大气 PM_{2.5}中微量元素的浓度变化特征与来源[J]. *环境科学*, 2003, **24**(6): 34-37.
- [36] 王蕾, 哈斯, 刘连友, 等. 北京市六种针叶树叶面附着颗粒物的理化特征[J]. *应用生态学报*, 2007, **18**(3): 487-492.
- [37] 季静, 王罡, 杜希龙, 等. 京津冀地区植物对灰霾空气中 PM_{2.5}等细颗粒物吸附能力分析[J]. *中国科学: 生命科学*, 2013, **43**(8): 694-699.

CONTENTS

Comparative Analysis Methods of Haze Distinction over Yangtze River Delta Region	LIU Xiao-hui, ZHU Bin, GAO Jin-hui, <i>et al.</i>	(3239)
Trends of Urban Haze in Jiangsu Province China over the Past 33 Years	LIU Duan-yang, WEI Jian-su, YAN Wen-lian, <i>et al.</i>	(3247)
Temporal Variation of Background Atmospheric CO ₂ and CH ₄ at Mount Waliguan, China	LIU Peng, ZHANG Guo-qing, WANG Jian-qiong, <i>et al.</i>	(3256)
Characteristics and Sources of Organic Carbon and Elemental Carbon in PM _{2.5} in Shanghai Urban Area	ZHANG Yi-hua, WANG Dong-fang, ZHAO Qian-biao, <i>et al.</i>	(3263)
Size Distribution and Characterization of OC and EC in Atmospheric Aerosols During the Asian Youth Games of Nanjing, China	WANG Hong-lei, ZHU Bin, AN Jun-lin, <i>et al.</i>	(3271)
Pollution Characteristics of Carbonaceous Aerosols in PM _{2.5} During Typical Winter Days in Wuxi City	YUN Long-long, LU Fan, ZHANG Tian-shu, <i>et al.</i>	(3280)
Emission Characteristics of PM _{2.5} from Blast Furnace Iron Making	FAN Zhen-zhen, ZHAO Ya-li, ZHAO Hao-ning, <i>et al.</i>	(3287)
Composition Characteristics of Atmospheric Volatile Organic Compounds in the Urban Area of Beibei District, Chongqing	QI Xin, HAO Qing-ju, JI Dong-sheng, <i>et al.</i>	(3293)
Catalytic Oxidation of Two-component VOCs and Kinetic Analysis	BO Long-li, YANG Li, SUN Jian-yu, <i>et al.</i>	(3302)
Ultrafine Particle Number Concentration and Size Distribution of Vehicle Exhaust Ultrafine Particles	LU Ye-qiang, CHEN Qiu-fang, SUN Zai, <i>et al.</i>	(3309)
Major Ion Chemistry of Surface Water in the Upper Reach of Shule River Basin and the Possible Controls	ZHOU Jia-xin, DING Yong-jian, ZENG Guo-xiong, <i>et al.</i>	(3315)
Sediment-water Flux and Processes of Nutrients and Gaseous Nitrogen Release in a China River Reservoir	CHEN Zhu-hong, CHEN Neng-wang, WU Yin-qi, <i>et al.</i>	(3325)
Spatial Distribution and Pollution Assessment of Heavy Metals in the Tidal Reach and Its Adjacent Sea Estuary of Daliaohe Area, China	ZHANG Lei, QIN Yan-wen, MA Ying-qun, <i>et al.</i>	(3336)
Chemical Speciation and Risk Assessment of Heavy Metals in the Middle Part of Yarlung Zangbo Surface Sediments	BAI Jian-kun, LI Chao-liu, KANG Shi-chang, <i>et al.</i>	(3346)
Analysis of Particle Size Characteristics of Road Sediments in Beijing Olympic Park	LI Hai-yan, SHI An-bang, QU Yang-sheng, <i>et al.</i>	(3352)
Levels and Distribution of the Dioxin-Like Polychlorinated Biphenyls (PCBs) in the Surface Sediment of the Yellow River	LI Guang-yao, JIN Jun, HE Chang, <i>et al.</i>	(3358)
Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Retention in Two Different Channel Forms in a Typical Headwater Stream in the Suburb of Hefei City, China	LI Ru-zhong, YANG Ji-wei, QIAN Jing, <i>et al.</i>	(3365)
