

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第2期

Vol.36 No.2

2015

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

霾与非霾期间汞在不同粒径颗粒物上的分布特征	朱琮宇,程金平,魏雨晴,薄丹丹,陈筱佳,江璇,王文华(373)
大气传输路径对上甸子本底站气溶胶光学特性的影响	蒲维维,石雪峰,马志强,赵秀娟,张小玲,徐晓峰(379)
近3年太原市夏季降水的化学特征研究	郭晓方,崔阳,王开扬,何秋生,王新明(388)
太原市PM _{2.5} 中有机碳和元素碳的污染特征	刘珊,彭林,温彦平,白慧玲,刘凤娟,史美鲜,李丽娟(396)
青海省西宁市和天峻县大气颗粒物中有机氯农药和类二噁英多氯联苯的水平与分布	李秋旭,何畅,马召辉,马丽花,扎西卓玛,王英,金军(402)
北京10个常绿树种颗粒物吸附能力研究	王兵,张维康,牛香,王晓燕(408)
人工湿地空气微生物群落碳源代谢特征	宋志文,王琳,徐爱玲,吴等等,夏岩(415)
春季融雪补给后巩乃斯河水物理化学性质空间分布特征研究	刘翔,郭玲鹏,张飞云,马杰,牟书勇,赵鑫,李兰海(421)
青藏高原湖泊小流域水体离子组成特征及来源分析	李鹤,李军,刘小龙,杨曦,张伟,王洁,牛颖权(430)
亚热带深水水库——龙滩水库季节性分层与富营养化特征分析	张垒,李秋华,黄国佳,欧腾,李钊,吴迪,周黔兰,高廷进(438)
长江河口水库沉积物磷形态、吸附和释放特性	金晓丹,吴昊,陈志明,宋红军,何义亮(448)
黄河口溶解无机碳时空分布特征及影响因素研究	郭兴森,吕迎春,孙志高,王传远,赵全升(457)
苕溪干流悬浮物和沉积物的磷形态分布及成因分析	陈海龙,袁旭音,王欢,李正阳,许海燕(464)
滇池表层沉积物氮污染特征及其潜在矿化能力	孟亚媛,王圣瑞,焦立新,刘文斌,肖焱波,祖维美,徐天敏,丁帅,周童(471)
城郊排水沟渠溶质传输的暂态存储影响及参数灵敏性	李如忠,钱靖,董玉红,唐文坤,杨继伟(481)
艾比湖表层沉积物重金属的来源、污染和潜在生态风险研究	张兆永,吉力力·阿不都外力,姜逢清(490)
工矿业绿洲城郊排污渠沉积物重金属的形态分布规律及风险评价	臧飞,王胜利,南忠仁,王兆炜,任业萌,王德鹏,廖琴,周婷(497)
山东省典型工业城市土壤重金属来源、空间分布及潜在生态风险评价	戴彬,吕建树,战金成,张祖陆,刘洋,周汝佳(507)
UV协同ClO ₂ 去除三氯生及其降解产物的研究	李玉瑛,何文龙,李青松,金伟伟,陈国元,李国新(516)
氯化铁絮凝-直接过滤工艺对地下水中As(V)的去除机制研究	康英,段晋明,景传勇(523)
负载纳米零价铁铜藻基活性炭的制备及其去除水中Cr(VI)的研究	曾淦宁,武晓,郑林,伍希,屠美玲,王铁杆,艾宁(530)
磁性石墨烯吸附水中Cr(VI)研究	刘伟,杨琦,李博,陈海,聂兰玉(537)
TiO ₂ @酵母复合微球固定床吸附荧光增白剂-VBL的研究	王菲,张凯强,白波,王洪伦,索有瑞(545)
MnO ₂ /CFP复合电极的制备及电吸附Pb ²⁺ 特性的研究	刘方园,胡承志,李永峰,梁乾伟(552)
吸附相反应技术制备微弱光响应的多组分掺杂TiO ₂ 催化剂	王挺,祝轶琛,孙志轩,吴礼光(559)
掺铁TiO ₂ 纳米管阵列模拟太阳光光电催化降解双酚A的研究	项国梁,喻泽斌,陈颖,徐天佐,彭振波,刘钰鑫(568)
天然矿物负载Fe/Co催化H ₂ O ₂ 氧化降解阳离子红3R	马楠,刘华波,谢鑫源(576)
臭氧微气泡处理酸性大红3R废水特性研究	张静,杜亚威,刘晓静,周玉文,刘春,杨景亮,张磊(584)
碳源类型、温度及电子受体对生物除磷的影响	韩芸,许松,董涛,王斌帆,王显耀,彭党聪(590)
低温低溶解氧EBPR系统的启动、稳定运行及工艺失效问题研究	马娟,李璐,俞小军,魏雪芬,刘娟丽(597)
O池溶解氧水平对石化废水A/O工艺污染物去除效果和污泥微生物群落的影响	丁鹏元,初里冰,张楠,王星,王建龙(604)
改善污泥脱水性能的丝状真菌的分离及其促进污泥脱水的机制初探	周雨璐,付豪逸,范先锋,王振宇,郑冠宇(612)
热碱处理对污水处理厂污泥特性的影响研究	杨世东,陈霞,刘操,肖本益(619)
不同退化程度羊草草原碳收支对模拟氮沉降变化的响应	齐玉春,彭琴,董云社,肖胜生,贾军强,郭树芳,贺云龙,闫钟清,王丽芹(625)
地表臭氧浓度升高对旱作农田N ₂ O排放的影响	吴杨周,胡正华,李岑子,陈书涛,谢燕,肖启涛(636)
亚热带次生林不同土壤呼吸组分的多年观测研究	刘义凡,陈书涛,胡正华,沈小帅,张旭(644)
川中丘陵县域土壤氮素空间分布特征及其影响因素	罗由林,李启权,王昌全,李冰,张新,冯文颖,翁倩,吴冕(652)
黄土丘陵区土地利用变化对深层土壤活性碳组分的影响	张帅,许明祥,张亚锋,王超华,陈盖(661)
汶川地震灾区不同气候区土壤微生物群落碳源代谢多样性	张广帅,林勇明,马瑞丰,邓浩俊,杜锟,吴承祯,洪伟(669)
土壤电动修复的电极空间构型优化研究	刘芳,付融冰,徐珍(678)
有机氯农药污染场地挖掘过程中污染物的分布及健康风险	张石磊,薛南冬,杨兵,李发生,陈宣宇,刘博,孟磊(686)
水稻不同生育期根际及非根际土壤砷形态迁移转化规律	杨文骏,王英杰,周航,易开心,曾敏,彭佩钦,廖柏寒(694)
植物根系体外溶液提取方法研究:以多环芳烃为例	朱满党,都江雪,乐乐,李金凤,杨青青,陆守昆,占新华(700)
垂序商陆叶细胞壁结合锰机制研究	徐向华,刘翠英,李平,郎漫,赵小艳,杨建军,官敏(706)
1株筛自柴油污染土壤的铜绿假单胞菌对萘的降解特性研究	刘文超,吴彬彬,李晓森,卢滇楠,刘永民(712)
CdSe/ZnS量子点对斑马鱼胚胎发育的毒性效应	陈慕飞,黄承志,蒲德永,郑朝依,袁开米,金星星,张耀光,金丽(719)
锯齿新米虾对Cu ²⁺ 和毒死蜱毒性的生理响应	李典宝,张玮,王丽卿,张瑞雷,季高华(727)
同步衍生超声乳化微萃取气相色谱法测定环境水样中的苯胺类化合物	田立勋,戴之希,王国栋,翁焕新(736)
热水环境中Na ⁺ 活化斜发沸石吸附钙离子除硬过程研究	张硕,王栋,陈远超,张兴文,陈贵军(744)
区域经济-污染-环境三维评价模型的构建与应用	樊新刚,米文宝,马振宁(751)
《环境科学》征订启事(401)	
《环境科学》征稿简则(437)	
信息(489,522,726,735)	

