

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心
■ 出版 科学出版社



2020

Vol.41 No.10
第41卷 第10期

目次

青岛春节期间大气污染特征及烟花燃放一、二次贡献分析	方天歌, 姚小红, 孟赫, 陈春强 (4345)
基于在线观测的天津市 PM _{2.5} 污染特征及来源解析	肖致美, 徐虹, 李立伟, 李鹏, 元洁, 唐邈, 杨宁, 郑乃源, 陈魁 (4355)
2017~2018年北京大气 PM _{2.5} 中水溶性无机离子特征	李欢, 唐贵谦, 张军科, 刘琴, 闫广轩, 程萌田, 高文康, 王迎红, 王跃思 (4364)
北京南部城区 PM _{2.5} 中碳质组分特征	董贵明, 唐贵谦, 张军科, 刘琴, 闫广轩, 程萌田, 高文康, 王迎红, 王跃思 (4374)
成都市冬季3次灰霾污染过程特征及成因分析	冯小琼, 陈军辉, 尹寒梅, 徐雪梅, 熊文朋, 梅林德, 钱骏, 刘政 (4382)
南京北郊黑碳气溶胶分布特征及来源	谢锋, 林煜棋, 宋文怀, 鲍孟盈, 章炎麟 (4392)
2019年10~12月京津冀及周边“2+26”城市重污染减排效果评估	朱媛媛, 高愈霄, 汪巍, 鲁宁, 许荣, 刘冰, 李健军 (4402)
保定市大气污染变化趋势及特征	苟银寅, 张凯, 李金娟, 吕文丽, 竹双, 黎洁, 何珊珊, 郑悦, 支敏康 (4413)
郑州市 VOCs 组分排放清单及其臭氧生成潜势	卢轩, 张瑞芹, 韩跃钢 (4426)
郑州市少数民族运动会期间 O ₃ 及 VOCs 污染特征的演变和评估	赵金帅, 于世杰, 王楠, 马双良, 王维思, 尹沙沙, 李一丹, 张栋, 张瑞芹 (4436)
我国木器涂料及汽车涂料中挥发性有机物特征	柯云婷, 孙宇航, 成海荣, 刘锐源, 黄皓旻, 范丽雅, 叶代启 (4446)
典型脱硫工艺对燃煤锅炉烟气颗粒物的影响	张进生, 吴建会, 吕瑞鹤, 宋丹林, 黄凤霞, 张裕芬, 冯银厂 (4455)
不同居民燃煤炉具大气污染物排放差异性及减排分析	张熠晨, 薛陈利, 刘杰, 钟连红, 薛亦峰 (4462)
天津市 2017 年移动源高分辨率排放清单	刘庚, 孙世达, 孙露娜, 金嘉欣, 房键旭, 宋鹏飞, 王婷, 吴琳, 毛洪钧 (4470)
四川省基于第二次污染源普查数据的人为源大气污染源排放清单及特征	徐晨曦, 陈军辉, 李媛, 何敏, 冯小琼, 韩丽, 刘政, 钱骏 (4482)
抗大气复合污染的城市森林植物初步筛选	李品, 卫妍妍, 冯兆忠 (4495)
宝鸡市绿植叶片重金属空间分布及污染特征	张军, 梁青芳, 高煜 (4504)
潮汕地区入海河流及水生生物中 PPCPs 分布特征及风险评估	秀措, 王尘辰, 吕永龙, 陆轶峰, 王聪, 张梦, 曹祥会 (4514)
泉州山美水库及入库河流沉积物中多溴二苯醚的时空分异和降解分析	韩文亮, 刘豫, 冯凯文 (4525)
长江上游典型山地农业小流域浅层地下水硝态氮时空变异特征及影响因素	江南, 周明华, 李红, 李子阳, 章熙峰, 朱波 (4539)
沱江流域典型农业小流域氮和磷排放特征	王宏, 徐娅玲, 张奇, 林超文, 翟丽梅, 刘海涛, 蒲波 (4547)
基于 DPeRS 模型的海河流域面源污染潜在风险评估	冯爱萍, 王雪蕾, 徐逸, 黄莉, 吴传庆, 王昌佐, 王洪亮 (4555)
降水空间异质性对非点源关键源区识别面积变化的影响	高晓曦, 左德鹏, 马广文, 徐宗学, 胡小红, 李佩君 (4564)
硅藻群落指示的近 50 年来大理西湖湖泊生态系统演变规律	张晨雪, 徐敏, 董一凡, 王荣, 方凤满 (4572)
海陆交互带土壤及河流沉积物中镉含量及形态分布特征	王芳婷, 陈植华, 包科, 赵信文, 孟宪萌, 黄长生 (4581)
内蒙古河套灌区排水干沟微塑料赋存特征及质量估算	王志超, 杨帆, 杨文焕, 李卫平, 杨建林, 秦一鸣, 李河 (4590)
透水/不透水格局特征对汇水单元径流污染的影响	姜智绘, 廖云杰, 谢文霞, 李佳, 房志达, 赵洪涛, 李叙勇 (4599)
铁铜双金属有机骨架 MIL-101(Fe, Cu) 活化双氧水降解染料性能	梁贺, 刘锐平, 安晓强, 刘会娟 (4607)
纳米 Cu ⁰ @Fe ₃ O ₄ 活化 PMS 降解对-硝基苯酚的协同反应机制	石清清, 蒲生彦, 杨犀 (4615)
紫外活化过硫酸盐降解水中三氯蔗糖动力学和机制	余韵, 陆金鑫, 吕贞, 彭明国, 徐彬焜, 杜尔登, 郑璐 (4626)
污水生物处理工艺低温下微生物种群结构	尚越飞, 王申, 宗倪, 杜海洲, 张鑫, 齐嵘, 杨敏 (4636)
不同 DN 与 PN-ANAMMOX 耦合工艺处理中晚期垃圾渗滤液的微生物群落分析	陆明羽, 李祥, 黄勇, 殷记强, 方文烨 (4644)
全程自养颗粒污泥快速启动及混合营养型脱氮性能分析	齐泽坤, 王建芳, 钱飞跃, 刘雨馨, 乔伟, 李小蝶 (4653)
不同低碳氮比废水中好氧颗粒污泥的长期运行稳定性	袁强军, 张宏星, 陈芳媛 (4661)
潮土细菌及真菌群落对化肥减量配施有机肥和秸秆的响应	吴宪, 王蕊, 胡荷, 修伟明, 李刚, 赵建宁, 杨殿林, 王丽丽, 王欣奕 (4669)
不同轮作模式下作物根际土壤养分及真菌群落组成特征	孙倩, 吴宏亮, 陈阜, 康建宏 (4682)
酒糟生物炭短期施用对贵州黄壤氮素有效性及细菌群落结构多样性的影响	张萌, 刘彦伶, 魏全全, 苟久兰 (4690)
稻油不同轮作模式对农田甲烷和氧化亚氮排放的影响	陈友德, 赵杨, 高杜娟, 罗先富, 崔婷, 童中权, 吴家梅 (4701)
解淀粉芽孢杆菌生物有机肥防控土壤氨挥发	杨亚红, 薛莉霞, 孙波, 张宝, 庄绪亮, 庄国强, 白志辉 (4711)
外源磷对镉胁迫下水稻生长及镉累积转运的影响	霍洋, 仇银燕, 周航, 胡雨丹, 邓鹏辉, 魏宾斌, 辜娇峰, 刘俊, 廖柏寒 (4719)
水稻不同生育期 As 胁迫下 As 累积关键生育期	邓鹏辉, 蔡雅琴, 周航, 刘雅, 杨文俊, 辜娇峰, 廖柏寒 (4726)
铅锌矿区玉米中重金属污染特征及健康风险评价	周艳, 万金忠, 李群, 黄剑波, 张胜田, 龙涛, 邓绍坡 (4733)
浙江省台州市电子垃圾拆解地多溴联苯醚浓度水平分布特征和迁移趋势	魏抱楷, 柳晨, 王英, 金军 (4740)
重庆市酉阳县南部农田土壤重金属污染评估及来源解析	王锐, 邓海, 严明书, 何忠库, 周皎, 梁绍标, 曾琴琴 (4749)
重庆市畜禽粪便及菜田土壤中四环素类抗生素生态风险评价	彭秋, 王卫中, 徐卫红 (4757)
《环境科学》征订启事 (4435)	
《环境科学》征稿简则 (4445)	
信息 (4606, 4625, 4732)	

抗大气复合污染的城市森林植物初步筛选

李品¹, 卫妍妍², 冯兆忠³

(1. 北京林业大学林学院, 北京 100083; 2. 北京化工大学化学工程学院, 北京 100029; 3. 南京信息工程大学应用气象学院, 南京 210044)

摘要: 大气复合污染成为我国最主要的城市病之一. 城市森林建设的植物选择除了达到景观要求和色彩效果外, 根据各城市需求选择对污染物综合抗性阈值大的树种, 成为当今环境污染背景下维持城市森林生态功能可持续发展的保障. 综合分析我国常见城市森林 537 种植物对二氧化硫、二氧化氮、氟化氢、氯气、臭氧和颗粒物这 6 种大气污染物的吸附吸收能力, 并对植物进行抗性赋值和综合因子分析, 得出对大气复合污染综合抗性能力较强的树种主要为桑树、侧柏和臭椿等; 对大气复合污染综合抗性中等的树种主要为毛白杨、五角枫、圆柏、山桃、垂柳、泡桐和油松等; 对大气复合污染综合抗性相对较弱的树种主要为刺槐、加杨、银杏、核桃、悬铃木、栎树、紫薇和连翘等. 根据中国南北方各城市气候背景、经济结构和空气污染特点, 因地制宜选择对当地主要空气污染物吸收量较大的植物种类, 充分发挥城市森林群落对复合空气污染物的最大净化效果.

