

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.8
第41卷 第8期

目次

首都重大活动与空气重污染应急减排措施效果对比分析 钟焱盛, 周颖, 程水源, 王晓琦, 邵玄逸 (3449)

基于天津市在线数据评估 ISORROPIA-II 模式结果及气溶胶 pH 的影响因素 高洁, 史旭荣, 卫昱婷, 宋少洁, 史国良, 冯银厂 (3458)

餐饮源有机颗粒物排放特征 李源逵, 吴爱华, 童梦雪, 栾胜基, 李鹭, 胡敏 (3467)

华中地区黄冈市一次重度污染期间 PM_{2.5} 中 12 种微量元素特征及来源解析 陈展乐, 田倩, 毛瑶, 刘威杰, 石明明, 程钺, 胡天鹏, 邢新丽, 祁士华, 胡金旭 (3475)

艾比湖地区气溶胶光学特性分析 张喆, 丁建丽, 王瑾杰 (3484)

天津市冬季重污染二次有机化学污染特征及 VOCs 对 SOA 生成潜势 徐虹, 唐邈, 肖致美, 高璟贇, 杨宁, 李立伟, 郑乃源, 陈魁, 邓小文 (3492)

郑州市某城区冬季不同污染水平大气 VOCs 特征及源解析 李一丹, 尹沙沙, 张瑞芹, 于世杰, 杨健, 张栋 (3500)

长江三角洲 2010~2018 年生物质燃烧中等挥发性有机物 (IVOCs) 排放清单 朱永慧, 王倩, 黄凌, 殷司佳, 李莉, 王杨君 (3511)

北方常见绿化树种 BVOCs 排放特征及其与光合作用参数的相关性 许燕, 李双江, 袁相洋, 冯兆忠 (3518)

广州地区秋季不同站点类型地面臭氧变化特征与影响因子 高平, 庄立跃, 王龙, 陈瑜萍, 闫慧, 沈劲, 范丽雅, 叶代启 (3527)

泰安市大气臭氧污染特征及敏感性分析 李凯, 刘敏, 梅如波 (3539)

有色冶炼园区道路扬尘中重金属污染特征及健康风险评价 冯于耀, 史建武, 钟曜谦, 韩新宇, 封银川, 任亮 (3547)

西安市高校校园地表灰尘重金属污染来源解析 樊馨瑶, 卢新卫, 刘慧敏, 秦青 (3556)

超低排放高湿度气态颗粒物监测方法及燃气电厂实际测试 胡月琪, 颜旭, 孔川, 张虎, 郭晓东 (3563)

厦门市船舶控制区大气污染物排放清单与污染特征 王坚, 黄屋, 刘艳英, 陈森阳, 吴艳聪, 何月云, 杨心怡 (3572)

基于交通流的成都市高分辨率机动车排放清单建立 潘玉瑾, 李媛, 陈军辉, 石嘉诚, 田红, 张季, 周敬, 陈霞, 刘政, 钱骏 (3581)

基于无人机电光谱影像和 OPT-MPP 算法的水质参数反演 黄昕晰, 应晗婷, 夏凯, 冯海林, 杨根晖, 杜晓晨 (3591)

不同水体分层对沉积物间隙水氮素垂向分布影响: 以三峡水库和小湾水库为例 刘静思, 朱晓声, 胡子龙, 张思思, 杨正健, 纪道斌, 刘德富 (3601)

城市河道表层水及沉积物中微塑料的污染现状与污染行为 赵昕, 陈浩, 贾其隆, 沈忱思, 朱弈, 李磊, 聂云汉, 叶建锋 (3612)

上海河道浮游植物群落结构时空变化特征及影响因素分析 许志, 陈小华, 沈根祥, 朱英, 钱晓雍, 张心良, 张卫, 胡双庆, 白玉杰 (3621)

过氧化钙 (CaO₂) 联合生物炭对河道底泥的修复 李雨平, 姜莹莹, 刘宝明, 阮文权, 缪恒锋 (3629)

基于双同位素 ($\delta^{15}\text{N}-\text{NO}_3^-$ - $\delta^{18}\text{O}-\text{NO}_3^-$) 和 IsoSource 模型的岩溶槽谷区地下水硝酸盐来源的定量示踪 徐璐, 蒋勇军, 段世辉, 何瑞亮 (3637)

三峡库区规模化顺坡沟壑果园氮、磷输出过程及流失负荷 严坤, 王玉宽, 刘勤, 徐佩, 闫洋洋 (3646)

高度城镇化地区城市小区降雨径流污染特征及负荷估算 高斌, 许有鹏, 陆苗, 林芷欣, 徐兴 (3657)

Fe@GOCS 的制备及其对水中 As(III) 的吸附 赵超然, 单慧媚, 曾春芽, 张进贤, 彭三曦 (3665)

微塑料对水中铜离子和四环素的吸附行为 薛向东, 王星源, 梅雨晨, 庄海峰, 宋亚丽, 方程冉 (3675)

多孔填料特性对生物膜形成影响 江宇勤, 厉炯慧, 方治国 (3684)

硝化生物膜系统对低温的适应特性: MBBR 和 IFAS 李初, 于莉芳, 张兴秀, 戴子承, 滑思思, 彭党聪 (3691)

单质硫自养短程反硝化耦合厌氧氨氧化强化脱氮 方文烨, 李祥, 黄勇, 郭超然, 胡羽婷, 陶仁杰 (3699)

间歇梯度曝气的生活污水好氧颗粒污泥脱氮除磷 张玉君, 李冬, 李帅, 张杰 (3707)

基于不同废污泥源的短程反硝化快速启动及稳定性 张星星, 王超超, 王焱, 徐乐中, 吴鹏 (3715)

基于 AHP-PROMETHEE II 法的鸟粪石磷回收污泥预处理方案决策 刘晓雷, 李安婕 (3725)

零价铁对厌氧消化过程中氨氮抑制解除的影响 刘吉宝, 牛雨彤, 郁达伟, 谭颖峰, 左壮, 魏源送 (3731)

基于厌氧膜生物反应器的剩余污泥-餐厨垃圾厌氧共消化性能 戴金金, 牛承鑫, 潘阳, 陆雪琴, 甄广印, 郑朝婷, 张瑞良, 何欣昱 (3740)

亚剂量抗生素诱导抗性基因水平迁移 袁其懿, CHEN Hong-jie, Laurence Haller, 何义亮 (3748)

四环素胁迫对 *Shigella flexneri* 细菌四环素抗性基因抗性表达的影响过程 高品, 阮晓慧, 邱文婕, 薛罡, 钱雅洁 (3758)

羟胺对氨氧化菌和亚硝酸盐氧化菌的竞争性选择 乔昕, 王博, 郭媛媛, 彭永臻 (3765)

高温冲击对亚硝酸盐氧化过程中微生物菌群结构影响 侯晓薇, 牛永健, 李维维, 王光杰, 孙洪伟 (3773)

微生物种间相互作用产生锰氧化的普适性及其潜在应用 宁雪, 梁金松, 柏耀辉, 廖恺玲俐, 刘会娟, 曲久辉 (3781)

三亚河红树林表层沉积物中好氧氨氧化微生物的分布特征及潜在硝化速率 罗晴, 甄毓, 彭宗波, 贺惠 (3787)

臭氧污染对水稻生长、产量及矿质金属元素含量的影响 方笑堃, 罗小三, 张丹, 吴礼春, 邱丹, 陈志炜, 赵朕 (3797)

改变碳输入对新疆天山雪岭云杉林土壤呼吸的短期影响 邵康, 贡璐, 何学敏, 陈文静, 张雪妮, 朱海强 (3804)