北京 10 个常绿树种颗粒物吸附能力研究

王兵^{1,2}, 张维康¹, 牛香^{2*}, 王晓燕³

(1. 北京林业大学林学院, 北京 100083; 2. 中国林业科学院森林生态环境与保护研究所, 北京 100091; 3. 北京林业大学水土保持学院, 北京 100083)

摘要: 大气中颗粒物 PM (particulate matter) 不仅造成环境污染, 还对人体造成严重的危害. 城市绿色植物作为大气过滤器, 能够有效地提高城市空气质量, 保护人体健康. 因此了解不同树种对空气颗粒物的吸附滞纳作用是必要的. 以北京植物园 10 种常绿植被为研究对象, 应用空气气溶胶再发生器 (QRJZFSQ-I) 测定了北京市常见 6 种乔木和 4 种灌木叶片对空气总悬浮颗粒物 (TSP)、PM₁₀、PM_{2.5} 和 PM_{1.0} 的吸附能力. 结果表明: ①不同树种叶片表面附着颗粒物的能力差异明显, 最高的是雪松 (*Cedrus deodara*) 和油松 (*Pinus tabulaeformis*), 吸附量分别是 $(18.95 \pm 0.71) \mu\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$ 和 $(14.61 \pm 0.78) \mu\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$, 冷杉 (*Abies fabri*) 最小, 为 $(8.02 \pm 0.4) \mu\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$; ②不同树种叶片单位面积对不同颗粒物的附着能力也存在差异, 附着 PM₁₀ 能力最强的是油松和雪松, 附着 PM_{2.5} 能力最强的是雪松、铺地柏 (*Juniperus procumbens*)、龙柏 (*Juniperus chinensis* cv. *kaizuka*) 和油松, 附着 PM_{1.0} 能力最强的是雪松、铺地柏、冷杉和油松; ③不同月份叶片上附着的各粒级颗粒物 (PM₁₀、PM_{2.5}) 占 TSP 的比例不同. 其中 PM₁₀ 在 4~6 月之间主要表现两种变化趋势, 一是先上升后下降, 主要为灌木树种; 二是逐渐上升, 主要的树种是乔木树种. 而 PM_{2.5} 则没有这种明显的变化趋势.

关键词: 颗粒物; 常绿树种; 总悬浮颗粒物; PM₁₀; PM_{2.5}; 吸附能力; 北京

中图分类号: X171; X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)02-0408-07 DOI: 10.13227/j.hjxx.2015.02.006

Particulate Matter Adsorption Capacity of 10 Evergreen Species in Beijing

WANG Bing^{1,2}, ZHANG Wei-kang¹, NIU Xiang^{2*}, WANG Xiao-yan³

(1. College of Forestry, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 2. Research Institute of Forest Ecology, Environment and Protection, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China; 3. College of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: In the atmosphere, high concentrations of air particles PM (Particulate matter) cause not only environmental pollution, but also serious harm to human body. Green plants as an air filter, can effectively improve the air quality in urban and suburb, and protect human health. Therefore, it is necessary to understand the adsorption capacity of air particulate matter of different species. Based on aerosol generator (QRJZFSQ-I), the leaf surface of ten plants including six evergreen trees and four evergreen shrubs were measured to determine the atmosphere adsorption (TSP, PM₁₀, PM_{2.5} and PM_{1.0}) capacity in Beijing, the results showed that: ① There was obvious difference in the PM adsorption capacity of the leaf surface of different species, the highest were *Cedrus deodara* and *Pinus tabulaeformis*, which were $(18.95 \pm 0.71) \mu\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$ and $(14.61 \pm 0.78) \mu\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$ respectively, while *Abies fabri* was the minimum, which was $(8.02 \pm 0.4) \mu\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$; ② There was also difference in the per unit leaf area particulate adhesion ability among different tree species, the tree species with the strongest leaf PM₁₀ adhesion ability were *Pinus tabulaeformis* and *Cedrus deodara*, those with the strongest leaf PM_{2.5} adhesion ability were *Cedrus deodara*, *Juniperus procumbens*, *Juniperus chinensis* cv. *kaizuka* and *Pinus tabulaeformis*, while those with the strongest leaf PM_{1.0} adhesion ability were *Cedrus deodara*, *Juniperus procumbens*, *Abies fabri* and *Pinus tabulaeformis*; ③ The proportions of particulate matters (PM₁₀ and PM_{2.5}) in TSP were different. PM₁₀ had mainly two kinds of trends in April-June, one was firstly decreasing and then increasing, with the main tree type of the shrub species; and the other was increasing, with the main tree type of the tree species. But this change trend was not obvious in PM_{2.5}.