关键词: 大气污染物; 臭氧; $PM_{2.5}$; 复合污染; 城市森林; 抗性等级; 植物筛选

中图分类号: X171 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2020)10-4495-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.202004038

Preliminary Screening for the Urban Forest Against Combined Air Pollution

LI Pin¹, WEI Yan-yan², FENG Zhao-zhong³

(1. College of Forestry, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 2. School of Chemical Engineering, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China; 3. School of Applied Meteorology, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China)

Abstract: Combined air pollution has become one of the most important city diseases in China. The construction of an urban forest not only needs landscape aesthetics, but also requires selecting a plant of high comprehensive tolerance threshold based on the needs of the ecological environment of each city, which has become a standard to maintain the sustainable development of the urban forest ecological function under environmental pollution. According to the comprehensive factor analysis of the sorption and absorption capacity of 537 plants to six air pollutants (i.e., sulfur dioxide, nitrogen dioxide, hydrogen fluoride, chlorine, ozone, and particulate matters), the results showed that the tree species with strong comprehensive tolerance ability to six air pollutants were *Morus alba*, *Platycladus orientalis*, and *Ailanthus altissima*; the tree species with medium comprehensive tolerance ability were *Populus tomentosa*, *Acer truncatum*, *Sabina chinensis*, *Amygdalus davidiana*, *Salix babylonica*, *Paulownia fortunei*, and *Pinus tabulaeformis*; the trees species with relatively weak comprehensive tolerance ability were *Robinia pseudoacacia*, *Populus × canadensis*, *Ginkgo biloba*, *Juglans regia*, *Platanus acerifolia*, *Koeleruteria paniculata*, *Lagerstroemia indica*, and *Forsythia suspensa*. According to the characteristics of climate, economic structure, and air pollutants of the cities in the north and south of China, the urban forest should be constructed using selected species with a strong comprehensive tolerance ability to achieve maximum purification effect of the urban forest ecological service function.

Key words: air pollutants; O_3 ; $PM_{2.5}$; combined pollution; urban forest; tolerance level; plant screening

由于我国快速城市化和工业化发展,以资源消耗为主的经济增长方式带来的高强度污染排放,使在发达国家经历百年的不同工业发展阶段的大气污染问题在我国以压缩的方式同时集中显现,呈现出传统煤烟型能源废气、机动车尾气和建筑施工扬尘等污染共存的新型大气复合污染特征^[1,2]. 2019 年我国有 48 个城市位于全球空气污染最严重的 100 个城市之列. 城市大气的污染物种类很多,主要的污染物有来自多种污染源排放的气态和颗粒态一次污染物如:二氧化硫(SO_2)、二氧化氮(NO_2)、氟化氢(HF)和氯气(Cl_2)等,经过大气化学系列反应生成臭氧(O_3)和颗粒物(PMs)等二次污染物^[3]. 其中, SO_2 、 NO_2 、 O_3 和PMs是目前中国环境空气质量监

测网的实时监测指标. 中国正面临冬季灰霾和夏季 O_3 的双重污染^[4],严重危害人体和城市生态系统的健康^[5].

城市植物通过体表特殊结构(如纤毛、沟状组织和分泌物等)将大气污染物滞留、附着和粘附等物理过程,以及通过植物叶片气孔对大气污染物同化、吸收和降解等生化过程^[6,7],达到净化空气的作用(图1). 不同种类植物,对一种或多种大气污染物的净化能力具有显著差异^[8,9]. 首先,植物通过其

收稿日期: 2020-04-04; 修订日期: 2020-04-16

基金项目: 国家自然科学基金项目(31870458); 国家重点研发计划项目(2017YFE0127700)

作者简介: 李品(1987~),女,博士,青年研究员,主要研究方向为环境变化的生态效应, E-mail: pinli@reces.ac.cn

体表绒毛状等结构将污染物滞留粘附一部分^[10], 然后剩余污染物由气孔吸收进入植物体内, 通过质外体和共质体内一系列解毒生化过程^[11], 对有毒有害物质进行转化降解, 后固化储存在植物器官内, 成为植物的一部分. 这个解毒过程对植物本身是一个消耗能量和受伤害的过程(图1), 当修复跨越极限阈值, 植物将不可避免地进入程序性细胞死亡, 从而表现出叶片坏死、提前脱落和植株早衰死亡^[12]; 而当植物能一直维持在修复阈值之内时, 植物将不停清除有毒物质, 对污染物形成一种固有的适应性代谢屏障. 因此, 修复阈值高的植物成为净化能力强的抗性种类, 而修复阈值低的植物则是净化能力弱的敏感性种类. 利用这一特点, 筛选对污染物抗性强的植物种类来绿化环境^[13], 满足居民环境需求、完善城市生态系统, 充分利用城市植物天然的功能缓解城市化进程中出现的诸多问题.

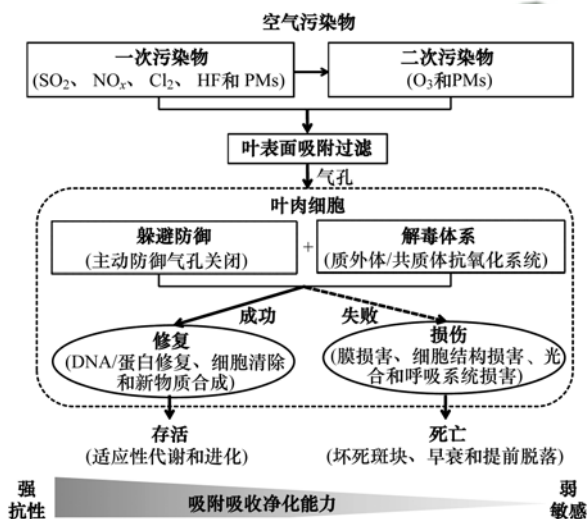


图1 植物对空气污染的响应过程概念框架

Fig. 1 Conceptual framework of the response process of plants response to air pollution

目前的研究主要通过人工熏气等控制实验研究不同浓度单一污染物对植物功能性状(叶片表观受害程度、组织解剖结构、元素含量、光合生理、生化代谢和生长发育等)的影响来判断植物对单一污染物的抗性/敏感性^[14,15]; 或者通过野外调查距离污染源不同远近的植物叶片受害症状及程度来判别植物的抗性^[12]. 然而, 前人大都针对单一污染物对1种或多种植物的若干生理指标的影响来开展实验, 如王兵等^[9]研究了北京10种常绿树种叶片吸附滞留大气颗粒物的能力; 缪宇明等^[16]研究了38种浙江园林绿化植物对 NO_2 的抗性及其吸收能力; 刘楠等^[17]从华南植物园72种城市绿化植物中筛选出抗 SO_2 的树种; Li等^[15]通过叶片首次出现受害症状的累积 O_3 浓度判定了29种常见绿化植物对 O_3 的敏

感性. 目前尚不清楚在实际有多种污染物混合的情况下, 哪些植物综合抗性较强可作为大气过滤器来提高城市空气质量. 本文通过集成不同种类植物对 SO_2 、 NO_2 、 HF 、 Cl_2 、 O_3 和 PMs 等6种大气污染物的净化能力研究, 计算每种植物对大气复合污染的综合抗性能力. 利用植物对多种污染物抗性阈值大的特点, 科学选择抗污和吸污绿化树种, 以期提升城市森林植被群落的生态服务功能可持续性提供参考.

1 材料与方法

1.1 数据集成

本文搜集了已公开发表的所有关于大气污染物对绿化植物影响的文献数据. 文献检索通过中国知网(CNKI, <http://www.cnki.net/>)和Web of Science(<http://apps.webofknowledge.com/>)进行. 搜索关键词为“绿化植物(greening plant)”、“大气污染(air pollution)”、“城市森林(urban forest)”、“二氧化硫(SO_2)”、“二氧化氮(NO_2)”、“臭氧(O_3)”、“颗粒物(particulate matter)”、“滞尘(adsorbing haze/dust)”、“氟化氢(HF)”和“氯气(Cl_2)”. 数据库包含73篇已发表的文献共有152科、331属和537种植物对 SO_2 、 NO_2 、 HF 、 Cl_2 、 O_3 和 PMs 等6种大气污染物的响应数据. 所有搜集的植物种类中, 有乔木316种、灌木155种和草本及藤本植物66种. 数据库包括植物种名、实验地点、叶片可见受害程度、光合生理参数(净光合速率、蒸腾速率和气孔导度等)、叶片滞尘量、叶片含硫量和含氮量, 以及文献给出的抗性等级等信息.

1.2 数据分析

文献中的评价指标包括: ①受害叶面积; ②叶片净光合速率、气孔导度和蒸腾速率等生理指标的下降率; ③叶片元素(硫、氮和氟等)含量的增加率和④叶片表面颗粒物吸附量. 采用数值1~10对537种植物吸附颗粒物或者吸收气体污染物的能力进行赋值, 共划分为5个抗性等级: 很强(赋值9和10)、强(赋值7和8)、中等(赋值5和6)、弱(赋值3和4)和很弱(赋值1和2). 由于不同文献用不同的评价指标对植物的抗性进行判定, 并且对于同一污染物, 不同实验设置的污染物浓度有差异, 导致所报道的相同树种的抗性会有所不同. 因此, 本文先根据文献中所得出的植物抗性进行赋值, 若出现对同一种植物有不同抗性时, 则对比两篇文献中实验的大气污染物浓度, 再结合实际大气环境的污染物浓度, 对植物的抗大气污染物能力进行赋值.