有机无机肥配施对不同程度盐渍土 N₂O 排放的影响 周慧, 史海滨, 郭珈玮, 张文聪, 王维刚 (3811)

原位电阻热脱附土壤升温机制及影响因素 葛松, 孟宪荣, 许伟, 施维林 (3822)

羽序灯心草作为酸性矿山废弃地先锋植物潜力 黄建洪, 伏江丽, 严鑫睿, 尹凤, 田森林, 宁平, 李英杰 (3829)

滴灌方式和生物质炭对温室土壤矿质态氮及其微生物调控的影响 蔡九茂, 刘杰云, 邱虎森, 吕谋超, 周新国 (3836)

棉秆炭调控对碱性镉污染水稻根际土壤真菌群落结构和功能的影响 刘师豆, 韩耀光, 朱新萍, 吴相南 (3846)

不同水分管理模式联合叶面喷施硅肥对水稻 Cd 累积的影响 魏宾纭, 周航, 刘佳炜, 张竞颐, 黄芳, 霍洋, 胡雨丹, 辜娇峰, 刘俊, 廖柏寒 (3855)

螯合剂 GLDA 对象草修复镉污染农田的影响 覃建军, 唐盛爽, 蒋凯, 黄敬, 侯红波, 龙坚, 彭佩钦 (3862)

种植业面源污染防治技术发展历程分析及趋势预测 俞映惊, 杨林章, 李红娜, 朱昌雄, 杨祺, 薛利红 (3870)

《环境科学》征订启事 (3636) 《环境科学》征稿简则 (3764) 信息 (3538, 3628, 3724)

北方常见绿化树种 BVOCs 排放特征及其与光合作用参数的相关性

许燕^{1,2}, 李双江¹, 袁相洋^{2*}, 冯兆忠^{3*}

(1. 南京信息工程大学环境科学与工程学院, 江苏省大气环境监测与污染控制高新技术研究重点实验室, 江苏省大气环境与装备技术协同创新中心, 南京 210044; 2. 中国科学院生态环境研究中心城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085; 3. 南京信息工程大学应用气象学院, 生态研究院, 南京 210044)

摘要: 为了解北方常见绿化树种植物源挥发性有机化合物 (biogenic volatile organic compounds, BVOCs) 的排放特征及其与光合作用参数 (净光合速率 P_n 、气孔导度 g_s 、胞间 CO_2 浓度 c_i 、蒸腾速率 T_r) 的相关性, 本实验采用动态采样装置收集 14 种落叶乔木 BVOCs 排放数据。结果表明, 不同科属间异戊二烯和总 BVOCs (异戊二烯、单萜和倍半萜烯之和) 释放速率差异显著 ($P < 0.01$)。除金银木和榆树, 其他绿化树种均释放异戊二烯、单萜和倍半萜烯类物质, 其中杨柳科 (杂交杨 ‘546’、速生杨 ‘107’、小叶杨、垂柳) 和豆科植物 (国槐、刺槐、龙爪槐) 排放异戊二烯较多, 释放速率在 $(30.1 \pm 4.3) \sim (91.8 \pm 10.0) \mu\text{g} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$ 之间; 木犀科 (白蜡、丁香)、蔷薇科海棠、无患子科栾树和槭树科元宝枫主要排放单萜和倍半萜烯, 其中白蜡和元宝枫单萜释放速率最高, 分别为 $(10.6 \pm 4.8) \mu\text{g} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$ 和 $(11.8 \pm 6.4) \mu\text{g} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$ 。罗勒烯和 β -蒎烯是绿化树种排放的两种主要单萜物质。 P_n 和 g_s 与 BVOCs 释放速率之间无显著相关性, 但杨柳科植物异戊二烯 ($r = 0.681, P < 0.01$) 和总 BVOCs ($r = 0.698, P < 0.01$) 释放速率与叶片 T_r 呈显著正相关, 而豆科植物的总 BVOCs 释放速率与 c_i 呈显著正相关 ($P = 0.04$)。本研究为城市绿化树种的筛选和配置提供科学参考, 也为 BVOCs 释放机制的研究提供理论依据。

关键词: 绿化树种; 异戊二烯和单萜; 植物源挥发性有机化合物 (BVOCs); 光合参数; 相关性

中图分类号: X511 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2020)08-3518-09 DOI: 10.13227/j.hjks.202001180

Emission Characteristics of Biogenic Volatile Compounds (BVOCs) from Common Greening Tree Species in Northern China and Their Correlations with Photosynthetic Parameters

XU Yan^{1,2}, LI Shuang-jiang¹, YUAN Xiang-yang^{2*}, FENG Zhao-zhong^{3*}

(1. Jiangsu Collaborative Innovation Center of Atmospheric Environment and Equipment Technology, Jiangsu Key Laboratory of Atmospheric Environment Monitoring and Pollution Control, School of Environmental Science and Engineering, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China; 2. State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China; 3. Institute of Ecology, School of Applied Meteorology, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China)

Abstract: In order to understand the emission characteristics of common greening trees in Beijing and analyze their correlations with photosynthetic parameters, including the net photosynthetic rate (P_n), stomatal conductance (g_s), intercellular CO_2 concentration (c_i), and transpiration rate (T_r), we collected samples of biogenic volatile organic compounds (BVOCs) using a dynamic sampling technique from 14 species of deciduous trees. The results showed that there were significant differences in isoprene and total BVOC emissions between family or genus levels ($P < 0.01$). With the exception of *Lonicera maackii* Maxim and *Ulmus pumila* L., all species were found to emit isoprene, monoterpenes, and sesquiterpenes, of which, species from the Salicaceae (e.g., *Populus deltoides* cv. ‘55/56’ × *P. deltoides* cv. ‘Imperial’, *P. euramericana* cv. ‘74/76’, *Populus simonii* Carr, and *Salix babylonica*) and Legume (*Sophora japonica*, *Robinia pseudoacacia*, and *S. japonica* Linn. var. *japonica* f. *pendula* Hort) families were the higher isoprene emitters, with emission rates that ranged from $(30.1 \pm 4.3) \mu\text{g} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$ to $(91.8 \pm 10.0) \mu\text{g} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$. Plants from the Oleaceae (e.g., *Fraxinus chinensis* Roxb and *Syringa oblata* Lindl), Begonia (*Malus prunifolia*), Sapindaceae (*Koeleria paniculate*), and Aceraceae (*Acer truncatum* Bunge) families mainly emitted monoterpenes and sesquiterpenes. Among them, *Fraxinus chinensis* Roxb and *Acer truncatum* Bunge were the highest emitters with emission rates of $(10.6 \pm 4.8) \mu\text{g} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$ and $(11.8 \pm 6.4) \mu\text{g} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$, respectively. Ocimene and β -pinene were the two main monoterpenes emitted from greening tree species. No significant correlations were found between the emission of BVOCs and P_n or g_s , while the emission rate of isoprene ($r = 0.681; P < 0.01$) and the total BVOC ($r = 0.698; P < 0.01$) from the Salicaceae family increased with increasing T_r . Moreover, leguminous plants showed a significant positive correlation between the total BVOC emission rate and c_i ($P = 0.04$). This study provides a scientific reference for the selection and configuration of urban greenery, and a theoretical basis for exploring the mechanism of BVOC emissions.