Key words: particulate matter; evergreen tree species; TSP; PM₁₀; PM_{2.5}; adsorption capacity; Beijing

根据颗粒物粒径大小, 大气颗粒物可分为总悬浮颗粒物 TSP ($D_p < 100 \mu\text{m}$) 和飘尘 SPM ($D_p < 30 \mu\text{m}$), 飘尘又可分为粗颗粒物 ($2.5 \sim 10 \mu\text{m}$) 和细颗粒物 ($D_p < 2.5 \mu\text{m}$)^[1]. 大气颗粒物 (PM) 的主要来源可分为天然源和人为源. 天然源包括火山爆发所释放的火山灰、森林火灾的燃烧物、海浪溅出的浪沫和盐粒以及植物的花粉、孢子等. 人为源主要是汽车尾气、道路扬尘、煤炭燃烧、工业废气排放和

建筑粉尘^[2]. 不同的地方由于自然环境的差异、经济发展水平及产业结构的不同, 大气颗粒物的组成也不尽相同. 但是组成大气颗粒物的物质大致由无

收稿日期: 2014-07-29; 修订日期: 2014-09-24

基金项目: 林业公益性行业科研专项 (20130430101)

作者简介: 王兵 (1965~), 男, 博士, 研究员, 主要研究方向为陆地生态系统关键过程长期观测与模拟、森林生态系统服务评估, E-mail: wangbing@caf.ac.cn

* 通讯联系人, E-mail: niuxiang@caf.ac.cn

机和有机物质组成,主要包括重金属、有机碳、芳香烃物质等^[3]。对人体健康产生较大危害主要指可吸入颗粒物($D_p < 10 \mu\text{m}$),由于可吸入颗粒物粒径小,表面积大,易吸附大气中的重金属、氮氧化物、硫化物和多环芳烃等有毒物质,因此对人体健康和空气质量有严重的危害^[4]。随着工业的快速发展,人类活动对自然环境的影响越来越大,造成大气中颗粒物浓度的逐渐增加,进而危害到人类健康,特别是在近几年的北京雾霾天气已经严重影响到人们的生活和生产,2013 年北京市 $\text{PM}_{2.5}$ 全年平均浓度为 $89.8 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,比 $35 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 的国家标准超标 1.5 倍。其中全年优良天数共计 176 d,仅占全年总天数的 48.2%;三级轻度污染天总计 84 d,占 23.0%;而四级中度污染以上的天为 105 d,占 28.8%。如何防治大气颗粒物特别是可吸入颗粒物对人类的危害已成为一个迫切需要解决的问题。

植物可以通过叶片吸附大气颗粒物,在净化大气中扮演着重要的角色,这一点在国内外研究中已经得到证实^[5-7]。如,张志丹等^[8]对毛白杨叶片吸附 $\text{PM}_{2.5}$ 等大气颗粒物进行了定量的研究和探讨,结果表明叶片的 $\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_{10} 、TSP 和总颗粒物吸附量分别为 8.88×10^{-6} 、 30.6×10^{-6} 、 64.7×10^{-6} 和 $64.8 \times 10^{-6} \text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$;林分的 $\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_{10} 、TSP 和总颗粒物吸附量分别为 0.963、3.32、7.01 和 7.02 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。另外植物吸收空气颗粒物同时还可吸收其他大气污染,如 Nowak 等^[9]研究了不同城市森林

覆盖率对空气污染物包括 O_3 、 PM_{10} 、 NO_2 、 SO_2 和 CO 的吸附作用,结果显示美国各城市每年乔灌木种每年移除大气污染物约为 71.1 万 t,价值在 380 亿美元。植物特别是乔木被认为是最有效的吸附滞留大气颗粒物的植被,相比灌木和草本,乔木凭借其硕大的林冠、较多的叶片含量、复杂的枝叶结构及林冠结构可以增加大气颗粒物的沉降速率,更有利于叶片对颗粒物的吸附作用^[10,11]。如有些阔叶树种叶片表面比较粗糙,能够有效地吸附大气中颗粒物;针叶树种凭借其分泌蜡质物质,比阔叶更有效的吸附滞留颗粒物,常绿针叶树种有很大潜力积聚大气中污染物^[12,13]。其中大部分研究是对针阔叶树种进行比较,对针叶树种之间的相互比较研究的较少,还有只是定性或者简单定量描述不同物种叶片吸附量,没有详细研究不同物种叶片对不同粒径颗粒物的吸附能力。

本研究的主要目的是定量确定北京市城市 10 种常绿树种叶片吸附滞留大气颗粒物的能力,包括:①不同树种对不同粒级颗粒物的附着能力;②不同树种叶片单位面积附着颗粒物量;③相同树种对不同粒级颗粒物附着能力随时间的变化。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

北京植物园位于北京西山脚下(如图 1),全国总规划面积 400 hm^2 ,园内植物有 150 万余株,是集



图 1 研究区位置示意

Fig. 1 Location of the study area

植物资源展示和保护、科研、科普、游憩和开发为一体的综合性植物园。距市区 18 km, 该园位于北纬 39°48', 东经 116°28', 海拔 76 m, 属温带大陆性气候。年均温 11.6℃, 1 月均温 -3.7℃, 7 月均温 26.7℃。极端高温 41.3℃, 极端低温 -17.5℃, 年降水量 634.2 mm, 相对湿度 43% ~ 79%。园中栽培了 6 000 多种植物, 包括 2 000 种乔木和灌木, 1 620 种热带和亚热带植物, 500 种花卉以及 1 900 种果树、水生植物和中草药等。主要树种类型包括油松 (*Pinus tabuliformis*)、白皮松 (*Pinus bungeana*)、侧柏 (*Platycladus orientalis*)、红松 (*Pinus koraiensis*)、银杏 (*Ginkgo biloba*)、刺槐 (*Robinia pseudoacacia*)、大叶黄杨 (*Buxus megistophylla*)、毛白杨 (*Populus tomentosa*)、旱柳 (*Salix matsudana*) 等, 植被覆盖率达到 80% 以上, 园内物种基本代表了华北地区典型植被类型。

1.2 供试树种选择

2014 年 3 月 ~ 2014 年 6 月, 每个月选择一无风晴朗天在北京植物园采摘 10 种常见常绿植物的叶片, 10 种植物分别为油松、雪松、侧柏 (*Platycladus orientalis*)、红松、白皮松、冷杉、铺地柏、龙柏、矮杉 (*Taxus wallichiana* var.)、粗榧 (*Cephalotaxus sinensis*)。

1.3 叶片采集方法

每种植物选取 3 株生长状况良好, 林龄相近的个体植株, 在乔木生长高度 2 ~ 3 m 和灌木生长高度 1 ~ 2 m 处, 分别在东、南、西、北 4 个方向采集叶片, 根据叶片大小在每株树采集 100 ~ 200 g 不等叶片 (如表 1), 采摘的叶片要求成熟、完整、无病虫害和断残。把采摘下来的叶片立即封存于自封袋中, 及时带到位于植物园内的实验室进行测量。

表 1 10 种常见常绿植物生长状况及叶片采集量

Table 1 Growth of the ten evergreen plant species and number of the collected leaves

树种	生长状况		叶片数量/g
	胸径/cm	树高/m	
雪松	22 ± 3.23	13 ± 3.00	100
红松	18 ± 2.50	15 ± 2.00	120
油松	18 ± 1.87	12 ± 2.60	150
白皮松	12 ± 3.20	10 ± 2.00	100
侧柏	11 ± 1.50	8 ± 2.50	120
冷杉柏	13 ± 2.70	13 ± 1.50	100
龙柏		6 ± 1.00	180
矮紫杉		3 ± 0.50	140
粗榧		1.5 ± 0.50	150
铺地柏		0.3 ± 0.10	100