基于赋值数据, 对不同污染物组合的矩阵进行

因子分析,步骤为:首先实施方差最大的正交旋转对矩阵进行归一化处理,然后根据计算出的主因子特征根、方差贡献和因子得分,计算综合抗性得分,公式为:

$$s = \sum_{j=1}^p \sqrt{\lambda_j f_j} = \sqrt{\lambda_1 f_1} + \sqrt{\lambda_2 f_2} + \sqrt{\lambda_3 f_3} + \cdots + \sqrt{\lambda_p f_p}$$

式中, s 为某物种的综合得分, λ 为正交旋转后的方差贡献, f 为因子得分, j 为加和下界从1开始取数, p 为加和上界.综合得分大于0,代表具有抗性,得分越大,则植物抗性越强;综合得分小于0,代表植物不具有抗性,负值越大表示越敏感.

2 结果与分析

2.1 植物对单一污染物的抗性分类

表1显示SO₂和NO₂对城市植物的影响研究所包含的科属种类最多,其次是O₃和PMs, HF和Cl₂研究最少.按照植物功能类型划分,乔木平均占到所研究种类的69%,灌木占27%,草本及藤本占

8%.按照抗性等级划分,如对于SO₂来说,368种植物中抗性很强53种,抗性强102种,抗性中等101种,抗性弱55种,抗性很弱57种(表1).表2显示了每种污染物对应的每个抗性等级的植物名称,比如对SO₂抗性很强的植物有条柳、杜松和蜂斗菜等,对SO₂抗性很弱的植物有竹柏、长芒杜英和龙爪槐等.

2.2 植物对2种及以上组合污染物的抗性排序

2.2.1 对2种污染物的综合抗性

涉及2种污染物对相同植物的研究共4种组合(图2).其他两两污染物组合由于涉及到的植物种类很少,无法分析.

共有57种植物同时研究了对SO₂和NO₂的抗性(图2),其中28种植物对二者的共同污染具有抗性(综合抗性得分为正值),以黄槐、冬青、青冈栎、梾子花、红千层和苏铁的综合抗性最强;另外29种植物对二者的共同污染不具有抗性(综合抗性得分为负值),其中以赤果鱼木、糖胶树、长芒杜英、海南木莲、深山含笑、山木兰和五月茶的综合表现最敏感.

表1 6种污染物对城市植物影响的研究数量统计结果
Table 1 Number of urban plants responding to the six air pollutants

分类	项目	空气污染物类别					
		SO ₂	NO ₂	HF	Cl ₂	O ₃	PMs
生物学类型	科	118	84	55	23	65	52
	属	249	142	75	78	99	101
	种	368	182	98	106	136	134
功能类型	乔木	231	133	73	78	86	86
	灌木	112	40	25	28	33	48
	草本/藤本	25	9	—	—	17	—
抗性等级	高度抗性(很强)	53	33	17	12	13	18
	中度抗性(强)	102	52	20	49	32	41
	低度抗性(中等)	101	54	43	14	21	30
	中低敏感(弱)	55	31	4	14	5	26
	高度敏感(很弱)	57	12	14	17	65	19

共有34种植物同时研究了对SO₂和HF的抗性(图2),其中17种植物具有对二者的共同抗性,以博白大果油茶、大苞山茶、广西岑溪软枝茶、金花茶、普通油茶、香港茶、越南油茶和张氏红山茶等茶类植物的抗性最强;另外17种植物对二者的共同污染不具有抗性,其中以荷木、大叶厚皮香、樟子松、灰木莲和暴马丁香的敏感性最高.

共有38种植物同时研究了对SO₂和Cl₂的抗性(图2),其中27种植物具有对二者的共同抗性,抗性最高的有接骨草、美丽枕果榕、榕树、石栗和水榆;11种植物对二者的共同污染不具有抗性,综合表现最敏感的有荔枝、赤杨、文冠果、羽叶垂花树、沙楞、苦楝、厚壳和狗牙花.

共有39种植物同时研究了对SO₂和PMs的抗

性(图2),其中21种植物具有对二者的共同抗性,抗性最高的有南蛇藤、杜松、紫花锦鸡儿、黄刺玫和银老梅;另外18种植物对二者的共同污染不具有抗性,综合表现最敏感的有长白忍冬、洋丁香、华北绣线菊、水榆花楸、枫香、兴安鼠李和三裂叶绣线菊.

2.2.2 对3种污染物的综合抗性

涉及3种污染物对相同植物的研究共5种组合(图3).对O₃+NO₂+SO₂研究涉及共有植物5种,综合抗性强的植物排序依次为:秋枫、北京杨和香椿;不具有综合抗性的植物有鹅掌楸和大叶女贞.对PMs+NO₂+SO₂研究涉及共有植物13种,综合抗性强的植物排序依次为:法国梧桐、棕榈、紫藤、香樟、天竺桂和广玉兰;不具有综合抗性的植物有塔柏、桂花、雪松、柳杉、杜英、水杉和滇朴.对HF+

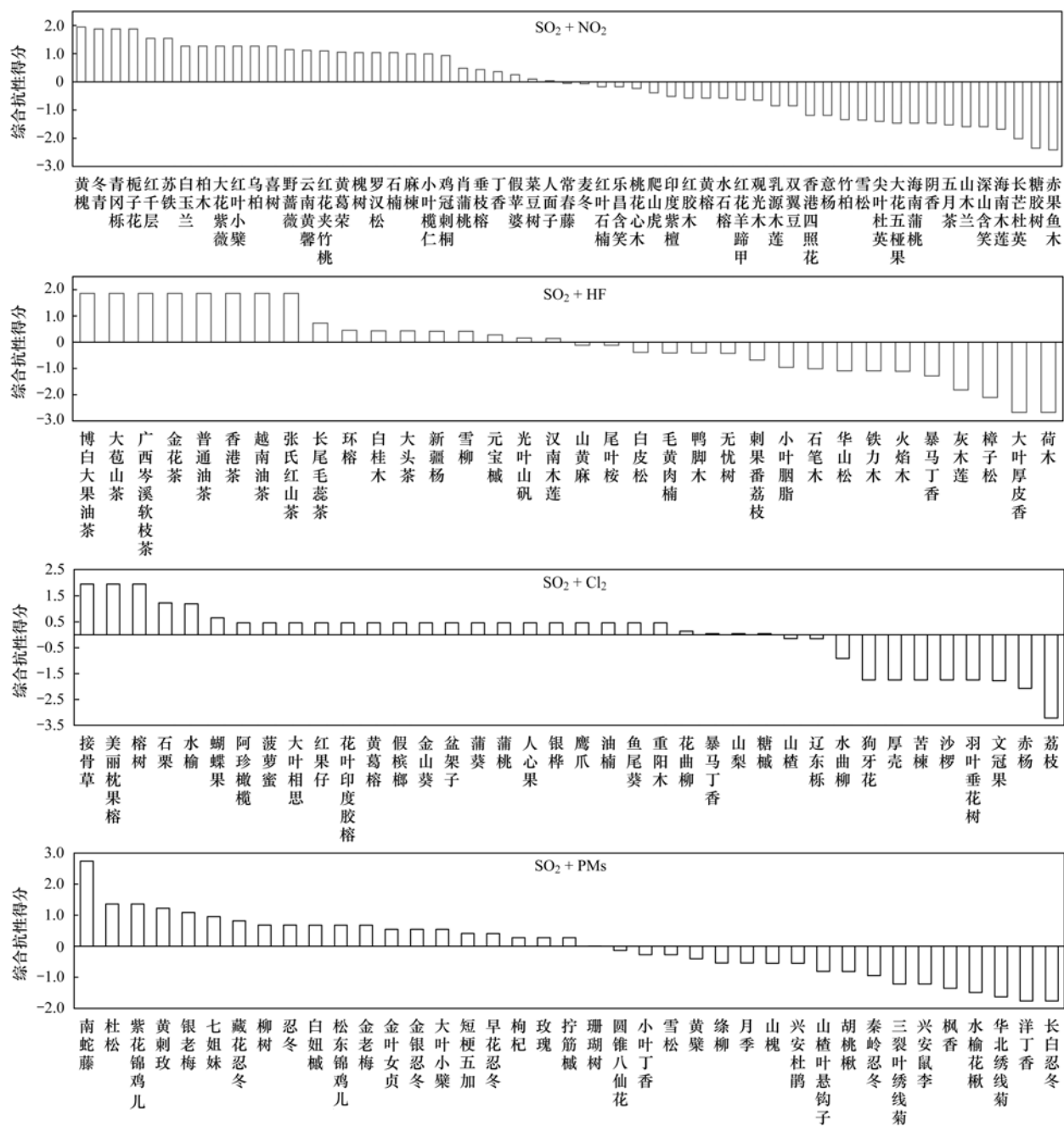


图 2 城市植物对 2 种污染物组合的综合抗性排序

Fig. 2 Rank of integrated tolerance of urban plants against two air pollutants combined

$\text{NO}_2 + \text{SO}_2$ 研究涉及共有植物 11 种,综合抗性强的植物排序依次为:傅园榕、小叶榕、密花树、红花银桦、仪花、竹节树和茶花;不具有综合抗性的植物有红花油茶、红花木莲、吊瓜树和灰莉。对 $\text{Cl}_2 + \text{NO}_2 + \text{SO}_2$ 研究涉及共有植物 5 种,综合抗性强的植物排序依次为:牛乳树和印度榕;不具有综合抗性的植物有樟树、台湾相思和朴树。对 $\text{Cl}_2 + \text{HF} + \text{SO}_2$ 研究涉及共有植物 7 种,综合抗性强的植物排序依次为:枣树、山杏和榆树;不具有综合抗性的植物有皂角、暴马丁香、沙松和稠李。