收稿日期: 2020-01-20; 修订日期: 2020-03-06

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41907383); 江苏省大气环境监测与污染控制高新技术研究重点实验室开放基金项目 (KHK1801)

作者简介: 许燕 (1995 ~), 女, 硕士, 主要研究方向为植物源挥发性有机物及其生态效应, E-mail: xyzzka1011@163.com

* 通信作者, E-mail: xyuyan@cees.ac.cn; zhaozhong.feng@nuist.edu.cn

Key words: greening tree species; isoprene and monoterpenes; biogenic volatile organic compounds (BVOCs); photosynthetic parameters; correlation

植物源挥发性有机化合物 (biogenic volatile organic compounds, BVOCs) 是植物次生代谢过程中生成的低沸点、易挥发的小分子化合物^[1]. BVOCs 种类繁多, 但主要包括异戊二烯 (C_5H_8 , isoprene)、单萜 ($C_{10}H_{16}$, monoterpenes) 和倍半萜烯 ($C_{15}H_{24}$, sesquiterpenes)^[2,3], 其中异戊二烯约占 BVOCs 总排放量的 44%, 单萜占到 11%, 倍半萜烯占 3%^[4,5]. BVOCs 对生态环境和人体健康有正负两方面的影响, 一方面, 它们参与植物生长和繁殖^[6], 作为信号物质向周围邻近植物传递信息, 从而抵御外界环境胁迫^[7], 植物释放的某些挥发性物质还能杀菌抑菌、振奋精神、祛病保健^[8,9]. 另一方面, BVOCs 活性高^[10], 容易与空气中的氮氧化物 (NO_x)、氢氧自由基 ($\cdot OH$) 等反应, 增加对流层臭氧 (O_3) 浓度^[11], BVOCs 的光化学氧化产物会凝结成二次有机气溶胶 (secondary organic aerosols, SOA)^[12], 对城市光化学烟雾的形成产生巨大贡献. 此外, 大多数 BVOCs 最终以 CO_2 的形式进入生态系统碳循环, 这会加剧温室效应, 影响全球气候^[13]. 据统计, 全球 BVOCs 排放量约为 $1.15 \times 10^9 t \cdot a^{-1}$ ^[5,14]. 远高于人为源挥发性有机化合物 (anthropogenic volatile organic compounds, AVOCs) 排放. 因此, 探究 BVOCs 释放有助于进一步了解陆地生态系统对区域空气质量和全球气候变化的影响.

绿化树种是城市生态系统的重要组成部分, 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, 如大面积城市绿化可以防风固沙和净化空气; 植物还能通过光合作用固碳释氧, 减缓城市“热岛效应”^[15,16]. 然而, 除了提供各种调节和文化服务, 城市绿化树种还是区域 BVOCs 排放的重要来源^[14]. 相较于其他 NO_x 排放量较低的区域, 城市一般为 VOCs 限制地区, 大气 O_3 和 SOA 浓度对城区 BVOCs 排放量的变化更加敏感^[17]. 有研究表明城市绿地使用低 BVOCs 排放量的树种可显著提高空气质量^[18]. 过去几十年, 为提高城市居民生活质量, 植物造林工程在各大城市不断实施, 以北京市为例, 截至 2018 年市内绿化覆盖率已增长至 48.4%, 实有树木也增加到 15 387.48 万株. 然而, 有关部门在筛选及种植绿化树种时, 主要侧重于树种的存活能力和营造的景观美学效果^[19], 甚少关注城市绿化树种 BVOCs 释放特征和能力、 O_3 形成潜力和区域 O_3 污染贡献能力等^[20].

叶片 BVOCs 排放受环境因素 (如温度、光照、湿

度及土壤水分含量)、植物个体发育状态 (树龄、叶龄、生长阶段) 及叶片生理状况差异 (如光合作用能量供应、气孔开度大小) 等多方面的影响^[7,19,21,22]. 前人已经做了很多有关环境因子和植物个体发育状态的研究, 揭示 BVOCs 随着温度和光照的升高而明显增加的响应^[3,23], 并总结出成熟叶片 BVOCs 的释放速率大于幼叶的释放速率^[24,25]. 然而, 由于复杂的代谢过程, BVOCs 与叶片生理生化指标之间的关系尚无准确定论, 植物不同科属间 BVOCs 释放速率与叶片光合作用参数相关性的研究也相对稀缺. 本研究系统调查了 14 种北方常见绿化树种 BVOCs 排放规律和排放特征, 并同步测定 BVOCs 合成与释放相关的光合生理特性 (如光合速率、气孔导度、胞间 CO_2 浓度和蒸腾速率), 探究 BVOCs 释放速率与植物叶片光合参数的相关性, 通过揭示不同树种 BVOCs 释放差异的成因和机制, 以期筛选城市园林绿化植物和优化城区空气质量提供理论参考和科学依据.

1 材料与方法

1.1 树种选择和实验区概况

依据文献^[26]以及中国林业网统计资料, 研究筛选杂交杨 ‘546’ (*Populus deltoides* cv. ‘55/56’ × *P. deltoides* cv. ‘Imperial’)、速生杨 ‘107’ (*P. euramericana* cv. ‘74/76’)、小叶杨 (*Populus simonii* Carr)、垂柳 (*Salix babylonica*)、国槐 (*Sophora japonica*)、刺槐 (*Robinia pseudoacacia*)、龙爪槐 (*S. japonica* Linn. var. *japonica* f. *pendula* Hort)、白蜡 (*Fraxinus chinensis* Roxb)、丁香 (*Syringa oblata* Lindl)、金银木 *Lonicera maackii* (Rupr.) Maxim]、栾树 (*Koelreuteria paniculate*)、元宝枫 (*Acer truncatum* Bunge)、榆树 (*Ulmus pumila* L.) 和海棠 (*Malus prunifolia*) 等 14 种常见落叶乔木为研究对象. 实验区主要集中在北京及周边郊区, 北京地处中纬度亚欧大陆东岸, 属于典型的温带大陆性季风气候, 冬寒夏凉, 年平均气温 10.2℃, 夏季平均气温 22~25℃, 年降水量 443~550 mm, 年平均日照 2 800 h, 全年无霜期 160~200 d.

1.2 研究方法

1.2.1 采样方法

本研究采用动态采样装置收集叶片 BVOCs, 该装置由便携式光合测定仪 (Li-6400)、Tenax 吸附管和气体采样泵组成, 详细装置流程见文献^[27],

BVOCs 测定时可同步测定叶片光合作用参数. 对比传统采样方法, 该方法可有效控制叶温和光照等环境参数, 实验操作严谨, 数据精确^[28]. 2019 年 8 月 3 日至 9 月 1 日, 选择晴朗无风天气, 于 10:00 ~ 14:00 对不同科属绿化树种向阳背风且叶面无损伤叶片进行 BVOCs 样品采集, 叶片均距离地面 1.5 ~ 2 m, 每次样品的采集时间为 25 min, 采样泵流速为 250 mL·min⁻¹. 为保证实验数据的可靠性和对比性, 每个树种选择健康、树龄相同、长势基本一致的 5 个标准株进行 BVOCs 样品采集. 样品采集前测定其光合速率、气孔导度、胞间 CO₂ 浓度和蒸腾速率, 样品采集过程中根据外界环境控制温度和光照, 并同步记录叶温 (T_{leaf}) 和光合有效辐射 (PAR) 用于 BVOCs 排放速率标准化. BVOCs 样品收集之后, 立即存储于 4℃ 恒温冰箱中, 之后用气相色谱-质谱联用仪 (GC-MS) 进行定性和定量分析.