1.4 单位叶面积颗粒物吸附量计算

将待测树种的叶片分别放入气溶胶再发生器 (QRJZFSQ-I) 的料盒中, 通过风蚀原理, 将叶片上滞纳的颗粒物吹起、混匀, 再次形成气溶胶, 每个树种进行 3 次重复。然后利用连接在气溶胶再发生器上的 DUSTMATE 手持式环境粉尘检测仪测定气溶胶中 TSP、PM₁₀、PM_{2.5} 和 PM_{1.0} 的质量 M_{inj} (单位: μg ; i 为不同树种; n 为 3 次重复, 取值 1 ~ 3; j 为颗粒物种类)。

把测量完的阔叶树种叶片放入扫描仪 (Canon LIDE 110) 进行扫描, 使用 Adobe Photoshop 软件对扫描完之后的图像进行处理, 利用叶面积分析软件计算叶片面积 S (单位: cm^2)。而针叶树种则利用游标卡尺测其长度和直径计算其叶面积。不同树种单位叶面积吸附颗粒物量计算公式为:

$$M_i = \sum_1^n m_{ij} / S_i \tag{1}$$

式中, M_i 表示不同树种单位叶面积吸附不同粒径颗粒物的质量 (单位: $\mu\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$), i 表示不同树种, j 表示颗粒物种类, $n = 3$ 。

2 结果与分析

2.1 不同树种叶片颗粒物附着密度

本研究采用颗粒物附着密度 ($\mu\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$), 即叶片单位面积滞留的大气颗粒物质量, 表示针叶植物吸附滞留大气颗粒物的能力。由表 2 可以看出, 不同树种颗粒物滞纳附着密度存在较大差异。在所测树种中, 雪松和油松颗粒物附着密度最大, 分别是 $(18.95 \pm 0.71) \mu\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$ 和 $(14.61 \pm 0.78) \mu\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$; 冷杉附着密度最小, 值为 $(8.02 \pm 0.4) \mu\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$ 。如图 2 所示, 测试树种中松类颗粒物平均附着密度是柏类的 1.33 倍, 灌木树种颗粒物平均附着密度是乔木的 1.02 倍, 主要的原因是灌木的采样叶片生长高度较低, 另一方面是 4、5、6 月北京大风天较多, 处于离地面较近的灌木叶片能滞留较多的地面扬尘。

2.2 植物叶片对不同粒级颗粒物附着能力

不同树种对不同粒级颗粒物附着能力存在显著差异 (如图 3)。通过对比研究 10 种常绿树种可以发现, 单位面积叶片附着 PM₁₀ 能力最强的树种是油松和雪松, 最小的是白皮松和冷杉; 对 PM_{2.5} 颗粒物附着能力最强的树种是雪松、铺地柏、龙柏和油松, 附着能力比较低的树种是红松和粗榧; 对 PM_{1.0} 附着能力最强的树种是雪松、铺地柏、冷杉和油

表 2 10 种常绿树种叶片单位面积附着 TSP 密度/ $\mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$

树种	4 月	5 月	6 月	总量
雪松	7.83 ± 0.49	4.71 ± 0.24	6.41 ± 0.47	18.95 ± 0.71
油松	8.52 ± 0.44	2.89 ± 0.14	3.20 ± 0.19	14.61 ± 0.78
紫矮杉	2.13 ± 0.11	6.29 ± 0.31	4.26 ± 0.21	12.69 ± 0.63
铺地柏	3.78 ± 0.19	4.64 ± 0.23	3.90 ± 0.20	12.32 ± 0.62
龙柏	2.49 ± 0.12	5.01 ± 0.16	4.02 ± 0.20	11.51 ± 0.58
粗榧	3.77 ± 0.19	5.77 ± 0.29	1.35 ± 0.07	10.88 ± 0.54
红松	3.29 ± 0.16	1.85 ± 0.09	5.68 ± 0.28	10.82 ± 0.54
侧柏	4.36 ± 0.22	2.11 ± 0.11	3.05 ± 0.15	9.52 ± 0.48
白皮松	2.83 ± 0.14	3.41 ± 0.17	3.05 ± 0.15	9.29 ± 0.46
冷杉	2.63 ± 0.13	3.86 ± 0.19	1.53 ± 0.08	8.02 ± 0.40

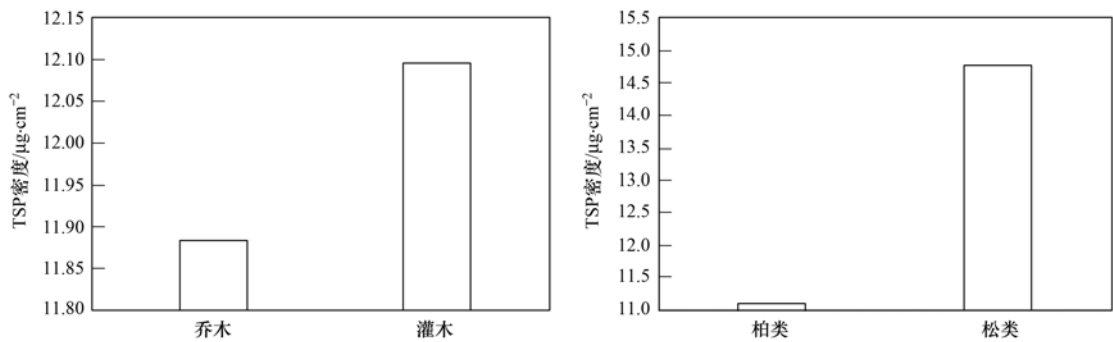


图 2 不同树种平均附着 TSP 密度
Fig. 2 Average TSP adhesion density of different species

松,附着能力较低的树种是侧柏和红松. 不同树种对不同颗粒物的附着能力的变化与树种及叶片本身特性有关,根据柴一新等^[14]研究结果表明,针叶树种由于叶片生长密度较大,冠幅较大,所以对 PM_{10} 和 $\text{PM}_{2.5}$ 都有较强的吸附能力.