2.2.3 对 4 种污染物的综合抗性

涉及 4 种污染物对相同植物的研究共 3 种组合

(图 4)。对 $\text{O}_3 + \text{PMs} + \text{NO}_2 + \text{SO}_2$ 研究涉及共有植物 8 种,综合抗性强的植物排序依次为:无患子、三叶草和山茶花;不具有综合抗性的植物有红叶李、金银木、复羽叶栎树、黄馨和鸢尾。对 $\text{O}_3 + \text{HF} + \text{NO}_2 + \text{SO}_2$ 研究涉及共有植物 5 种,综合抗性强的植物排序依次为:馒头柳和白榆;不具有综合抗性的植物有黄花夹竹桃、火炬树和杜仲。对 $\text{PMs} + \text{HF} + \text{NO}_2 + \text{SO}_2$ 研究涉及共有植物 7 种,综合抗性强的植物排序依次为:小叶黄杨和白桦;不具有综合抗性的植物有紫丁香、卫矛、茶条槭、京桃和云杉。

2.2.4 对 6 种污染物的综合抗性

对所有 6 种污染物研究涉及共有植物 18 种(图

表 2 绿化植物对单一污染物的抗性等级划分名录

Table 2 List of species divided in five levels of tolerance against each air pollutant

污染物	抗性等级	植物名称
SO ₂	很强	绦柳、杜松、蜂斗菜、胶东卫矛、小叶黄杨、大地黄杨、条松、红花荷、金光菊、辽东栎、薰衣草、野蔷薇、油松、紫花锦鸡儿、八角金盘、博白大果油茶、桤柳、大苞山茶、冬青、短梗五加、法国梧桐、傅园榕、广西岑溪软枝茶、桧柏、红千层、槐树、黄槿、黄刺玫、黄槿、夹竹桃、接骨草、金花茶、柳树、罗汉松、馒头柳、美丽枕果榕、牛乳树、女贞、普通油茶、青冈栎、忍冬、榕树、色赤杨、石栗、石楠、苏铁、香椿、香港茶、印度榕、越南油茶、张氏红山茶、梔子花和棕榈
	强	加拿大杨、山桃、枣树、紫丁香、矮牵牛、白蜡、白玉兰、柏木、藏花忍冬、臭椿、串白、大花紫薇、杜鹃红山茶、粉红羊蹄甲、枸杞、红叶臭椿、红叶小檗、花曲柳、黄槐、黄皮桔、鸡冠刺桐、假苹婆、金叶女贞、金银忍冬、马褂木、玫瑰、绵毛水苏、木棉、拧筋槭、爬行卫矛、泡桐、山楂叶悬钩子、珊瑚树、石竹、水曲柳、水榆、温州蜜柑、乌柏、无患子、喜树、香樟、小叶朴、小叶榕、新疆杨、雪柳、杨树、仪花、银老梅、羽扇豆、玉兰、月季、紫藤、白榆、蝴蝶果、沙地柏、元宝槭、阿珍橄榄、白桂木、白姐槭、白树油树、柏树、菠萝蜜、侧柏、垂柳、大头茶、大叶相思、对叶榕、构树、汉南木莲、红果仔、红花银桦、花叶印度胶榕、黄葛榕、鸡蛋花、假槟榔、金山葵、麻楝、芒果、密花树、盆架子、菩提榕、蒲葵、蒲桃、七姐妹、秦岭忍冬、人心果、三叶草、桑树、松东锦鸡儿、天竺桂、肖蒲桃、小叶榄仁、银桦、鹰爪、油楠、鱼尾葵、圆柏、长尾毛蕊茶、重阳木、紫穗槐和紫薇
	中等	白桦、火炬树、加杨、板栗、北京杨、扁桃、茶花、刺槐、大叶小檗、杜仲、光叶山矾、广玉兰、桂花、国槐、核桃、红桂木、红花羊蹄甲、环榕、黄葛菜、毛白杨、毛地黄、秋枫、人面子、山茶花、山杏、石笔木、鼠尾草、水蜡、无忧树、五角枫、悬铃木、银杏、皂角、竹节树、高山榕、铁刀木、白丁香、暴马丁香、北海道黄杨、菜豆树、茶条槭、茶燕子、赤杨、稠李、垂枝榕、刺五加、大叶女贞、槲棠、吊瓜木、扶芳藤、复羽叶栎树、红花油茶、红胶木、红叶合欢、红叶李、华润楠、黄花夹竹桃、黄栌、黄榕、黄馨、幌伞枫、金老梅、金银木、京桃、冷杉、柳杉、柳叶绣线菊、龙柏、栎树、麦冬、毛黄肉楠、美青杨、七叶树、三裂叶绣线菊、沙松、山黄麻、山梨、山梅花、山木兰、深山含笑、柿树、水石榕、塔柏、糖槭、桃花心木、铁冬青、万寿菊、望春玉兰、尾叶桉、卫矛、蚊母、五叶地锦、兴安鼠李、鸭脚木、榆树、圆锥八仙花、云南黄馨、早花忍冬、樟树、长春蔓和紫荆
	弱	红花木莲、山楂、白皮松、刺果番荔枝、大叶紫薇、杜英、狗牙花、海南红豆、红叶石楠、厚壳、胡桃楸、金花风铃木、苦楝、腊肠树、乐昌含笑、朴树、乳源木莲、沙撈、双翼豆、水杉、台湾相思、五月茶、香港四照花、小叶丁香、雪松、洋槐、意杨、印度紫檀、羽叶垂花树、南蛇藤、丁香、观光木、火焰木、连翘、大花五桠果、峨眉附地菜、枫杨、海南蒲桃、厚皮香、蝴蝶树、华北珍珠梅、灰莉、柳叶楠、猫尾木、蒙桑、日本杜英、日本樱花、蜀葵、水榆花楸、文冠果、小叶白蜡、小叶胭脂、一串红、阴香和银白杨
	很弱	华山松、山玉兰、铁力木、本地火焰木、常春藤、赤果鱼木、滇朴、吊瓜树、多花山竹子、鹅掌楸、风箱果、枫香、海南木棉、华北绣线菊、灰木莲、尖叶杜英、金荞麦、金银花、锦带花、荔枝、凌霄、窿缘桉、美国红栌、爬山虎、苹果、山槐、藤蓼、月季、兴安杜鹃、印度第伦桃、印度黄椒、樱花、榆叶梅、鸢尾、云杉、樟子松、珍珠梅、紫花苜蓿、紫叶矮樱、阿丁枫、白木香、碧桃、大叶厚皮香、飞燕草、复叶槭、格木、海南木莲、荷木、家桑、长白忍冬、青麸杨、糖胶树、桃树、贴梗海棠、洋丁香、龙爪槐、长芒杜英和竹柏
NO ₂	很强	黄槐、云南黄馨、银杏、八角金盘、白榆、茶花、常春藤、臭椿、刺槐、丁香、冬青、傅园榕、桧柏、海棠、红翅槭、红花油茶、黄葛菜、黄花夹竹桃、金银木、馒头柳、毛白杨、密花树、女贞、青冈栎、五角枫、香椿、香樟、小蜡、圆柏、梔子花、竹节树、紫穗槐和棕榈
	强	广玉兰、夹竹桃、木槿、桑树、铁冬青、紫薇、白玉兰、柏木、垂柳、垂枝榕、大花紫薇、大叶女贞、吊瓜树、高山榕、构树、瓜子黄杨、红花银桦、红千层、红叶小檗、华棕、麻楝、牛乳树、爬山虎、披针叶茴香、水梔子、苏铁、台湾相思、乌柏、无患子、喜树、小叶榄仁、小叶榕、印度榕、油松、早红桂、紫藤、白蜡、红花夹竹桃、菜豆树、峨眉含笑、法国梧桐、复羽叶栎树、红叶石楠、鸡冠刺桐、株木、乐昌含笑、乐乐拟单性木兰、米老排、木荷、柠檬桉、菩提榕和三叶草
	中等	槐树、栎树、罗汉松、麦冬、石楠、肖蒲桃、北京杨、侧柏、观光木、桂花、红花木莲、火炬树、加杨、龙柏、美国枫香、泡桐、人面子、山茶花、塔柏、桃花心木、天竺桂、野蔷薇、印度紫檀、竹柏、木棉、仪花、扁桃、滇朴、杜鹃、鹅掌楸、海南红豆、海南木莲、核桃、红胶木、红色彩叶草、红叶李、黄榕、黄馨、灰莉、吉祥草、假苹婆、假苹婆、尖叶杜英、金边黄杨、金叶含笑、日香桂、乳源木莲、山桃、珊瑚朴、双翼豆、水石榕、狭叶四照花、榆叶梅、云山白兰和樟树
	弱	大花五桠果、杜英、杜仲、海南蒲桃、黑壳楠、红花檵木、红花羊蹄甲、红瑞木、黄色彩叶草、火棘、美国红枫、朴树、水杉、香港四照花、意杨、阴香、长芒杜英、柳杉、秋枫、雪松、凤尾丝兰、交让木、苦槠、芒果、山茶、速生金桂、糖胶树、五月茶、悬铃木、野含笑和早银桂
	很弱	赤果鱼木、大红花、复叶槭、黄蝉、火力楠、连翘、拟南芥、山木兰、深山含笑、湿地松、鸢尾和美人蕉
HF	很强	白榆、博白大果油茶、大苞山茶、广西岑溪软枝茶、金花茶、栎树、馒头柳、毛白杨、女贞、普通油茶、五角枫、香港茶、小叶黄杨、仪花、越南油茶、张氏红山茶和紫穗槐
	强	白桦、臭椿、傅园榕、红花银桦、连翘、密花树、木槿、桑树、山杏、小叶榕、榆树、玉兰、侧柏、桧柏、环榕、菩提榕、圆柏、枣树、长尾毛蕊茶和竹节树
	中等	白桂木、白皮松、茶花、垂柳、大头茶、杜仲、光叶山矾、核桃、红花油茶、火炬树、龙柏、泡桐、山黄麻、山桃、尾叶桉、悬铃木、银桦、银杏、茶条槭、刺果番荔枝、刺槐、汉南木莲、红花木莲、红松、山松、黄花夹竹桃、加杨、京桃、落叶松、毛黄肉楠、毛樱桃、沙松、铁力木、卫矛、小叶胭脂、新疆杨、雪柳、鸭脚木、元宝槭、云杉、皂角、紫丁香和紫薇
	弱	火焰木、无忧树、海南红豆和灰木莲
	很弱	暴马丁香、稠李、复叶槭、灰莉、苹果、石笔木、油松、榆叶梅、樟子松、紫薇、大叶厚皮香、吊瓜树、荷木和铁冬青
Cl ₂	很强	高山榕、黄槿、夹竹桃、接骨草、龙柏、美丽枕果榕、牛乳树、榕树、水黄皮、小叶黄杨、印度榕和紫穗槐、
	强	白桦、暴马丁香、臭椿、构树、京桃、木槿、桑树、山梨、山杏、山楂、水榆、糖槭、卫矛、榆树、玉兰、紫椴、阿珍橄榄、白蜡、扁桃、菠萝蜜、侧柏、刺槐、大叶相思、对叶榕、复叶槭、海南红豆、红果仔、蝴蝶果、花叶印度胶榕、黄葛榕、鸡蛋花、假槟榔、金山葵、芒果、女贞、盆架子、菩提榕、蒲葵、蒲桃、人心果、山桃、石栗、银桦、鹰爪、油楠、鱼尾葵、枣树、樟树和重阳木