1.2.2 分析方法

样品分析采用热脱附-气相色谱-质谱联用仪 (TD-GC-MS, 安捷伦, 美国) 检测, 该仪器操作简便, 灵敏度高. 由于不同物质在色谱图上的保留时间不同, 使用软件自带的 NIST11. L 谱库对其进行初步检索、定性分析. 随后, 配制异戊二烯 (isoprene)、 α -蒎烯 (α -pinene)、 β -蒎烯 (β -pinene)、柠檬烯 (limonene)、 β -月桂烯 (β -myrcene)、罗勒烯 (ocimene)、 γ -松油烯 (γ -terpinene) 和石竹烯 (caryophyllene) 这 8 种物质的甲醇标准系列溶液, 根据其色谱图上响应值的不同绘制标准曲线, 进行定量分析. 由于采样过程中实际 T_{leaf} 和 PAR 会随外界环境变化而小幅波动, 最终将 14 种不同绿化树种 BVOCs 释放速率按照“G93”^[3] 算法进行标准化处理 [$T_{\text{leaf}} = 30^\circ\text{C}$, $\text{PAR} = 1\,000\ \mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$].

检测系统各部件运行条件如下.

(1) 热脱附系统 温度: 250℃, 解析时长: 5 min, 冷阱温度: -50℃.

(2) GC-MS 系统 脱附后的气体样品进入 HP-5MS 石英毛细管色谱柱 (安捷伦, 美国), 色谱柱规格: 长 30 m × 直径 0.25 mm × 膜厚度 0.25 μm , 氮气作为载气, 气体流速为 1 mL·min⁻¹, 升温程序: 初始温度 35℃ (2 min) → 5℃·min⁻¹ → 160℃ (3 min) → 20℃·min⁻¹ → 270℃ (3 min). MS 系统以 EI 源方式电离, 质子扫描范围: 30 ~ 300 (m/z).

1.3 数据处理与分析

利用 Excel 对数据进行初步整理, 应用 SPSS25.0 软件进行方差齐性检验和 ANOVA 方差分析, 选用最小显著差异 t 检验 (least significant difference, LSD) 和 q 检验 (student-newman-keuls, S-

N-K) 对 14 种北方绿化树种 BVOCs 释放速率进行多重比较和显著性分析. 应用 SPSS 对 BVOCs 释放速率与光合作用参数作相关分析, 得到皮尔逊相关系数 (pearson correlation coefficient, PCCs), 进行显著性检验. 最后运用 Origin 2017 绘图, 文中数据均为平均值 ($n = 5$) ± 标准误差 (SE).

2 结果与分析

2.1 绿化树种 BVOCs 释放速率及组成

不同绿化树种之间释放的物质以及释放速率存在显著差异 (表 1). 杨柳科植物中的两种不同基因型的黑杨异戊二烯释放速率显著高于小叶杨和垂柳, 分别为 $(89.9 \pm 8.6)\ \mu\text{g}\cdot(\text{g}\cdot\text{h})^{-1}$ 和 $(91.8 \pm 10.0)\ \mu\text{g}\cdot(\text{g}\cdot\text{h})^{-1}$. 就单萜和倍半萜的释放情况来看, 4 种杨柳科植物均释放一定量的单萜, 杂交杨‘546’和垂柳单萜释放量较高, 速生杨‘107’和小叶杨单萜释放速率均低于 $1\ \mu\text{g}\cdot(\text{g}\cdot\text{h})^{-1}$, 杂交杨‘546’和小叶杨均无倍半萜化合物释放. 国槐、刺槐和龙爪槐这 3 种槐属豆科植物异戊二烯释放水平相似, 刺槐的倍半萜释放速率最高为 $(0.8 \pm 0.3)\ \mu\text{g}\cdot(\text{g}\cdot\text{h})^{-1}$, 而国槐的单萜释放速率最高. 木犀科植物白蜡和丁香 BVOCs 总体释放量不高, 且异戊二烯释放水平较低, 白蜡无异戊二烯释放, 但单萜的释放速率较高, 达到 $(10.6 \pm 4.8)\ \mu\text{g}\cdot(\text{g}\cdot\text{h})^{-1}$. 其他科 5 种绿化树均为低排放树种, 海棠和栎树释放少量异戊二烯、单萜和倍半萜, 元宝枫不释放异戊二烯, 但释放大单萜 [$(11.8 \pm 6.4)\ \mu\text{g}\cdot(\text{g}\cdot\text{h})^{-1}$] 和少量倍半萜 [$(0.6 \pm 0.2)\ \mu\text{g}\cdot(\text{g}\cdot\text{h})^{-1}$]. 榆树和金银木则未检测出任何萜烯类挥发物释放. 总的来看, 杨柳科植物异戊二烯和总 BVOCs 释放速率显著高于木犀科和其他科植物, 而单萜和倍半萜由于释放速率较低, 不同科型树种间无显著释放差异 (图 1).

图 2(a) 是绿化树种单萜释放种类及释放特征情况, 从结果可以看出, 12 种绿化树释放 2 ~ 6 种单萜, 元宝枫释放的单萜物质种类最多且释放速率最大, 白蜡次之, 龙爪槐和丁香仅释放 α -蒎烯和 γ -松油烯两种单萜类物质. 从各组分在单萜总释放量中所占的比例来看 [图 2(b)], 绿化树种主要释放 β -蒎烯和罗勒烯; 龙爪槐、丁香释放的 α -蒎烯占比均超过 90%; 小叶杨、刺槐和白蜡主要释放罗勒烯和 γ -松油烯, 释放量占总单萜排放的 80% 以上. 垂柳和元宝枫释放少部分 β -蒎烯, 其他树种不释放该物质.

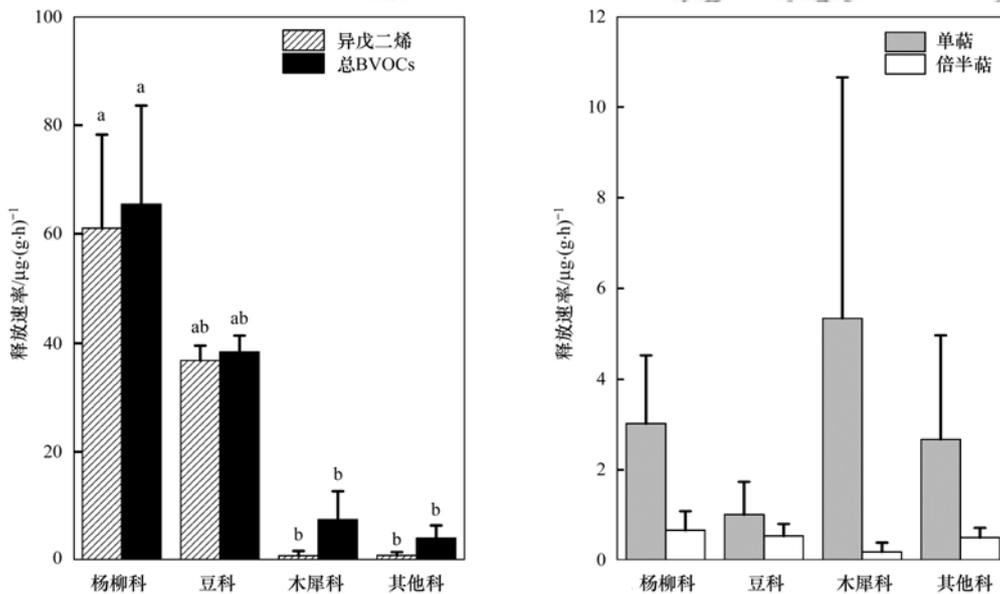
表 1 将本文实验值与国内外文献中排放速率值进行对比, 发现大部分数据均与已有研究值吻合, 但

表 1 不同绿化树种 BVOCs 排放速率的比较¹⁾

Table 1 Comparison of the emission rate of BVOCs from different greening tree species