2.3 不同月份植物对颗粒物的吸附能力

由表 3 和图 4 可见,相同树种叶片上滞留不同粒级颗粒物所占总颗粒物的比例在不同月份之间存在差异性. 从 4~6 月不同树种 PM_{10} 占 TSP 比例主要有两种变化趋势:①先上升后下降,粗榧矮紫杉、粗榧、龙柏、铺地柏、红松和白皮松附着 PM_{10} 占 TSP 总量比例先上升后下降;②逐渐上升,油松、雪松、侧柏、和冷杉附着 PM_{10} 占 TSP 总量比例逐渐上升. 但是 $\text{PM}_{2.5}$ 则没有这种明显的变化趋势,这表明对 $\text{PM}_{2.5}$ 吸附能力只与树种特性有关,而受时间地点的影响较小. 根据 Beckett 等^[15]研究结果发现,之所以会有上述现象,可能的原因是 $\text{PM}_{2.5}$ 颗粒物粒径较小,在大气中滞留的时间比 PM_{10} 长,因此可以漂浮更远的距离,虽然不同树种对 $\text{PM}_{2.5}$ 滞留能力有差异,但是相同树种在不同地点和时间内滞留 $\text{PM}_{2.5}$ 颗粒物则无规律性. 根据图 4 所示,灌木树种在 4 月

的叶片单位面积滞留 PM_{10} 和 $\text{PM}_{2.5}$ 达到最大,以后逐渐下降,而乔木树种则在 5 月出现最小值,6 月达到最大(表 3). 原因是由于北京 4、5 月风沙较大,灌木树种离地面近,更容易滞留地面扬尘. Zheng 等^[16]研究北京 $\text{PM}_{2.5}$ 来源及时间变化趋势发现,在 2000 年 4 月,沙尘暴对北京 $\text{PM}_{2.5}$ 的贡献有重要的影响,对 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度贡献率为 36%,表明在春季,沙尘是北京空气颗粒物的主要来源,因此离地面较近的灌木比高大的乔木能够吸附更多的颗粒物.

3 讨论

3.1 不同树种吸滞颗粒物的差异

不同树种对颗粒物的滞纳吸附能力不一样,根据文献[17,18]的研究结果表明,针叶树种比阔叶树种叶片吸附能力强,灌木树种吸附能力要好于乔木树种,而在针叶树种中,松类要好于柏类. 这与本研究结果相似,但是也有相关文献认为乔木树种吸附能力要高于灌木树种,如 EL-Khatib 等^[19]选取了 3 种不同叶片形态的树种圆柏(*Juniperus chinensis*)、黑桑(*Morus nigra*)和无花果(*Ficus carica*),研究结果认为无花果吸附能力介于柏和黑桑之间. 因此在

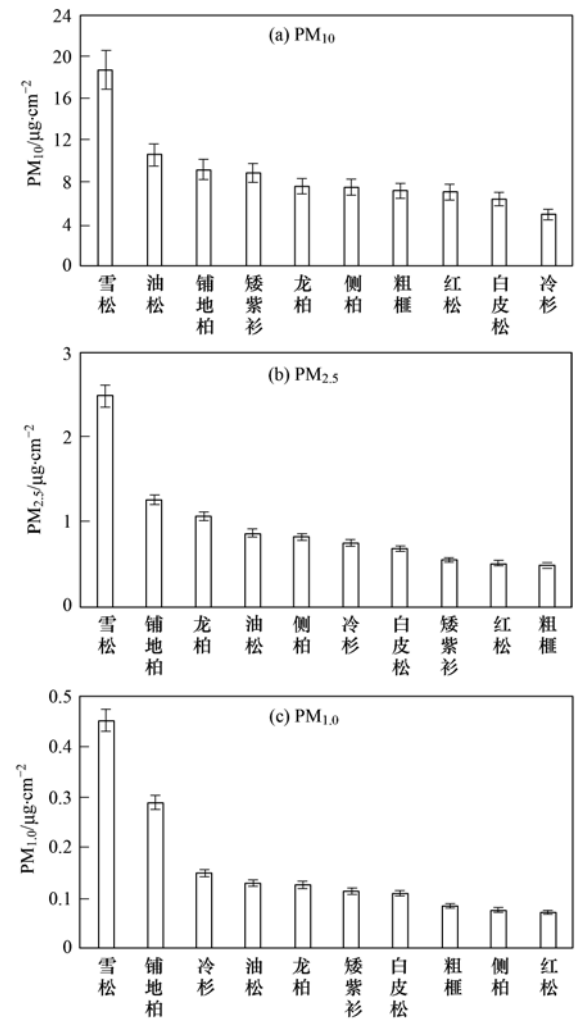


图3 不同树种叶片对不同粒径颗粒物附着能力
Fig. 3 Adhesion ability of leaves of different species for particulates with different size particles

表3 叶片附着不同粒径颗粒物占总颗粒物(TSP)的比例

树种	4 月		5 月		6 月	
	PM ₁₀ 比例/%	PM _{2.5} 比例/%	PM ₁₀ 比例/%	PM _{2.5} 比例/%	PM ₁₀ 比例/%	PM _{2.5} 比例/%
雪松	73.88	9.89	77.58	13.70	83.53	9.42
油松	62.47	4.07	73.92	6.09	79.52	8.97
龙柏	72.37	3.47	77.16	9.16	58.31	6.56
侧柏	77.16	3.47	69.24	3.66	80.45	6.91
铺地柏	77.41	8.09	79.64	11.44	69.03	11.04
粗榧	63.79	4.13	71.11	3.22	67.12	11.89
红松	63.14	3.76	71.28	4.14	65.05	5.72
白皮松	60.85	5.51	73.66	3.31	72.33	13.96
冷杉	63.30	5.96	68.98	14.41	43.45	3.71
矮紫杉	62.64	4.38	69.04	2.91	77.47	6.82

(*Cupressocyparis × leylandii*) 进行相同时间内不同地点叶片移除大气颗粒物能力研究,结果表明相同树种对 PM₁₀ 吸附能力在不同地方不同时间内会有变化,相同时间内同一树种在马路边上吸滞 PM₁₀ 的量

总体灌木树种是否高于乔木树种,要根据具体情况具体分析,主要的原因与当地的污染物和树种特性有关.

3.2 不同树种吸滞颗粒物影响因素

由于测试结果受采样地、采样时间、采样部位和试验环境等多种因素的影响,不同地点所测结果数值和变化趋势可能有差别,但是比较柴一新等^[14]、Freer-Smith 等^[20]和康博文等^[21]的研究可以发现,尽管测试环境条件差异很大,但植物叶片的颗粒物附着密度排序基本一致. 基本是松类单位叶片附着密度大于柏类. 还认为树种间滞尘能力的差异是由叶片的形态结构特征决定的. 植物叶片滞尘能力主要与其叶表面的绒毛、纹理、自由能、分泌物、蜡质等形态结构有密切关联,受其他因素影响较小,颗粒物的附着能力具有一定的稳定性. 近年来,围绕叶片的形态解剖学特征和叶片结构方面,对植物防止大气污染物进入体内的机制和不同树种滞尘能力进行了相关研究. 在微形态结构研究方面,通过王蕾等^[22]和齐飞燕等^[23]研究结果发现,认为具有沟槽和小室微形态结构的叶片对颗粒物附着有利,齐飞燕还发现绒毛结构能够增加叶片表面滞留大气颗粒物的能力.