续表 2

污染物	抗性等级	植物名称
Cl ₂	中等	板栗、毛白杨、泡桐、五角枫、悬铃木、桧柏、枫杨、桂香柳、花曲柳、糠椴、连翘、落叶松、文冠果和皂角
	弱	垂柳、狗牙花、核桃、厚壳、苦楝、木棉、朴树、沙樱、台湾相思、铁冬青、银杏、油松、羽叶垂花树和圆柏
	很弱	茶条槭、赤杨、稠李、大叶水榕、黄菠萝、加杨、荔枝、辽东栎、栎树、麻栎、苹果、日本赤松、沙松、水曲柳、云杉、紫丁香和紫薇
O ₃	很强	白榆、侧柏、垂柳、核桃、加杨、芦荟、馒头柳、毛白杨、桑树、葶状羊茅、五角枫、圆柏和紫穗槐
	强	凹叶厚朴、白楠、复叶槭、复羽叶栎树、红楠、厚朴、莢蒾、栎树、毛竹、泡桐、苹果、山桃、油松、浙江楠、八角枫、板栗、二球悬铃木、构树、国槐、荷花木兰、黄丹木姜子、黄花夹竹桃、黄檀、锦带花、连香树、毛凤椿、秋枫、櫻桃、樟树、浙江新木姜子、浙江樟和中华猕猴桃
	中等	北京杨、河津櫻、金银木、杨树、银杏、草地早熟禾、臭椿、杜仲、粉团、海州常山、红叶李、黄馨、火炬树、假明镜、苦楮、芒果、闽楠、山茶花、天目木姜子、悬铃木和鸢尾
	弱	木棉、白蜡、刺槐、三叶草和仙人掌
PMs	很弱	白三叶、博落回、大青、大叶女贞、地果、地锦、东京櫻花、椴树、鹅掌楸、钩锥、海滨木槿、海桐、寒櫻、合轴莢蒾、花桐木、黄兰、灰毛含笑、鸡树条、金丝桃、金叶含笑、聚花莢蒾、柯、连翘、麻栎、马尾松、毛八角枫、毛叶木姜子、米楮、牡荆、刨花楠、枇杷叶紫珠、葡萄、七叶树、千年桐、日本晚櫻、绒毛润楠、柔毛泡花树、山鸡椒、山榿、山莓、山梅花、山玉兰、湿地松、算盘子、梭罗树、乌药、舟山新木姜子、五叶地锦、香椿、湘楠、小叶白辛树、紫玉兰、新含笑、盐夫木、杨梅、宜昌楠、宜昌润楠、玉兰、长柄七叶树、长果秤锤树、长叶冻绿、楨楠、无患子、小叶女贞和紫楠
	很强	法国梧桐、白蜡、侧柏、板栗、垂柳、杜松、对叶榕、红皮云杉、黄刺玫、加杨、金老梅、木槿、七姐妹、桑树、天竺桂、银老梅、玉兰和紫花锦鸡儿
	强	小叶黄杨、白姐槭、藏花忍冬、茶条槭、春鹃、大叶黄杨、大叶小檗、枫杨、凤尾兰、构树、桧柏、国槐、落羽杉、山桃稠李、松东锦鸡儿、梧桐、圆柏、早花忍冬、紫藤、大叶樟、法国冬青、海桐、红花檫木、红松、黄褐榕、家榆、金叶女贞、金银忍冬、榉树、柳树、龙柏、龙抓槐、忍冬、三叶草、塔柏、无患子、细叶榕、悬铃木、杂交马褂木、棕榈和钻石海棠
	中等	臭椿、短梗五加、枸杞、旱柳、核桃、毛白杨、玫瑰、拧筋槭、泡桐、山槐、山桃、五角枫、小叶丁香、小叶女贞、兴安杜鹃、雪松、杨树、圆锥八仙花、紫薇、香樟、紫丁香、刺槐、复羽叶栎树、红叶李、栎树、山茶花、珊瑚树、意大利杨、银杏和油松
	弱	柳杉、女贞、卫矛、八角金盘、白桦、草本、刺五加、杜英、广玉兰、核桃楸、黄馨、连翘、水杉、榆叶梅、鸢尾、元宝枫、云杉、枫香、桂花、黄槿、加拿大杨、旱柳、金银木、美国山核桃、十大功劳和月季
	很弱	滇朴、东北山梅花、高山榕、华北绣线菊、黄杨、夹竹桃、京桃、南蛇藤、苹果、秦岭忍冬、洒金珊瑚、三裂叶绣线菊、山楂叶悬钩子、水榆花楸、绦柳、兴安鼠李、洋丁香、长白忍冬和柳叶榕

5). 综合抗性强的植物 10 种, 抗性排序依次为: 桑树、侧柏、臭椿、毛白杨、五角枫、圆柏、山桃、垂柳、泡桐和油松; 不具有抗性的植物 8 种, 敏感性排序依次为: 连翘、紫薇、栎树、悬铃木、核桃、银杏、加杨和刺槐.

3 讨论

居住在城市这个充满有害气体和灰尘的“大温室”里, 城市森林通过对有毒物质的吸附过滤作用和生理生化的代谢作用, 稀释、分解、吸收和富集大气中的污染物质, 净化空气, 减轻对人体健康的危害, 在维持城市生态平衡, 改善和缓解城市生态环境问题等方面起着无可替代的重要作用. 随着生态文明建设和构建“宜居城市”的要求, 需要更多的新优绿化树种来改善空气质量, 发挥更好的生态服务功能. 目前, 城市森林建设绿化植物选择时, 比较侧重于不同种类植物在各个季节所能营造的景观美学效果, 而对抗污染等特性的考察还较为欠缺^[18]. 而且, 过去我国对城市植物“适地适树”的认识, 多停留在对城市所处自然地理单元的环境差异, 因此乡土物种被认为是当地城市植物选择最适宜的潜在资源^[19]. 然而现今大气复合污染使得城市植物的生存环境受到威胁. 在过去“适地适树”的基础上, 需要

更加重视植物与城市栽植小环境的关系, 确定城市植物在当今城市大气环境中的生态位.

有研究表明, 污染物吸收能力较强的植物叶片中污染物的积累量与大气污染物的浓度成正比^[14, 20]. 比如, 通过对叶片中硫含量的化学分析, 不仅反映出大气中 SO₂ 的污染水平, 而且反映植物对大气 SO₂ 的吸收净化量. 傅园榕、竹节树等植物叶片中的 SO₂、NO₂ 和 HF 等平均污染物含量要高于对照区 2 ~ 21 倍不等^[20]. 臭椿吸收的 SO₂ 量可达其体内正常含量的 29.8 倍^[14]. 由于不同植物形态、叶量、叶面积、气孔属性和叶肉细胞生理生态特征等功能属性存在显著差异, 导致不同植物对污染物的吸收能力存在较大不同^[21].