树种名称	科型	文献	释放速率/ $\mu\text{g}\cdot(\text{g}\cdot\text{h})^{-1}$		释放速率/ $\mu\text{g}\cdot(\text{g}\cdot\text{h})^{-1}$		释放速率/ $\mu\text{g}\cdot(\text{g}\cdot\text{h})^{-1}$	
			异戊二烯 (本研究)	文献值	单萜 (本研究)	文献值	倍半萜烯 (本研究)	文献值
速生杨‘107’	杨柳科	[29, 30]	89.9 ± 8.6a	105.8 ± 16.1	1.0 ± 0.6a	0.2 ± 0.1	1.7 ± 0.4a	0.017 ± 0.016
杂交杨‘546’	杨柳科		91.8 ± 10.0a	—	7.1 ± 3.2a	—	—	—
小叶杨	杨柳科		30.1 ± 4.3b	—	0.6 ± 0.3a	—	—	—
垂柳	杨柳科	[31, 32]	32.3 ± 4.5b	70.2 ± 9.3	3.4 ± 3.0a	3.7 ± 2.6	1.0 ± 0.2ab	0.1
刺槐	豆科	[30, 31]	41.5 ± 6.3b	37.3 ± 2.1	0.6 ± 0.3a	2.3	0.8 ± 0.3ab	0.009 ± 0.004
国槐	豆科	[31]	31.9 ± 1.9b	52.5 ± 17.5	2.4 ± 0.8a	1.9 ± 1.0	—	—
龙爪槐	豆科	[33]	37.0 ± 3.8b	143.8	0.05 ± 0.03a	—	0.8 ± 0.6ab	—
白蜡	木犀科	[30]	—	0.011 ± 0.005	10.6 ± 4.8a	0.012 ± 0.011	—	0.001 ± 0.0003
丁香	木犀科	[31]	1.8 ± 0.2c	0.2 ± 0.1	0.05 ± 0.02a	1.8 ± 0.2	0.4 ± 0.06c	—
金银木	忍冬科	[29]	—	0.2 ± 0.2	—	1.8 ± 0.3	—	—
海棠	蔷薇科	[34]	1.6 ± 0.2c	6.1 ± 1.8	0.4 ± 0.2a	1.6 ± 0.7	1.0 ± 0.5ab	0.1 ± 0.1
栾树	无患子科	[29]	3.1 ± 0.5c	<0.1	1.2 ± 1.1a	0.4 ± 0.1	0.9 ± 0.3ab	—
元宝枫	槭树科	[35]	—	—	11.8 ± 6.4a	0.42	0.6 ± 0.2ab	—
榆树	榆科	[31, 36]	—	0.3 ± 0.2	—	0.7	—	<0.01
显著性			$P < 0.01$		$P < 0.01$		$P < 0.01$	

1) “—”表示未检出 [$< 0.0001 \mu\text{g}\cdot(\text{g}\cdot\text{h})^{-1}$]; 不同小写字母表示树种间差异显著 ($P < 0.01$)



不同字母表示组间(科型)差异显著($P < 0.01$)

图 1 不同科型绿化树种异戊二烯、单萜、倍半萜烯和总 BVOCs 释放速率

Fig. 1 Emission rates of isoprene, monoterpenes, sesquiterpenes, and total BVOCs from different plant families

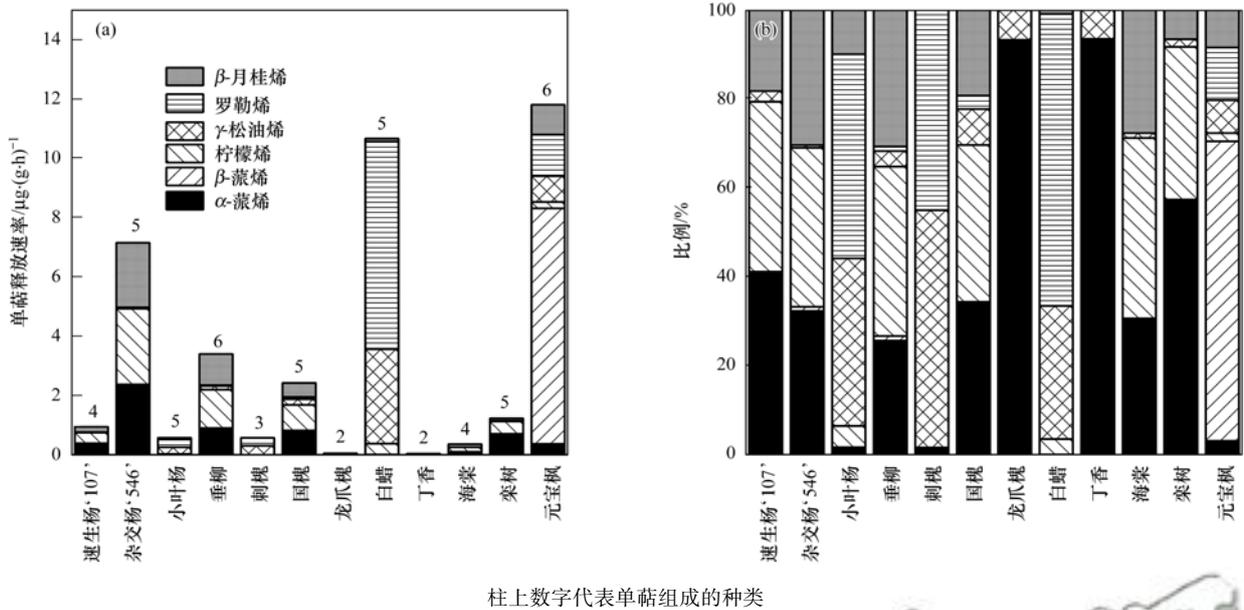
有少部分树种如白蜡、元宝枫和榆树等由于单萜、倍半萜烯释放量较低,存在较大差异.总的来说,杨属、柳属和槐属植物主要排放异戊二烯,黑杨释放速率最高,其他科属植物以单萜、倍半萜烯释放为主,异戊二烯释放量较低,甚至不释放.