3.3 不同树种吸滞颗粒物时间变化

不同树种吸收滞纳颗粒物随时间变化与当地污染物种类来源以及当地气候条件有关. Beckett 等^[15]选取治痢花椒 (*Sorbus aria*)、栓皮槭 (*Acer campestre*)、三角杨 (*Populus deltoides*)、科西嘉松 (*Pinus nigra* var. *maritime*)、杂交金柏

比在污染较轻的公园内大 2~3 倍,而同种树种在不同地点对 PM_{2.5} 的吸滞量则相差不多,表明相同树种对 PM₁₀ 吸滞量受地点和污染情况影响较大,而对 PM_{2.5} 的影响较小,与本研究结果相符.

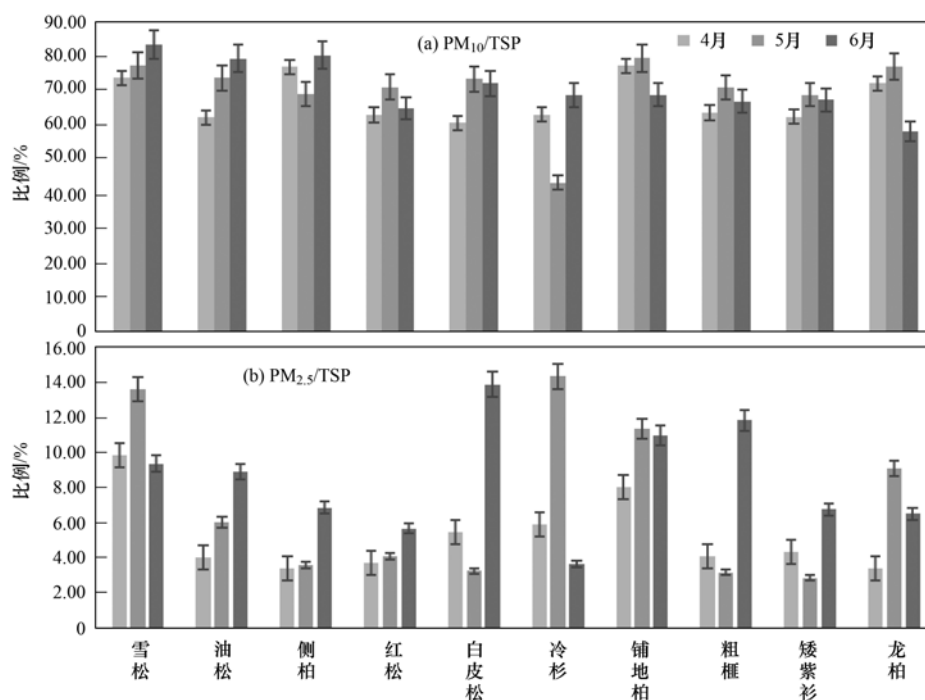


图4 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 在 4~6 月占 TSP 的比例

Fig. 4 Proportions of PM_{10} and $PM_{2.5}$ in TSP in April-June

目前对不同树种滞纳颗粒物的能力定量与定性研究,宏观与微观相结合的研究较少报道,因此在未来的研究中,可根据气候的差异性划分不同区域,筛选区域代表树种,并对比各代表树种对颗粒物的阻滞吸收的效果,确定各区域利于吸滞颗粒物的优势树种,还应对吸滞效果显著的具体树种进行定量分析,明确各个树种单位面积上颗粒物的滞留数和滞留量^[24,25]。最后,根据树种滞留颗粒物能力的排名,选择相应的树种来治理北京等发生雾霾严重的城市,减少交通等人为活动排放到大气中的污染物,进而通过有效地种植计划 and 设计来保护脆弱的城市生态区。

4 结论

(1) 总颗粒物(TSP)附着密度在不同树种之间存在差异,10种植物叶片颗粒物附着密度由高到低依次雪松>油松>紫矮杉>铺地柏>龙柏>粗榧>红松>侧柏>白皮松>冷杉。根据测试结果树种叶片表面单位面积附着密度最高的是雪松和油松。

(2) 不同树种叶片对不同粒径颗粒物的附着能力也不同,对 PM_{10} 附着能力最强的树种是油松和雪松,对 $PM_{2.5}$ 附着能力最强的树种是雪松、铺地柏、龙柏和油松,对 $PM_{1.0}$ 附着能力最强的树种是雪松、铺地柏、冷杉和油松。

(3) 根据本文测试的结果在 4~6 月之间,叶片上附着的 PM_{10} 占 TSP 主要有两种变化趋势,分别是上升后下降和先下降后上升趋势,而 $PM_{2.5}$ 则无这种变化趋势。其中乔木树种则主要表现为逐渐上升,而灌木树种则表现为先上升后下降。主要的原因是 4、5 月是北京一年中风沙最多的月份,离地面较近的灌木树种更容易吸附因大风引起的地面扬尘;6 月北京市进入多雨季节,雨水对叶片上滞留的颗粒物起到了冲刷的作用。

致谢:感谢北京植物园和北京市农林科学院对本研究的支持,非常感谢陈波助理研究员和汪劲松博士在论文写作和修改过程中给予的帮助。

参考文献:

- [1] 张大年. 城市大气可吸入颗粒物的研究[J]. 上海环境科学, 1999, 18(4): 154-157.
- [2] 蒋红梅, 王定勇. 大气可吸入颗粒物的研究进展[J]. 环境科学动态, 2001, (1): 11-15.
- [3] 杨新兴, 尉鹏, 冯丽华. 大气颗粒物 $PM_{2.5}$ 及其源解析[J]. 前沿科学, 2013, 7(2): 12-19.
- [4] 刘泽常, 王志强, 李敏, 等. 大气可吸入颗粒物研究进展[J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2004, 23(4): 97-100.
- [5] 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]. 生态学报, 2013, 32(8): 2203-2210.
- [6] Nowark 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**: 395-402.
- [7] 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.
- [8] 张志丹, 席本野, 曹治国, 等. 植物叶片吸滞 $PM_{2.5}$ 等大气颗粒物定量研究方法初探——以毛白杨为例[J]. *应用生态学报*, 2014, **25**(8): 2238-2242.
- [9] Nowak D J, Crane D E, Stevens J C. Air pollution removal by urban trees and shrubs in the united states[J]. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2006, **4**(3-4): 115-123.
- [10] Matsuda K, Fujimura Y, Hayashi K, *et al.* Deposition velocity of $PM_{2.5}$ sulfate in the summer above a deciduous forest in central Japan[J]. *Atmospheric Environment*, 2010, **44**(36): 4582-4587.
- [11] 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.
- [12] Tomašević M, Vukmirović Z, Rajšić S, *et al.* Characterization of trace metal particles deposited on some deciduous tree leaves in an urban area[J]. *Chemosphere*, 2005, **61**(6): 753-760.
- [13] Mitchell R, Maher B A, Kinnersley R. Rates of particulate pollution deposition onto leaf surfaces: Temporal and inter-species magnetic analyses[J]. *Environmental Pollution*, 2010, **158**(5): 1472-1478.
- [14] 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.
- [15] Beckett P K, Freer-Smith P H, Taylor G. Effective tree species for local air quality management[J]. *Journal of Arboriculture*, 2000, **26**: 12-19.
- [16] Zheng M, Salmon L G, Schauer J J, *et al.* Seasonal trends in $PM_{2.5}$ source contributions in Beijing, China[J]. *Atmospheric Environment*, 2005, **39**(22): 3967-3976.
- [17] Dzierżanowski K, Popek R, Gawroński H, *et al.* Deposition of particulate matter of different size fractions on leaf surfaces and in waxes of urban forest species [J]. *International Journal of Phytoremediation*, 2011, **13**(10): 1037-1046.
- [18] Sæbø A, Popek R, Nawrot B, *et al.* Plant species differences in particulate matter accumulation on leaf surfaces[J]. *Science of the Total Environment*, 2012, **427-428**: 347-354.
- [19] EL-Khatib A A, El-Rahman A M, Elsheikh O M. Leaf geometric design of urban trees: potentiality to capture airborne particle pollutants[J]. *Journal of Environmental Studies*, 2011, **7**: 49-59.
- [20] Freer-Smith P H, El-Khatib A A, Taylor G. Capture of particulate pollution by trees: a comparison of species typical of semi-arid areas (*Ficus nitida* and *Eucalyptus globulus*) with European and North American species[J]. *Water, Air, and Soil Pollution*, 2004, **155**(1-4): 173-187.
- [21] 康博文, 刘建军, 王得祥, 等. 陕西 20 种主要绿化树种滞尘能力的研究[J]. *陕西林业科技*, 2003, (4): 54-56.
- [22] 王蕾, 高尚玉, 刘连友, 等. 北京市 11 种园林植物滞留大气颗粒物能力研究[J]. *应用生态学报*, 2006, **17**(4): 597-601.
- [23] 齐飞艳, 朱彦锋, 赵勇, 等. 郑州市园林植物滞留大气颗粒物能力的研究[J]. *河南农业大学学报*, 2009, **43**(3): 256-259.
- [24] 云慧, 何凌燕, 黄晓锋, 等. 深圳市 $PM_{2.5}$ 化学组成与时空分布特征[J]. *环境科学*, 2013, **34**(4): 1245-1251.
- [25] 吴海龙, 余新晓, 师忱, 等. $PM_{2.5}$ 特征及森林植被对其调控研究进展[J]. *中国水土保持科学*, 2012, **10**(6): 116-122.