对于落叶树种来说, 3 月开始萌发, 到 4 月底新叶基本长成, 生理功能基本完备, 5 ~ 7 月为高速生长期, 8 月下旬叶片开始逐渐衰老, 生理功能退化, 到 10 月下旬前后开始大量落叶. 与落叶树种的生理周期相对应, 春季刚生长的新生叶片对污染物的吸收能力强, 但由于生理功能处于完善期, 对污染物的转化能力较弱. 夏季是植物生理功能完备、生命活动最旺盛的时段, 也是对污染物吸收和转化能力最强的时段. 秋季树木叶片的生理功能出现退化, 生理活

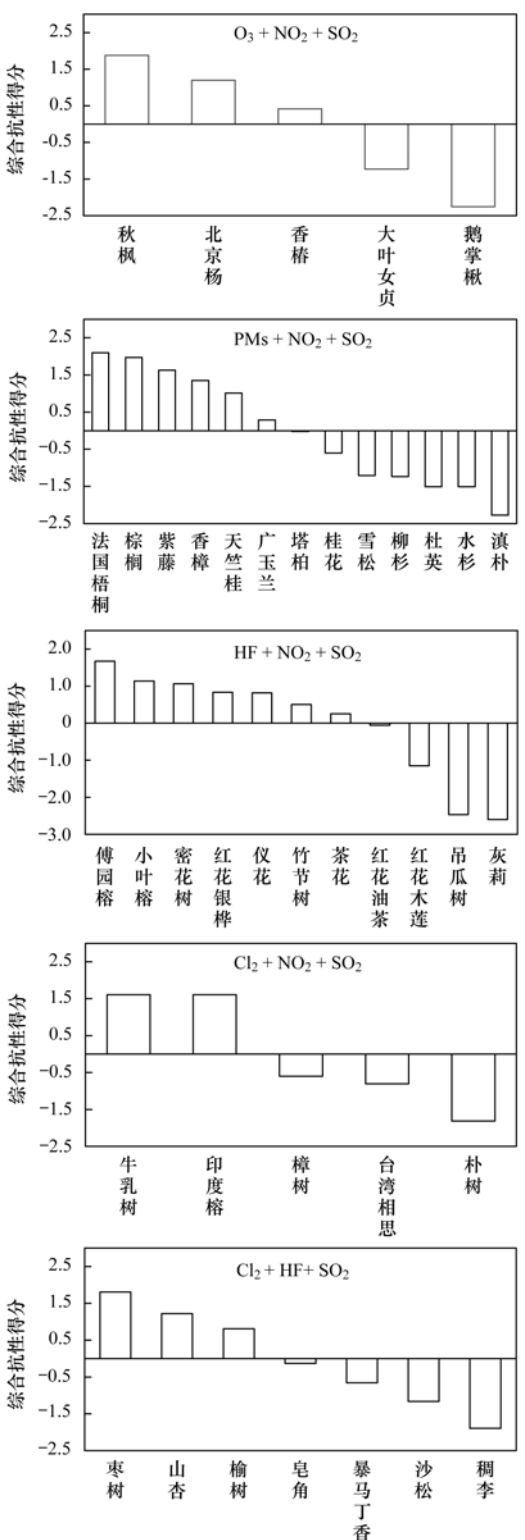


图3 城市植物对3种污染物组合的综合抗性排序
Fig. 3 Rank of integrated tolerance of urban plants against three air pollutants combined

动减缓,且由于地面处于降温阶段,大气以下沉为主,地面污染源排放的污染物向高空扩散稀释能力弱,近地层边界层污染物含量处于较高水平.与落叶树种不同,常绿树种多从4月开始老叶凋落、新叶萌发,5月前新叶生理功能基本完备.直到10~12月,新叶生理活动依然比较旺盛.随着进入冬季,因

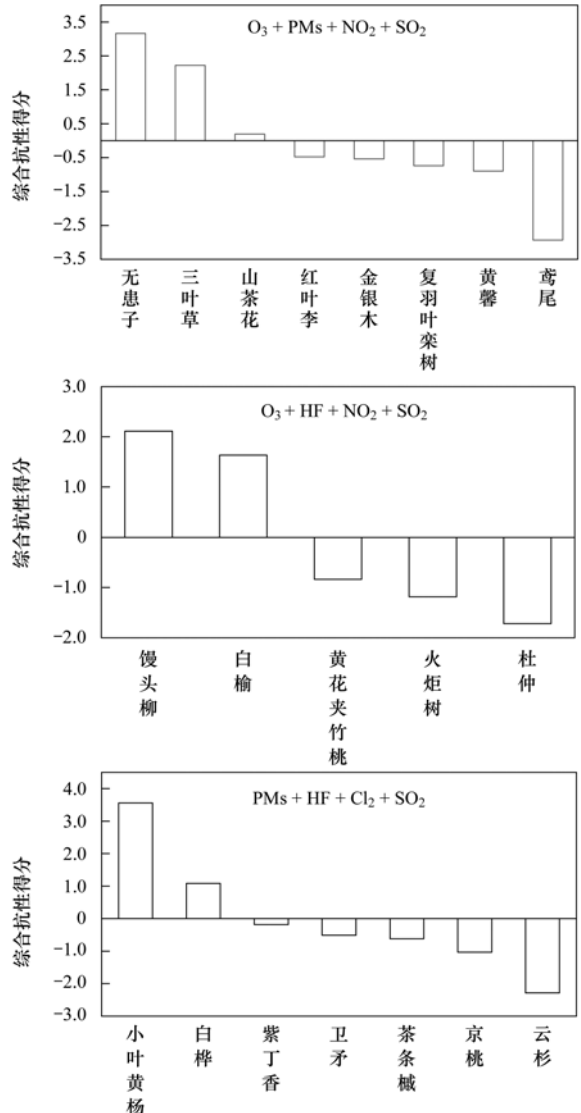


图4 城市植物对4种污染物组合的综合抗性排序
Fig. 4 Rank of integrated tolerance of urban plants against four air pollutants combined

温度下降导致叶片的转化能力下降幅度较大但吸收能力下降幅度较小,从而一直到翌年3月叶片吸收污染物的能力仍维持很高水平.利用常绿树和落叶树不同的物候特点,匹配不同的城市污染物排放特征,常常能够最大化发挥植物吸收净化功能.

我国各个城市处在不同的气候区和经济区,由于气候背景的差异和经济结构的不同,其大气污染种类和浓度有很大差异.从地理区位来看, SO_2 、 NO_2 和 PMs 均表现为东部大于西部,北方大于南方的态势^[22]. SO_2 的热点集中在冀中和鲁西北地区, NO_2 的热点集中在鲁中、冀南和珠三角等城市群, PMs 的热点集中在京津冀、长三角、淮海和华南沿海等经济区.如在长三角城市群加工业发达,且处于亚热带气候向暖温带气候的过渡区域,降水较为丰富,但雨季集中,空气污染以 SO_2 、氟化物和颗粒物等工厂粉尘废气为主;京津冀城市群处于温带季风半湿

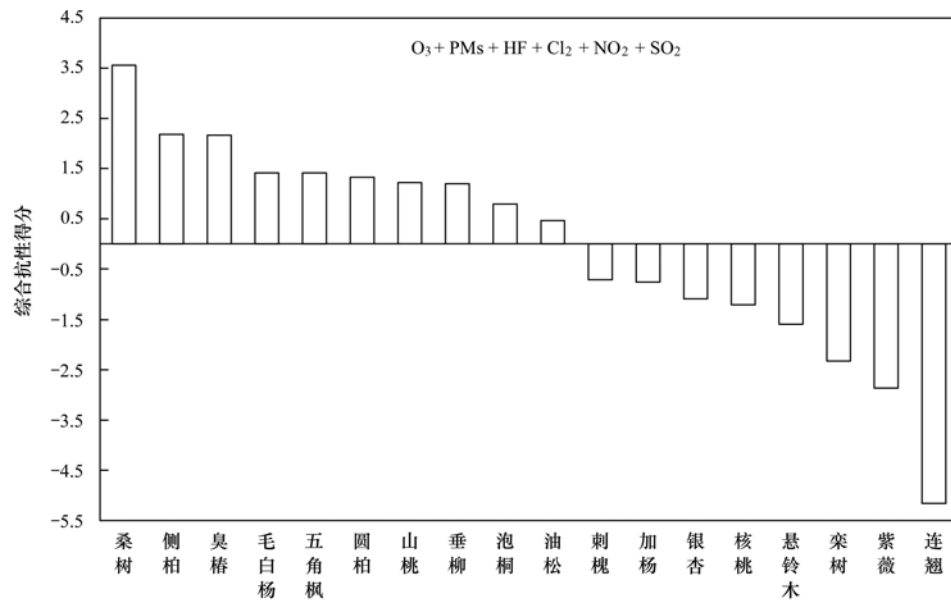


图5 城市植物对6种污染物组合的综合抗性排序

Fig. 5 Rank of integrated tolerance of urban plants against six air pollutants combined

润半干旱气候区域,干燥少雨,风沙较大,经济增长以创新和消费驱动,空气污染以 NO_2 、 O_3 和颗粒物等为主^[3]. 因此,在进行城市森林构建时,根据长三角和京津冀城市主要防护目的不同,适时适地筛选综合能力较强的树种,将城市森林阻挡、过滤、吸附和吸收空气污染物的作用发挥到最大.

另外,植被群落空间结构也影响不同种类植物对空气污染物吸收和净化功能的强弱^[23]. 阔叶乔木树形高大,树冠伸张和叶面积指数大,且位于群落结构的上层空间,对污染物的吸收量相对较多;灌木层居下,叶面积指数相对较小,主要吸收透过乔木枝叶空隙或乔木吸收后遗漏部分;针叶树虽叶片表面积小,气孔数量不多且易被油脂堵塞,但比表面积较大且分泌的油脂对空气颗粒物具有吸附固定作用. 在进行城市森林群落构建时,选择抗性强的乔-灌混合可实现多层次的立体过滤作用.

虽然自2013年实施《大气污染防治行动计划》以来,中国许多重点城市的空气质量正在改善^[3],以降低 $\text{PM}_{2.5}$ 为首要目标的大气污染防治措施取得了显著的成效,尤其是北京 $\text{PM}_{2.5}$ 水平连续7 a 呈下降趋势^[24],脱硫脱硝等新型环保燃烧工艺也使得 SO_2 和氟化物浓度下降明显. 更多的研究者从过去大量探索那些能对 SO_2 和 NO_2 等有较强吸收净化能力的城市绿化植物^[14, 20, 25],转到集中去探索那些能对空气中 $\text{PM}_{2.5}$ 等颗粒物有较强吸附能力的城市绿化植物^[9, 26~28]. 然而中国空气质量仍面临重大挑战. 一方面,中国能源结构对化石燃料过度依赖. 煤炭消费量仍占世界消费量的一半左右,煤炭燃烧仍然是 SO_2 、 NO_x 和形成 $\text{PM}_{2.5}$ 排放的主要来源. 另一

方面,地表 O_3 污染问题愈发突出. 有报道显示我国东部主要大城市群的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度在2013~2017年间显著降低但 O_3 浓度迅速增加^[24], $\text{PM}_{2.5}$ 浓度下降使得对 O_3 生成的抑制作用减弱,反而加剧 O_3 污染^[4]. 大气 O_3 对植物的强氧化毒性效应比其他大气污染物都大得多^[29]. 因此,在当前严峻的大气复合污染形势下,对于能够综合对抗 $\text{PM}_{2.5}$ 、 O_3 及其它污染物的排名靠前的植物种类,将是城市绿化的优先考虑对象.