2.2 绿化树种光合特征及其与 BVOCs 释放速率之间的相关性

2.2.1 绿化树种间光合作用参数差异

植物通过气孔与外界进行气体交换,光合作用和蒸腾作用是植物维系自身生长和保持植物体内动态平衡的重要调控手段.本实验结果表明不同绿

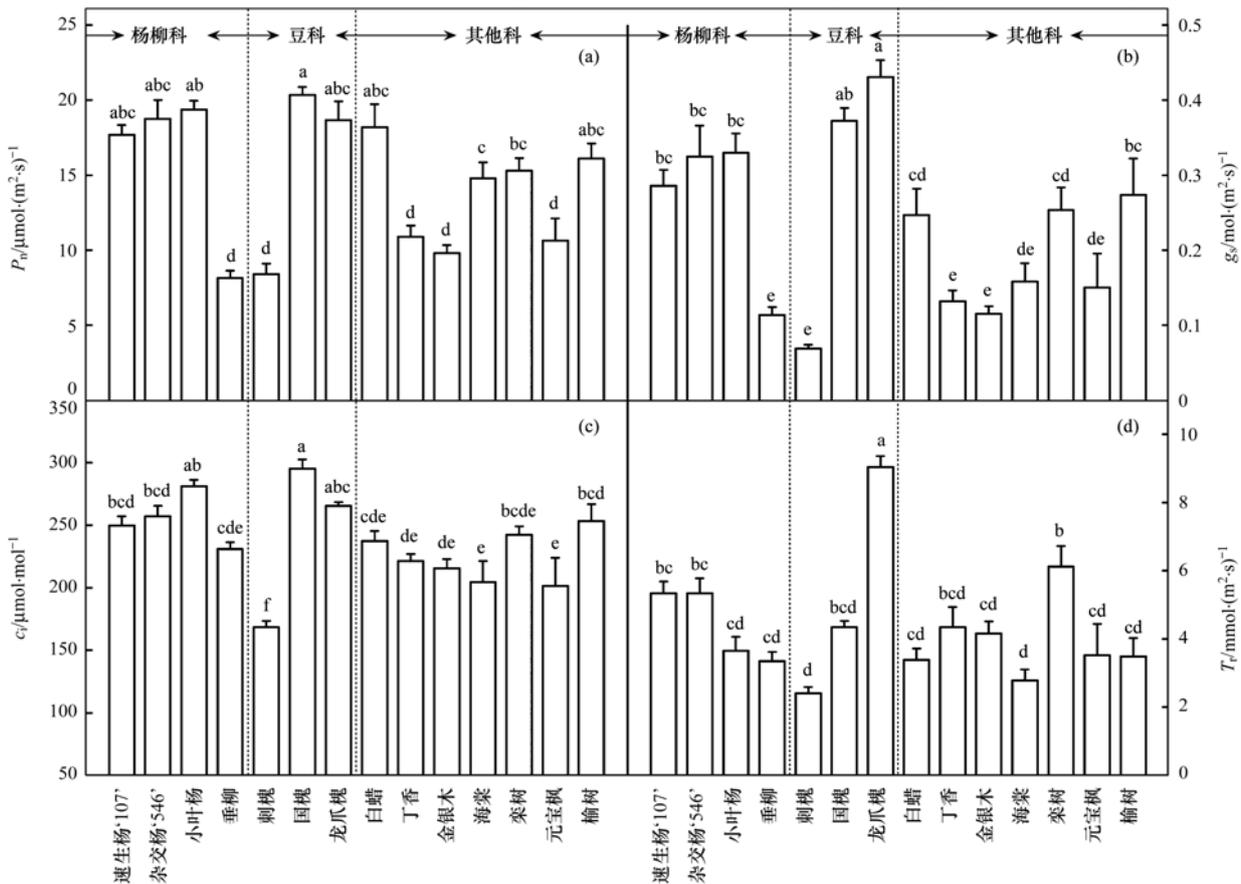
化树的光合特征存在显著差异(图 3),杨柳科植物中杂交杨树‘546’、速生杨‘107’和小叶杨净光合速率(P_n)显著高于垂柳,豆科植物中国槐(P_n 以 CO_2 计,下同)最高,刺槐最低,分别为 $(20.3 \pm 0.5) \mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$ 和 $(8.4 \pm 0.7) \mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$.白蜡和丁香两种木犀科植物的 P_n 也存在显著性差异,白蜡 P_n 显著高于丁香,其他科植物海棠、栾树、榆树的 P_n 显著大于元宝枫,大小依次为:榆树 [$(16.1 \pm 1.0) \mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$] > 栾树 [$(15.3 \pm 0.8) \mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$] > 海棠 [$(14.8 \pm 1.1) \mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$] > 元宝枫 [(10.6 ± 1.5)



柱上数字代表单萜组成的种类

图 2 绿化树种不同单萜释放速率及其组成比例

Fig. 2 Emission rates and composition of monoterpenes from greening tree species



不同小写字母表示树种间差异显著 ($P < 0.01$)

图 3 不同绿化树叶片光合作用参数及差异

Fig. 3 Photosynthetic parameters and their differences from different greening tree species

$\mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$].

气孔导度 (g_s) ($P = 0.002$) 和胞间 CO_2 浓度 (c_i) ($P = 0.004$) 也存在明显种间差异. 刺槐和垂柳的 g_s (以 H_2O 计, 下同) 显著低于其他杨柳科和豆科

树种, 分别为 $(0.07 \pm 0.005) \text{ mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$ 、 $(0.1 \pm 0.01) \text{ mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$. 杂交杨树 '546'、速生 '107' 以及小叶杨 3 种杨树间 g_s 无显著差异, 而光合能力较强的国槐 g_s 却小于龙爪槐; 木犀科、忍冬

科、蔷薇科、无患子科、槭树科和榆科植物 g_s 均低于 $0.3 \text{ mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$.

刺槐的 c_i (以 CO_2 计,下同) 显著低于其他树种,摩尔分数为 $(168.6 \pm 4.8) \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$, 杂交杨‘546’、速生杨‘107’、垂柳、白蜡、丁香、金银木、栾树和榆树这 8 种绿化树种 c_i 无显著差异 ($P > 0.05$), 国槐、小叶杨和龙爪槐 c_i 最高, 分别为 $(295.2 \pm 7.2) \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ 、 $(281.1 \pm 5.1) \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ 和 $(265.6 \pm 2.9) \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$.

从图 3(d) 中可以看出, 龙爪槐的蒸腾速率 (以 H_2O 计,下同) 最高 [$(9.0 \pm 0.3) \text{ mmol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$], 显著高于其他绿化树种, 栾树其次 [$(6.1 \pm 0.6) \text{ mmol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$]. 除了刺槐和海棠蒸腾作用较弱, 其他 10 种树之间 T_r 无显著差异 ($P > 0.05$), 且蒸腾速率范围在 $3 \sim 6 \text{ mmol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$ 之间.

2.2.2 不同科型植物 BVOCs 释放速率与光合特征的相关性

将不同科型树种释放速率与光合作用参数建立关系, 发现杨柳科植物和豆科植物与光合作用参数存在一定的相关性, 而木犀科、槭树科和榆科等植物与光合作用参数无显著相关性. 表 2 分别列出杨柳科、豆科树种异戊二烯、单萜、倍半萜烯以及总 BVOCs 释放速率与光合参数的皮尔逊相关系数, 从分析结果可以看出, 杨柳科植物的异戊二烯 ($P < 0.01$) 和总 BVOCs ($P < 0.01$) 排放仅与 T_r 呈显著正相关, 与 P_n 、 g_s 和 c_i 无显著相关性, 单萜、倍半萜烯和 4 个参数都不存在明显相关关系. 国槐、刺槐和龙爪槐这 3 种豆科植物总 BVOCs 的排放与 c_i 呈显著正相关 ($P = 0.04$), 倍半萜烯的释放速率与 T_r 呈显著正相关 ($P = 0.04$), 异戊二烯和单萜的释放速率与光合作用参数无显著相关性.

表 2 绿化树种 BVOCs 释放速率与光合作用参数的相关性¹⁾

Table 2 Correlations between the emission rate of BVOCs and photosynthetic parameters from greening tree species

科型	释放速率 $/\mu\text{g} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$	P_n $/\mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$	g_s $/\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$	c_i $/\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$	T_r $/\text{mmol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$
杨柳科	总 BVOCs	0.309	0.213	-0.213	0.698 **
	异戊二烯	0.350	0.245	-0.171	0.681 **
	单萜	-0.024	0.046	-0.050	0.231
	倍半萜烯	-0.161	-0.201	-0.380	0.189
豆科	总 BVOCs	0.404	0.403	0.543 *	0.261
	异戊二烯	0.216	0.319	0.327	0.423
	单萜	0.248	0.086	0.414	0.338
	倍半萜烯	0.399	0.464	0.270	0.519 *