CONTENTS

Size Distribution Characteristics of Particulate Mercury on Haze and Non-haze Days	ZHU Qiong-yu, CHENG Jin-ping, WEI Yu-qing, <i>et al.</i> (373)
Impact of Atmospheric Pollutants Transport Pathways on Aerosol Optical Properties at Shangdianzi Background Station	PU Wei-wei, SHI Xue-feng, MA Zhi-qiang, <i>et al.</i> (379)
Chemical Characteristics of 3-year Atmospheric Precipitation in Summer, Taiyuan	GUO Xiao-fang, CUI Yang, WANG Kai-yang, <i>et al.</i> (388)
Pollution Characteristics of Organic and Elemental Carbon in PM _{2.5} in Taiyuan	LIU Shan, PENG Lin, WEN Yan-ping, <i>et al.</i> (396)
Levels and Distribution of Organochlorine Pesticides and Dioxin-Like Polychlorinated Biphenyls in Atmospheric Particulates in Xining and Tianjun, Qinghai Province, China	LI Qiu-xu, HE Chang, MA Zhao-hui, <i>et al.</i> (402)
Particulate Matter Adsorption Capacity of 10 Evergreen Species in Beijing	WANG Bing, ZHANG Wei-kang, NIU Xiang, <i>et al.</i> (408)
Carbon Sources Metabolic Characteristics of Airborne Microbial Communities in Constructed Wetlands	SONG Zhi-wen, WANG Lin, XU Ai-ling, <i>et al.</i> (415)
Spatial Distribution Characteristics of the Physical and Chemical Properties of Water in the Kunes River After the Supply of Snowmelt During Spring	LIU Xiang, GUO Ling-peng, ZHANG Fei-yun, <i>et al.</i> (421)
Composition Characteristics and Source Analysis of Major Ions in Four Small Lake-watersheds on the Tibetan Plateau, China	LI He, LI Jun, LIU Xiao-long, <i>et al.</i> (430)
Seasonal Stratification and Eutrophication Characteristics of a Deep Reservoir, Longtan Reservoir in Subtropical Area of China	ZHANG Lei, LI Qiu-hua, HUANG Guo-jia, <i>et al.</i> (438)
Phosphorus Fractions, Sorption Characteristics and Its Release in the Sediments of Yangtze Estuary Reservoir, China	JIN Xiao-dan, WU Hao, CHEN Zhi-ming, <i>et al.</i> (448)
Spatial-Temporal Distributions of Dissolved Inorganic Carbon and Its Affecting Factors in the Yellow River Estuary	GUO Xing-sen, LÜ Ying-chun, SUN Zhi-gao, <i>et al.</i> (457)
Distributions of Phosphorus Fractions in Suspended Sediments and Surface Sediments of Tiaoxi Mainstreams and Cause Analysis	CHEN Hai-long, YUAN Xu-yin, WANG Huan, <i>et al.</i> (464)
Characteristics of Nitrogen Pollution and the Potential Mineralization in Surface Sediments of Dianchi Lake	MENG Ya-yuan, WANG Sheng-rui, JIAO Li-xin, <i>et al.</i> (471)
Influence of Transient Storage on Solute Transport and the Parameter Sensitivity Analysis in a Suburban Drainage Ditch	LI Ru-zhong, QIAN Jing, DONG Yu-hong, <i>et al.</i> (481)
Sources, Pollution Statue and Potential Ecological Risk of Heavy Metals in Surface Sediments of Aibi Lake, Northwest China	ZHANG Zhao-yong, Jilili Abuduwaili, JIANG Feng-qing (490)
Speciation Distribution and Risk Assessment of Heavy Metals in Sediments in Suburban Outfall of Industrial Oasis Region	ZANG Fei, WANG Sheng-li, NAN Zhong-ren, <i>et al.</i> (497)
Assessment of Sources, Spatial Distribution and Ecological Risk of Heavy Metals in Soils in a Typical Industry-based City of Shandong Province, Eastern China	DAI Bin, LÜ Jian-shu, ZHAN Jin-cheng, <i>et al.</i> (507)
Removal of Triclosan with the Method of UV/ClO ₂ and Its Degradation Products	LI Yu-ying, HE Wen-long, LI Qing-song, <i>et al.</i> (516)
Mechanism of Groundwater As(V) Removal with Ferric Flocculation and Direct Filtration	KANG Ying, DUAN Jin-ming, JING Chuan-yong (523)
Preparation of Nano Zero-valent Iron/ <i>Sargassum horneri</i> Based Activated Carbon for Removal of Cr(VI) from Aqueous Solution	ZENG Gan-ming, WU Xiao, ZHENG Lin, <i>et al.</i> (530)
Adsorption of Cr(VI) on Magnetic Graphene from Aqueous Solution	LIU Wei, YANG Qi, LI Bo, <i>et al.</i> (537)
Adsorption of the TiO ₂ @Yeast Composite Microspheres for Adsorbing Fluorescent Whitening Agent-VBL in Fixed Bed	WU Fei, ZHANG Kai-qiang, BAI Bo, <i>et al.</i> (545)
Preparation and Pb ²⁺ Electrosorption Characteristics of MnO ₂ /CFP Composite Electrode	LIU Fang-yuan, HU Cheng-zhi, LI Yong-feng, <i>et al.</i> (552)
Preparation of Weak Light Driven TiO ₂ Multi Composite Photocatalysts via Adsorption Phase Synthesis	WANG Ting, ZHU Yi-chen, SUN Zhi-xuan, <i>et al.</i> (559)
Photoelectrocatalytic Degradation of Bisphenol A in Water by Fe Doped-TiO ₂ Nanotube Arrays Under Simulated Solar Light Irradiation	XIANG Guo-liang, YU Ze-bin, CHEN Ying, <i>et al.</i> (568)
Oxidation of Cationic Red 3R in Water with H ₂ O ₂ Catalyzed by Mineral Loaded with Fe/Co	MA Nan, LIU Hua-bo, XIE Xin-yuan (576)
Characteristics of Acid Red 3R Wastewater Treatment by Ozone Microbubbles	ZHANG Jing, DU Ya-wei, LIU Xiao-jing, <i>et al.</i> (584)
Effects of Carbon Sources, Temperature and Electron Acceptors on Biological Phosphorus Removal	HAN Yun, XU Song, DONG Tao, <i>et al.</i> (590)
Startup, Stable Operation and Process Failure of EBPR System Under the Low Temperature and Low Dissolved Oxygen Condition	MA Juan, LI Lu, YU Xiao-jun, <i>et al.</i> (597)
Effects of Dissolved Oxygen in the Oxidative Parts of A/O Reactor on Degradation of Organic Pollutants and Analysis of Microbial Community for Treating Petrochemical Wastewater	DING Peng-yuan, CHU Li-bing, ZHANG Nan, <i>et al.</i> (604)
Isolation of Filamentous Fungi Capable of Enhancing Sludge Dewaterability and Study of Mechanisms Responsible for the Sludge Dewaterability Enhancement	ZHOU Yu-jun, FU Hao-yi, FAN Xian-feng, <i>et al.</i> (612)
Impacts of Alkaline Thermal Treatment on Characteristics of Sludge from Sewage Treatment Plant	YANG Shi-dong, CHEN Xia, LIU Cao, <i>et al.</i> (619)
Responses of Ecosystem Carbon Budget to Increasing Nitrogen Deposition in Differently Degraded <i>Leymus chinensis</i> Steppes in Inner Mongolia, China	QI Yu-chun, PENG Qin, DONG Yun-she, <i>et al.</i> (625)
Impacts of Elevated Ozone Concentration on N ₂ O Emission from Arid Farmland	WU Yang-zhou, HU Zheng-hua, LI Cen-zi, <i>et al.</i> (636)
Multi-Year Measurement of Soil Respiration Components in a Subtropical Secondary Forest	LIU Yi-fan, CHEN Shu-tao, HU Zheng-hua, <i>et al.</i> (644)
Spatial Variability of Soil Nitrogen and Related Affecting Factors at a County Scale in Hilly Area of Mid-Sichuan Basin	LUO You-lin, LI Qi-quan, WANG Chang-quan, <i>et al.</i> (652)
Effects of Land Use Change on Soil Active Organic Carbon in Deep Soils in Hilly Loess Plateau Region of Northwest China	ZHANG Shuai, XU Ming-xiang, ZHANG Ya-feng, <i>et al.</i> (661)
Carbon Source Metabolic Diversity of Soil Microbial Community Under Different Climate Types in the Area Affected by Wenchuan Earthquake	ZHANG Guang-shuai, LIN Yong-ming, MA Rui-feng, <i>et al.</i> (669)
Optimization of Electrode Configuration in Soil Electrokinetic Remediation	LIU Fang, FU Rong-bing, XU Zhen (678)
Distribution and Health Risk of HCHs and DDTs in a Contaminated Site with Excavation	ZHANG Shi-lei, XUE Nan-dong, YANG Bing, <i>et al.</i> (686)
Transformation and Mobility of Arsenic in the Rhizosphere and Non-Rhizosphere Soils at Different Growth Stages of Rice	YANG Wen-tao, WANG Ying-jie, ZHOU Hang, <i>et al.</i> (694)
Extraction of Plant Root Apoplast Solution; A Case Study with Polycyclic Aromatic Hydrocarbons	ZHU Man-dang, DU Jiang-xue, YUE Le, <i>et al.</i> (700)
Mechanism of Manganese Binding to Leaf Cell Wall of <i>Phytolacca americana</i> L.	XU Xiang-hua, LIU Cui-ying, LI Ping, <i>et al.</i> (706)
Degradation Characteristics of Naphthalene with a <i>Pseudomonas aeruginosa</i> Strain Isolated from Soil Contaminated by Diesel	LIU Wen-chao, WU Bin-bin, LI Xiao-sen, <i>et al.</i> (712)
Toxic Effects of CdSe/ZnS QDs to Zebrafish Embryos	CHEN Mu-fei, HUANG Cheng-zhi, PU De-yong, <i>et al.</i> (719)
Physiological Response of <i>Neocaridina denticulata</i> to the Toxicity of Cu ²⁺ and Chlorpyrifos	LI Dian-bao, ZHANG Wei, WANG Li-qing, <i>et al.</i> (727)
Determination of Anilines in Environmental Water Samples by Simultaneous Derivatization and Ultrasound Assisted Emulsification Microextraction Combined with Gas Chromatography-Flame Ionization Detectors	TIAN Li-xun, DAI Zhi-xi, WANG Guo-dong, <i>et al.</i> (736)
Adsorption of Calcium Ion from Aqueous Solution Using Na ⁺ -Conditioned Clinoptilolite for Hot-Water Softening	ZHANG Shuo, WANG Dong, CHEN Yuan-chao, <i>et al.</i> (744)
Construction and Application of Economy-Pollution-Environment Three-Dimensional Evaluation Model for District	FAN Xin-gang, MI Wen-bao, MA Zhen-qing (751)

《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)

2015年2月15日 第36卷 第2期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 2 Feb. 15, 2015

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: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行