4 结论

在当前严峻的大气复合污染形势下,综合抗性能力较强的树种主要为桑树、侧柏、臭椿、毛白杨、五角枫、圆柏、山桃、垂柳、泡桐和油松. 根据各个城市气候、大气污染种类和浓度等特点,适地适树地选择综合吸收量较大的乡土植物种类,确定城市植物在当今城市环境中的生态位;构建具备促进吸收和净化功能的乔-灌-草群落空间搭配,充分发挥城市森林群落对复合空气污染物的最大净化效果.

参考文献:

- [1] Li M, Liu H, Geng G N, *et al.* Anthropogenic emission inventories in China: a review [J]. *National Science Review*, 2017, **4**(6): 834-866.
- [2] Chen Y, Ebenstein A, Greenstone M, *et al.* Evidence on the impact of sustained exposure to air pollution on life expectancy from China's Huai River policy [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2013, **110**(32): 12936-12941.
- [3] Zeng Y Y, Cao Y F, Qiao X, *et al.* Air pollution reduction in China: recent success but great challenge for the future [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **663**: 329-337.
- [4] Li K, Jacob D J, Liao H, *et al.* A two-pollutant strategy for

- improving ozone and particulate air quality in China[J]. *Nature Geoscience*, 2019, **12**(11): 906-910.
- [5] Feng Z Z, De Marco A, Anav A, *et al.* Economic losses due to ozone impacts on human health, forest productivity and crop yield across China [J]. *Environment International*, 2019, **131**: 104966.
- [6] 骆永明, 查宏光, 宋静, 等. 大气污染的植物修复[J]. *土壤*, 2002, **34**(3): 113-119.
- Luo Y M, Zha H G, Song J, *et al.* Phytoremediation of air pollution[J]. *Soils*, 2002, **34**(3): 113-119.
- [7] Mukherjee A, Agrawal S B, Agrawal M. Responses of tropical tree species to urban air pollutants: ROS/RNS formation and scavenging[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **710**, 136363, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.136363.
- [8] 温达志, 孔国辉, 张德强, 等. 30 种园林植物对短期大气污染的生理生态反应[J]. *植物生态学报*, 2003, **27**(3): 311-317.
- Wen D Z, Kong G H, Zhang D Q, *et al.* Ecophysiological responses of 30 gardens plant species exposed to short-term air pollution[J]. *Acta Phytocologica Sinica*, 2003, **27**(3): 311-317.
- [9] 王兵, 张维康, 牛香, 等. 北京 10 个常绿树种颗粒物吸附能力研究[J]. *环境科学*, 2015, **36**(2): 408-414.
- Wang B, Zhang W K, Niu X, *et al.* Particulate matter adsorption capacity of 10 evergreen species in Beijing [J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(2): 408-414.
- [10] 王江, 杜茜, 李慧溪. 城市绿化植物滞尘效应研究综述[J]. *现代园艺*, 2016, (23): 134-136.
- [11] Gandin A, Davrinche A, Jolivet Y. Deciphering the main determinants of O₃ tolerance in Euramerican poplar genotypes [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **656**: 681-690.
- [12] Feng Z Z, Sun J S, Wan W X, *et al.* Evidence of widespread ozone-induced visible injury on plants in Beijing, China [J]. *Environmental Pollution*, 2014, **193**: 296-301.
- [13] Churkina G, Grote R, Butler T M, *et al.* Natural selection? Picking the right trees for urban greening [J]. *Environmental Science & Policy*, 2015, **47**: 12-17.
- [14] 罗红艳, 李吉跃, 刘增. 绿化树种对大气 SO₂ 的净化作用[J]. *北京林业大学学报*, 2000, **22**(1): 45-50.
- Luo H Y, Li J Y, Liu Z. Effect of purifying SO₂ in atmosphere by greening tree species [J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2000, **22**(1): 45-50.
- [15] Li P, Calatayud V, Gao F, *et al.* Differences in ozone sensitivity among woody species are related to leaf morphology and antioxidant levels [J]. *Tree Physiology*, 2016, **36**(9): 1105-1116.
- [16] 缪宇明, 陈卓梅, 陈亚飞, 等. 浙江省 38 种园林绿化植物苗木对二氧化氮气体的抗性吸收能力[J]. *浙江林学院学报*, 2008, **25**(6): 765-771.
- Miao Y M, Chen Z M, Chen Y F, *et al.* Resistance to and absorbency of gaseous NO₂ for 38 young landscaping plants in Zhejiang Province [J]. *Journal of Zhejiang Forestry College*, 2008, **25**(6): 765-771.
- [17] 刘楠, 温学, 孔国辉, 等. 抗 SO₂ 绿化植物的初步筛选[J]. *热带亚热带植物学报*, 2003, **11**(4): 364-371.
- Liu N, Wen X, Kong G H, *et al.* Preliminary selection of plants with high resistance to SO₂ for urban greening [J]. *Journal of Tropical and Subtropical Botany*, 2003, **11**(4): 364-371.
- [18] 韦阳连, 王瑛, 余金昌, 等. 城市绿地乡土树种对大气污染的适应性响应[J]. *亚热带植物科学*, 2013, **42**(1): 15-22.
- Wei Y L, Wang Y, Yu J C, *et al.* Response of native tree species adapted to air pollution in urban green land [J]. *Subtropical Plant Science*, 2013, **42**(1): 15-22.
- [19] 李锋, 刘旭升, 王如松. 城市森林研究进展与发展战略[J]. *生态学杂志*, 2003, **22**(4): 55-59.
- Li F, Liu X S, Wang R S. Advances in urban forest and its development strategies research [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2003, **22**(4): 55-59.
- [20] 张德强, 褚国伟, 余清发, 等. 园林绿化植物对大气二氧化硫和氟化物污染的净化能力及修复功能[J]. *热带亚热带植物学报*, 2003, **11**(4): 336-340.
- Zhang D Q, Chu G W, Yu Q F, *et al.* Decontamination ability of garden plants to absorb sulfur dioxide and fluoride [J]. *Journal of Tropical and Subtropical Botany*, 2003, **11**(4): 336-340.
- [21] Li P, Feng Z Z, Catalayud V, *et al.* A meta-analysis on growth, physiological, and biochemical responses of woody species to ground-level ozone highlights the role of plant functional types [J]. *Plant, Cell & Environment*, 2017, **40**(10): 2369-2380.
- [22] 潘竞虎, 张文, 李俊峰, 等. 中国大范围雾霾期间主要城市空气污染物分布特征[J]. *生态学杂志*, 2014, **33**(12): 3423-3431.
- Pan J H, Zhang W, Li J F, *et al.* Spatial distribution characteristics of air pollutants in major cities in China during the period of wide range haze pollution [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2014, **33**(12): 3423-3431.
- [23] 李新宇, 赵松婷, 李延明, 等. 北京市不同主干道绿地群落对大气 PM_{2.5} 浓度消减作用的影响[J]. *生态环境学报*, 2014, **23**(4): 615-621.
- Li X Y, Zhao S T, Li Y M, *et al.* Subduction effect of urban arteries green space on atmospheric concentration of PM_{2.5} in Beijing [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2014, **23**(4): 615-621.
- [24] Li K, Jacob D J, Liao H, *et al.* Anthropogenic drivers of 2013-2017 trends in summer surface ozone in China [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2019, **116**(2): 422-427.
- [25] 杨丹, 杨晓晓, 钟霞飞, 等. 3 种阴生地被植物对 SO₂ 胁迫的生理响应及净化能力[J]. *西北植物学报*, 2017, **37**(1): 115-123.
- Yang D, Yang X X, Zhong X F, *et al.* Resistant physiological response and purifying ability of three shady perennial plants to SO₂ stress [J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2017, **37**(1): 115-123.
- [26] 王会霞, 石辉, 李秧秧. 城市绿化植物叶片表面特征对滞尘能力的影响[J]. *应用生态学报*, 2010, **21**(12): 3077-3082.
- Wang H X, Shi H, Li Y Y. Relationships between leaf surface characteristics and dust-capturing capability of urban greening plant species [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2010, **21**(12): 3077-3082.
- [27] 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.
- Ji J, Wang G, Du X L, *et al.* Evaluation of adsorbing haze PM_{2.5} fine particulate matters with plants in Beijing-Tianjin-Hebei region in China [J]. *Scientia Sinica Vitae*, 2013, **43**(8): 694-699.
- [28] 陈小平, 焦奕雯, 裴婷婷, 等. 园林植物吸附细颗粒物 (PM_{2.5}) 效应研究进展 [J]. *生态学杂志*, 2014, **33**(9): 2558-2566.
- Chen X P, Jiao Y W, Pei T T, *et al.* The effect of adsorbing fine particulate matter (PM_{2.5}) by garden plants: a review [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2014, **33**(9): 2558-2566.
- [29] Krupa S, McGrath M T, Andersen C P, *et al.* Ambient ozone and plant health [J]. *Plant Disease*, 2001, **85**(1): 4-12.