1) ** 表示在 0.01 水平显著; * 表示在 0.05 水平显著

3 讨论

3.1 常见绿化树种 BVOCs 排放特征

BVOCs 由各种碳氢化合物组成, 包括烷烃、萜类、醛类、醇类、醚类、酯类和酸类等^[22]. 90 种不同科植物排放大约 1700 种挥发性有机化合物^[4]. 从排放数量上看, 类异戊二烯 (异戊二烯、单萜和倍半萜烯) 是最重要的 BVOCs^[37]. 本文在研究排放特征时只关注上述 3 种主要的类异戊二烯物质. 陈颖等^[38] 研究沈阳地区 8 种典型绿化树的 BVOCs 释放规律, 发现树种间 BVOCs 释放组成和比例存在显著差异, 银中杨、垂柳、丁香和水腊这 4 种阔叶树主要排放异戊二烯, 皂角、榆树和银杏排放柠檬烯, 针叶树油松主要排放 α -蒎烯, 研究结果与本文部分树种一致, 但本次实验中未检测出榆树的 BVOCs 释放, 这可能与实验方法、植物的生长状态及周围环境条件有关^[39,40]. 本研究调查的 14 种常见绿化树中, 杨柳科、豆科植物排放大量异戊二烯, 金银木和榆树不释

放任何萜类物质, 其他树种均释放单萜, 另外, 仅有 8 个树种释放倍半萜烯, 这与 Matsunaga 等^[41] 研究东京地区 29 种常见的行道树释放特征相同. 树种差异除了会导致成分的不同, 也是释放速率存在种间差异的根本原因, 表 1 的结果也证实了这一点. 国内外这方面的研究与本文类似, 如张倩等^[42] 对桧柏、绦柳、西府海棠和国槐这 4 种天津市常见绿化树的排放特征进行了分析, 发现杨柳科植物 BVOCs 排放量相对来说最高, 达到 $2100 \text{ g} \cdot (\text{株} \cdot \text{a})^{-1}$ 左右, 其次是松科、桑科和豆科植物, 槭树科和蔷薇科挥发物排放量较弱, 其他科如木犀科和苦木科植物排放量最低, 仅为杨柳科的 $1/1000$. Owen 等^[21] 对杨梅属、松属和栎属等 7 属 10 种植物的 BVOCs 释放情况进行了比较, 发现 70% 的树木为低释放树种, 中释放和高释放树种的释放速率分别在 $5 \sim 10 \mu\text{g} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$ 之间和 $10 \mu\text{g} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$ 以上. 此外, 同属不同种树木之间排放速率也相差较大, 有研究发现栎属 26 种树的 BVOCs 排放速率最大相差 22 倍^[43].

另外,对植物萜烯成分分析的结果表明,绿化树种排放单萜在组成和占比上存在显著差异。 α -蒎烯、 β -蒎烯等 6 种物质对绿化树单萜释放物的贡献率相似,其中 β -蒎烯(20.5%)和罗勒烯(23.0%)的贡献率相对较大。国外学者研究地中海地区 40 种植物 VOCs 排放情况,发现 α -蒎烯、柠檬烯是其排放的主要成分^[44]。Wang 等^[45]的研究发现不同菌种大麻排放的萜烯组成也存在较大差异,生长高峰期以排放 β -月桂烯(18~60%)和柠檬烯(3~29%)为主。

3.2 绿化树种 BVOCs 释放速率与光合作用参数的关系

植物叶片光合作用参数能够反映植物的光合性能和生长状况等,是植物与外界物质传输的量化形式。通过对 4 个指标的测定发现,不同绿化树种叶片光合参数存在显著差异,这可能是植物自身特性不同所致。考虑到其他科植物种类少,BVOCs 释放量较低且无明显相关性,本文只分析杨柳科和豆科植物挥发性物质排放与光合参数的关系。尽管异戊二烯、单萜和倍半萜的合成与释放主要依赖于叶片光合作用提供的能量(ATP)、还原型辅酶 II(NADPH)和碳源,但是植物排放的 BVOCs 与叶片净光合速率的不匹配的现象在多种温带或热带植物的研究中被发现^[46]。本文的研究结果中,不论杨柳科植物还是豆科植物,净光合速率与 BVOCs 释放均无显著相关性。Guidolotti 等^[47]对不同基因型杨树的异戊二烯释放速率与光合作用进行相关性分析也发现两者间并无关系,研究中还发现杨树叶片的光合固碳速率快于异戊二烯的生成速率,推测 BVOCs 释放速率与光合作用无显著相关性,与两者间存在时间差有关。

许多研究揭示异戊二烯和单萜是通过气孔排放^[24,48,49],以前的研究重点多放在气孔导度对 BVOCs 释放的影响上。Filella 等^[50]的研究发现植物叶片的单萜排放与气孔导度呈正相关,但也有一些研究发现气孔导度与植物 BVOCs 释放并无关系^[21,51],这与本文的研究结果一致。Eller 等^[25]在 8 月对松林成熟树木 BVOCs 释放速率进行测定,将其与光合作用参数建立相关性,发现总 BVOCs 的释放速率与气孔导度无关,甚至单萜的释放速率随着气孔导度的升高而降低。

叶片蒸腾作用促进了杨柳科植物异戊二烯释放以及豆科植物的倍半萜释放。植物通过蒸腾作用向外界输送和吸收水分以及矿物质,还会影响 BVOCs 与外界的交换速率^[52]。有研究表明蒸腾速率与 BVOCs 存在很强的正相关关系^[24,25,37],本文也得到了类似的结论。由于线粒体呼吸过程和叶绿体中

类异戊二烯物质生成过程之间存在前体物磷酸烯醇丙酮酸(PEP)的代谢竞争,许多研究发现 c_i 与异戊二烯或单萜排放速率显著负相关^[47,51,53]。然而,也有研究表明 c_i 并不影响异戊二烯和单萜的释放^[54]。本文中,杨柳科树种 BVOCs 释放速率与 c_i 无显著相关性,但豆科植物的总 BVOCs 释放速率与 c_i 显著正相关,表明 BVOCs 释放速率与 c_i 之间的关系具有树种特异性。当然,本研究中树种较少且组内 BVOCs 释放速率差异较小也是可能的原因,BVOCs 释放与光合特征的响应关系研究还需扩大树种量,开展更多相关的工作。本文的研究结果可供城市绿化树种筛选及环境保护部门 BVOCs 控制规划提供科学参考,为不同树种间 BVOCs 释放机制的研究提供理论依据。

4 结论

(1) 本研究对北京市 14 种常见绿化树种 BVOCs 释放情况进行了详细地分析,除了金银木和榆树未发现有 VOCs 释放,其他树均释放异戊二烯或单萜,速生杨‘107’、垂柳和刺槐等 8 种绿化树均释放倍半萜。杨柳科和豆科植物 BVOCs 总体释放量较高,速生杨‘107’和杂交杨‘546’异戊二烯释放速率最高,其次是垂柳、小叶杨和国槐等;元宝枫单萜释放速率最高 $[(11.8 \pm 6.4) \mu\text{g} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}]$;绿化树种的倍半萜释放能力普遍较低,速生杨‘107’的倍半萜释放速率最高 $[(1.7 \pm 0.4) \mu\text{g} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}]$,其他树种倍半萜释放速率均不超过 $1.0 \mu\text{g} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$ 。

(2) 从单萜种类和组成比例来看,元宝枫和垂柳 6 种单萜物质均有释放,龙爪槐和丁香仅释放两种单萜,分别为 α -蒎烯和 γ -松油烯。 β -蒎烯和罗勒烯对绿化树种单萜释放贡献较大,部分树种也排放 α -蒎烯、柠檬烯和 β -月桂烯等具有芳香气味的物质。