Migration and Transformation of Nitrogen in Urban Stream Located in Plain River-net Area Based on Water Resources Regulation	LIU Bo, SHENG Ming, ZHU Qiang, <i>et al.</i>	(3373)
Decomposition and Phosphorus Dynamics of the Litters in Standing and Litterbag of the Hangzhou Bay Coastal Wetland	SHAO Xue-xin, LIANG Xin-qiang, WU Ming, <i>et al.</i>	(3381)
Muti-model Collaborative Retrieval of Chlorophyll a in Taihu Lake Based on Data Assimilation	LI Yuan, LI Yun-mei, LÜ Heng, <i>et al.</i>	(3389)
Photobleaching of Dissolved Organic Matter (DOM) from Confluence of Two Rivers Under Natural Solar Radiation; A Case Study of Fujiang River-Jialingjiang River	GAO Jie, JIANG Tao, YAN Jin-long, <i>et al.</i>	(3397)
Using Ultraviolet-Visible (UV-Vis) Absorption Spectrum to Estimate the Dissolved Organic Matter (DOM) Concentration in Water, Soils and Sediments of Typical Water-Level Fluctuation Zones of the Three Gorges Reservoir Areas	LI Lu-lu, JIANG Tao, LU Song, <i>et al.</i>	(3408)
Synthesis of Cu ₂ O-Ag-AgBr/MA Visible Photocatalyst and Its Performance in Degradation of 2-Chlorophenol	WANG Ran, ZHOU Xue-feng, HU Xue-xiang, <i>et al.</i>	(3417)
Effects of Particle Size of Zero-Valent Iron on the Reactivity of Activating Persulfate and Kinetics for the Degradation of Acid Orange 7	LI Huan-xuan, WAN Jin-quan, MA Yong-wen, <i>et al.</i>	(3422)
Degradation of 2,4-D by Combined Catalytic Dechlorination and Biological Oxidation	ZHOU Hong-yi, ZENG Si-si, LIANG Si, <i>et al.</i>	(3430)
Treatment of Marine-Aquaculture Effluent by the Multi-Soil-Layer (MSL) System and Subsurface Flow Constructed Wetland	SONG Ying, HUANG Yu-ting, GE Chuan, <i>et al.</i>	(3436)
Variation of Different Carbon Sources in the Sewage Treatment Process	JIN Peng-kang, CHANG Jin, WANG Xian-bao, <i>et al.</i>	(3443)
Effect of Gas-lift Device on Nitrogen Removal Efficiency of ANAMMOX Reactor	LI Xiang, ZHANG Da-lin, HUANG Yong, <i>et al.</i>	(3449)
Enhancement for Anaerobic Digestion of Sewage Sludge Pretreated by Microwave and Its Combined Processes	LIU Ji-bao, NI Xiao-tang, WEI Yuan-song, <i>et al.</i>	(3455)
Pilot Study of Thermal Treatment/Thermophilic Anaerobic Digestion Process Treating Waste Activated Sludge of High Solid Content	WU Jing, WANG Guang-qi, CAO Zhi-ping, <i>et al.</i>	(3461)
Effects of Temperature on Combined Process of ABR and MBR for Domestic Sewage Treatment and Analysis of Microbial Community	WU Peng, LU Shuang-jun, XU Yue-zhong, <i>et al.</i>	(3466)
Microbial Community of Municipal Discharges in A Sewage Treatment Plant	XU Ai-ling, REN Jie, SONG Zhi-wen, <i>et al.</i>	(3473)
Pilot-Scale Cultivation of <i>Spirulina plantensis</i> with Digested Piggery Wastewater	GUO Qing-qing, LIU Rui, LUO Jin-fei, <i>et al.</i>	(3480)
Spectral Characteristics of Soluble Metabolites During Endogenous Respiration	LI Zhi-hua, ZHANG Qin, BAI Xu-li, <i>et al.</i>	(3487)
Endogenous Respiration Process Analysis of Heterotrophic Biomass and Autotrophic Biomass Based on Respiration Map	LI Zhi-hua, BAI Xu-li, ZHANG Qin, <i>et al.</i>	(3492)
Influence of S-Metolachlor and Cd ²⁺ on Photosynthesis of <i>Scenedesmus obliquus</i>	CHEN Cai-dong, HU Xiao-na, ZHANG Xiao-qiang, <i>et al.</i>	(3498)