CONTENTS

Analysis of Pollution Characteristics and Primary, Secondary Contributions of Firework Burnings in Qingdao During the Spring Festival	FANG Tian-ge, YAO Xiao-hong, MENG He, <i>et al.</i> (4345)
Characterization and Source Apportionment of PM _{2.5} Based on the Online Observation in Tianjin	XIAO Zhi-mei, XU Hong, LI Li-wei, <i>et al.</i> (4355)
Characteristics of Water-soluble Inorganic Ions in PM _{2.5} in Beijing During 2017-2018	LI Huan, TANG Gui-qian, ZHANG Jun-ke, <i>et al.</i> (4364)
Characteristics of Carbonaceous Species in PM _{2.5} in Southern Beijing	DONG Gui-ming, TANG Gui-qian, ZHANG Jun-ke, <i>et al.</i> (4374)
Characteristics and Formation Mechanism of Three Haze Pollution Processes in Chengdu in Winter	FENG Xiao-qiong, CHEN Jun-hui, YIN Han-mei, <i>et al.</i> (4382)
Distribution Characteristics and Source of Black Carbon Aerosols in the Northern Suburbs of Nanjing	XIE Feng, LIN Yu-chi, SONG Wen-huai, <i>et al.</i> (4392)
Assessment of Emergency Emission Reduction Effect During the Heavy Air Pollution Episodes in Beijing, Tianjin, Hebei, and Its Surrounding Area ("2+26" Cities) from October to December 2019	ZHU Yuan-yuan, GAO Yu-xiao, WANG Wei, <i>et al.</i> (4402)
Variational Trend and Characteristics of Air Pollution in Baoding City	GOU Yin-yin, ZHANG Kai, LI Jin-juan, <i>et al.</i> (4413)
Emission Inventory of VOCs Components in Zhengzhou and Their Ozone Formation Potential	LU Xuan, ZHANG Rui-qin, HAN Luo-kai (4426)
Evolution and Evaluation of O ₃ and VOCs in Zhengzhou During the National Traditional Games of Ethnic Minorities Period	ZHAO Jin-shuai, YU Shi-jie, WANG Nan, <i>et al.</i> (4436)
Characteristics of Volatile Organic Compounds in Wood Coatings and Automotive Coatings in China	KE Yun-ting, SUN Yu-hang, CHENG Hai-rong, <i>et al.</i> (4446)
Influence of Typical Desulfurization Process on Flue Gas Particulate Matter of Coal-fired Boilers	ZHANG Jin-sheng, WU Jian-hui, LÜ Rui-he, <i>et al.</i> (4455)
Investigation on the Emission Difference of Air Pollutants from Common Residential Coal Stoves and Suggestions for Emission Reduction	ZHANG Yi-chen, XUE Chen-li, LIU Jie, <i>et al.</i> (4462)
Mobile Source Emission Inventory with High Spatiotemporal Resolution in Tianjin in 2017	LIU Geng, SUN Shi-da, SUN Lu-na, <i>et al.</i> (4470)
Emission Inventory and Characteristics of Anthropogenic Air Pollution Sources Based on Second Pollution Source Census Data in Sichuan Province	XU Chen-xi, CHEN Jun-hui, LI Yuan, <i>et al.</i> (4482)
Preliminary Screening for the Urban Forest Against Combined Air Pollution	LI Pin, WEI Yan-yan, FENG Zhao-zhong (4495)
Spatial Distribution and Pollution Characteristics of Heavy Metals in Plant Leaves in Baoji City	ZHANG Jun, LIANG Qing-fang, GAO Yu (4504)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of PPCPs in Surface Water and Aquatic Organisms in Chaoshan Coastal Area along the South China Sea	XIU Cuo, WANG Chen-chen, LÜ Yong-long, <i>et al.</i> (4514)
Spatiotemporal Differentiation and Degradation Analysis of Polybrominated Diphenyl Ethers in Sediments of Shanmei Reservoir and Its Inflowing River, Quanzhou, China	HAN Wen-liang, LIU Yu, FENG Kai-wen (4525)
Spatial-temporal Variations and the Regulators of Nitrate Status in Shallow Groundwater of the Typical Mountainous Agricultural Watershed in the Upper Reaches of the Yangtze River	JIANG Nan, ZHOU Ming-hua, LI Hong, <i>et al.</i> (4539)
Emission Characteristics of Nitrogen and Phosphorus in a Typical Agricultural Small Watershed in Tuojiang River Basin	WANG Hong, XU Ya-ling, ZHANG Qi, <i>et al.</i> (4547)
Assessment of Potential Risk of Diffuse Pollution in Haihe River Basin Based Using DPeRS Model	FENG Ai-ping, WANG Xue-lei, XU Yi, <i>et al.</i> (4555)
Impact of Spatial Heterogeneity of Precipitation on the Area Change in Critical Source Area of Non-point Sources Pollution	GAO Xiao-xi, ZUO De-peng, MA Guang-wen, <i>et al.</i> (4564)
Sedimentary Diatom Records Reveal the Succession of Ecosystem in Lake Xihu, Dali over the Past 50 Years	ZHANG Chen-xue, XU Min, DONG Yi-fan, <i>et al.</i> (4572)
Content and Distribution of Cadmium in Soil and Fluvial Sediments in the Sea-Land Interaction Zone	WANG Fang-ting, CHEN Zhi-hua, BAO Ke, <i>et al.</i> (4581)
Occurrence Characteristics and Quality Estimation of Microplastics in Drainage Ditches in Hetao Irrigation District of Inner Mongolia	WANG Zhi-chao, YANG Fan, YANG Wen-huan, <i>et al.</i> (4590)
Influence of Pervious/Impervious Pattern on Runoff and Pollution in Parcel-based Catchment	JIANG Zhi-hui, LIAO Yun-jie, XIE Wen-xia, <i>et al.</i> (4599)
Activating Efficiency of Iron-copper Bimetallic Organic Framework MIL-101 (Fe, Cu) Toward H ₂ O ₂ for Degradation of Dyes	LIANG He, LIU Rui-ping, AN Xiao-qiang, <i>et al.</i> (4607)
Synergistic Reaction Mechanism of Cu ⁰ @Fe ₃ O ₄ Activated PMS for Degradation of <i>p</i> -nitrophenol	SHI Qing-qing, PU Sheng-yan, YANG Xi (4615)
Kinetics and Mechanism of Sucralose Degradation in Water Using UV-activated Persulfate Process	YU Yun, LU Jin-xin, LÜ Zhen, <i>et al.</i> (4626)
Microbial Community Structure for Sewage Wastewater Treatment Plants in Winter	SHANG Yue-fei, WANG Shen, ZONG Ni, <i>et al.</i> (4636)
Microbial Community Analysis of Different DN and PN-ANAMMOX Coupling Modes for Mature Landfill Leachate Treatment	LU Ming-yu, LI Xiang, HUANG Yong, <i>et al.</i> (4644)
Analysis of Rapid Start-up and Mixed Nutritional Nitrogen Removal Performance of Complete Autotrophic Granular Sludge	QI Ze-kun, WANG Jian-fang, QIAN Fei-yue, <i>et al.</i> (4653)
Long-term Stability of Aerobic Granular Sludge Under Low Carbon to Nitrogen Ratio	YUAN Qiang-jun, ZHANG Hong-xing, CHEN Fang-yuan (4661)
Response of Bacterial and Fungal Communities to Chemical Fertilizer Reduction Combined with Organic Fertilizer and Straw in Fluvio-aquic Soil	WU Xian, WANG Rui, HU He, <i>et al.</i> (4669)
Characteristics of Soil Nutrients and Fungal Community Composition in Crop Rhizosphere Under Different Rotation Patterns	SUN Qian, WU Hong-liang, CHEN Fu, <i>et al.</i> (4682)
Effects of Short-term Application of Moutai-flavor Vinasse Biochar on Nitrogen Availability and Bacterial Community Structure Diversity in Yellow Soil of Guizhou Province	ZHANG Meng, LIU Yan-ling, WEI Quan-quan, <i>et al.</i> (4690)
Effects of Different Rotation Patterns of Oil-Rice on Methane and Nitrous Oxide Emissions in Rice Fields	CHEN You-de, ZHAO Yang, GAO Du-juan, <i>et al.</i> (4701)
<i>Bacillus amyloliquefaciens</i> Biofertilizer Mitigating Soil Ammonia Volatilization	YANG Ya-hong, XUE Li-xia, SUN Bo, <i>et al.</i> (4711)
Effects of Exogenous Phosphorus on Rice Growth and Cadmium Accumulation and Transportation Under Cadmium Stress	HUO Yang, QIU Yin-yan, ZHOU Hang, <i>et al.</i> (4719)
Key Stage of As Accumulation in Rice Under As Stress at Different Growth Stages	DENG Peng-hui, CAI Ya-qin, ZHOU Hang, <i>et al.</i> (4726)
Heavy Metal Contamination and Health Risk Assessment of Corn Grains from a Pb-Zn Mining Area	ZHOU Yan, WAN Jin-zhong, LI Qun, <i>et al.</i> (4733)
Polybrominated Diphenyl Ether in E-waste Dismantling Sites in Taizhou City, Zhejiang Province: Concentration, Distribution, and Migration Trend	WEI Bao-kai, LIU Chen, WANG Ying, <i>et al.</i> (4740)
Assessment and Source Analysis of Heavy Metal Pollution in Farmland Soils in Southern Youyang County, Chongqing	WANG Rui, DENG Hai, YAN Ming-shu, <i>et al.</i> (4749)
Ecological Risk Assessment of Tetracycline Antibiotics in Livestock Manure and Vegetable Soil of Chongqing	PENG Qiu, WANG Wei-zhong, XU Wei-hong (4757)