Effect of Environmental Factors on Fish Community Structure in the Huntai River Basin at Multiple Scales	LI Yan-li, LI Yan-fen, XU Zong-xue	(3504)
Succession of Rotifer Community and Its Relationship with Environmental Factors in a New Estuarial Landscape River, Shanghai	MA Wen-hua, ZHANG Wei, GU Wan-wen, <i>et al.</i>	(3513)
Anaerobic Reduction of Humus/Fe(III) and Electron Transport Mechanism of <i>Fontibacter</i> sp. SgZ-2	MA Chen, YANG Gui-qin, LU Qin, <i>et al.</i>	(3522)
Source Apportionment of Soil Heavy Metals in Jiapigou Goldmine Based on the UNMIX Model	AI Jian-chao, WANG Ning, YANG Jing	(3530)
Environmental Magnetic Properties and Their Spatial Variability of Topsoil in Shihezi City	YANG Han, XIONG Hei-gang, CHEN Xue-gang	(3537)
Effects of Different Amounts of Phosphate Fertilizers on Copper, Zinc Transfer in Red Soil Under the Application of KH ₂ PO ₄	GUO Liang, LI Zhong-wu, HUANG Bin, <i>et al.</i>	(3546)
Influence of Sulfur on the Bioavailability of Arsenic Uptake by Rice (<i>Oryza sativa</i> L.) and Its Speciation in Soil	YANG Shi-jie, TANG Bing-pei, WANG Dai-chang, <i>et al.</i>	(3553)
Effects of Sulfur on Transformation of Selenium in Soil and Uptake of Selenium in Rape	LIU Xin-wei, DUAN Bi-hui, XIA Quan-jie, <i>et al.</i>	(3564)
Impact of Reclaimed Water Irrigation on Soil Chemical Properties and Culturable Microorganisms	GONG Xue, WANG Ji-hua, GUAN Jian-fei, <i>et al.</i>	(3572)
Influence of Different Slope Position and Profile in <i>Disporopsis pernyi</i> Forest Land on Soil Microbial Biomass and Enzyme Activity in Southwest Karst Mountain of China	QIN Hua-Jun, HE Bing-Hui, ZHAO Xuan-chi, <i>et al.</i>	(3580)
Effects of Different Soil Types on the Foliar δ ¹³ C Values of Common Local Plant Species in Karst Rocky Desertification Area in Central Guizhou Province	DU Xue-lian, WANG Shi-jie, LUO Xu-qiang	(3587)
Effect of Carbon Substrate Concentration on N ₂ , N ₂ O, NO, CO ₂ and CH ₄ Emissions from a Paddy Soil in Anaerobic Condition	CHEN Nuo, LIAO Ting-ting, WANG Rui, <i>et al.</i>	(3595)
Ability of Typical Greenery Shrubs of Beijing to Adsorb and Arrest PM _{2.5}	LIANG Dan, WANG Bin, WANG Yun-qi, <i>et al.</i>	(3605)
Effects of Chlorides on Cd Transformation in a Simulated Grate Incinerator During Sludge Incineration Process	LIU Jing-yong, ZHUO Zhong-xu, SUN Shui-yu, <i>et al.</i>	(3612)
Spatial Temporal Differentiation of Product-based and Consumption-based CO ₂ Emissions and Balance in the Beijing-Tianjin-Hebei Region; an Economic Input-Output Analysis	WANG Hao, CHEN Cao-cao, PAN Tao, <i>et al.</i>	(3619)
Study on Feasible Emission Control Level of Air Pollutions for Cement Industry	REN Chun, JIANG Mei, ZOU Lan, <i>et al.</i>	(3632)

《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9月15日 第35卷 第9期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 9 Sep. 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@reeces. 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@reeces. 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