(3) BVOCs 释放与光合作用参数的相关分析结果与以往的研究稍有不同,本文仅发现杨柳科植物异戊二烯释放与 T_i 呈显著正相关,豆科植物总 BVOCs 释放速率与 c_i 显著正相关,倍半萜释放速率与 T_i 呈显著正相关,BVOCs 释放速率与叶片 P_n 和 g_s 两个参数未发现显著相关性。

参考文献:

- [1] 胡春芳,袁相洋,田媛,等. 常见花卉植物释放挥发性有机化合物的研究进展[J]. 生态学杂志, 2018, 37(2): 588-595.
Hu C F, Yuan X Y, Tian Y, et al. A review on biogenic volatile organic compounds emitted from common flower plants [J]. Chinese Journal of Ecology, 2018, 37(2): 588-595.
- [2] Fehsenfeld F, Calvert J, Fall R, et al. Emissions of volatile organic compounds from vegetation and the implications for

- atmospheric chemistry [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 1992, **6**(4): 389-430.
- [3] Guenther A B, Zimmerman P R, Harley P C, *et al.* Isoprene and monoterpene emission rate variability: model evaluations and sensitivity analyses [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1993, **98**(D7): 12609-12617.
- [4] Laothawornkitkul J, Taylor J E, Paul N D, *et al.* Biogenic volatile organic compounds in the Earth system [J]. *New Phytologist*, 2009, **183**(1): 27-51.
- [5] Guenther A B, Jiang X, Heald C L, *et al.* The model of emissions of gases and aerosols from nature version 2.1 (MEGAN2.1): an extended and updated framework for modeling biogenic emissions [J]. *Geoscientific Model Development*, 2012, **5**(6): 1471-1492.
- [6] Peñuelas J, Staudt M. BVOCs and global change[J]. *Trends in Plant Science*, 2010, **15**(3): 133-144.
- [7] Fuentes J D, Lerdau M, Atkinson R, *et al.* Biogenic hydrocarbons in the atmospheric boundary layer: a review[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2000, **81**(7): 1537-1575.
- [8] Fineschi S, Loreto F. Leaf volatile isoprenoids: an important defensive armament in forest tree species [J]. *iForest-Biogeosciences and Forestry*, 2012, **5**(1): 13-17.
- [9] 高宇, 孙晓玲, 金珊, 等. 绿叶挥发物及其生态功能研究进展[J]. *农学学报*, 2012, **2**(4): 11-23.
- Gao Y, Sun X L, Jin S, *et al.* Advances in green leaf volatiles and its ecological functions[J]. *Journal of Agriculture*, 2012, **2**(4): 11-23.
- [10] Wiedinmyer C, Friedfeld S, Baugh W, *et al.* Measurement and analysis of atmospheric concentrations of isoprene and its reaction products in central Texas[J]. *Atmospheric Environment*, 2001, **35**(6): 1001-1013.
- [11] Bonn B, Moortgat G K. Sesquiterpene ozonolysis: origin of atmospheric new particle formation from biogenic hydrocarbons [J]. *Geophysical Research Letters*, 2003, **30**(11): 1585.
- [12] Kulmala M, Suni T, Lehtinen K E J, *et al.* A new feedback mechanism linking forests, aerosols, and climate [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2004, **4**(2): 557-562.
- [13] Peñuelas J, Llusia J. BVOCs: plant defense against climate warming? [J]. *Trends in Plant Science*, 2003, **8**(3): 105-109.
- [14] Calfapietra C, Fares S, Manes F, *et al.* Role of Biogenic Volatile Organic Compounds (BVOC) emitted by urban trees on ozone concentration in cities: a review[J]. *Environmental Pollution*, 2013, **183**: 71-80.
- [15] Gates D M. Transpiration and leaf temperature [J]. *Annual Review of Plant Physiology*, 1968, **19**(1): 211-238.
- [16] Weng Q H, Lu D S, Schubring J. Estimation of land surface temperature-vegetation abundance relationship for urban heat island studies[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2004, **89**(4): 467-483.
- [17] Khedive E, Shirvany A, Assareh M H, *et al.* In situ emission of BVOCs by three urban woody species [J]. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2017, **21**: 153-157.
- [18] McPherson E G, Simpson J R, Xiao Q F, *et al.* Million trees Los Angeles canopy cover and benefit assessment[J]. *Landscape and Urban Planning*, 2011, **99**(1): 40-50.
- [19] Ren Y, Qu Z L, Du Y Y, *et al.* Air quality and health effects of biogenic volatile organic compounds emissions from urban green spaces and the mitigation strategies [J]. *Environmental Pollution*, 2017, **230**: 849-861.
- [20] Ghirardo A, Xie J F, Zheng X H, *et al.* Urban stress-induced biogenic VOC emissions and SOA-forming potentials in Beijing [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2016, **16**(5): 2901-2920.
- [21] Owen S M, Harley P, Guenther A, *et al.* Light dependency of VOC emissions from selected Mediterranean plant species [J]. *Atmospheric Environment*, 2002, **36**(19): 3147-3159.
- [22] Kesselmeier J, Staudt M. Biogenic Volatile Organic Compounds (VOC): an overview on emission, physiology and ecology [J]. *Journal of Atmospheric Chemistry*, 1999, **33**(1): 23-88.
- [23] Owen S, Boissard C, Street R A, *et al.* Screening of 18 mediterranean plant species for volatile organic compound emissions [J]. *Atmospheric Environment*, 1997, **31**(S1): 101-117.
- [24] Chen J G, Bi H X, Yu X X, *et al.* Influence of physiological and environmental factors on the diurnal variation in emissions of biogenic volatile compounds from *Pinus tabulaeformis* [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2019, **81**: 102-118.
- [25] Eller A S D, Young L L, Trowbridge A M, *et al.* Differential controls by climate and physiology over the emission rates of biogenic volatile organic compounds from mature trees in a semi-arid pine forest [J]. *Oecologia*, 2016, **180**(2): 345-358.
- [26] 北京市园林绿化局. 北京市城市园林绿化普查资料汇编-2005 [M]. 北京: 北京出版社, 2006.
- [27] 李双江, 袁相洋, 李琦, 等. 12 种常见落叶果树 BVOCs 排放清单和排放特征 [J]. *环境科学*, 2019, **40**(5): 2078-2085.
- Li S J, Yuan X Y, Li Q, *et al.* Inventory and characteristics of biogenic volatile organic compounds (BVOCs) for 12 deciduous fruit trees [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(5): 2078-2085.
- [28] Ortega J, Helmig D, Daly R W, *et al.* Approaches for quantifying reactive and low-volatility biogenic organic compound emissions by vegetation enclosure techniques-part B: applications [J]. *Chemosphere*, 2008, **72**(3): 365-380.
- [29] 李俊仪, 田梁宇, 伦小秀, 等. 北京地区植物源挥发性有机物(BVOCs)排放清单 [J]. *环境化学*, 2017, **36**(4): 776-786.
- Li J Y, Tian L Y, Lun X X, *et al.* Emission inventory of botanical volatile organic compounds (BVOCs) in Beijing [J]. *Environmental Chemistry*, 2017, **36**(4): 776-786.
- [30] Aydin Y M, Yaman B, Koca H, *et al.* Biogenic Volatile Organic Compound (BVOC) emissions from forested areas in Turkey: determination of specific emission rates for thirty-one tree species [J]. *Science of the Total Environment*, 2014, **490**: 239-253.
- [31] 王志辉, 张树宇, 陆思华, 等. 北京地区植物 VOCs 排放速率的测定 [J]. *环境科学*, 2003, **24**(2): 7-12.
- Wang Z H, Zhang S Y, Lu S H, *et al.* Screenings of 23 plant species in Beijing for volatile organic compound emissions [J]. *Environmental Science*, 2003, **24**(2): 7-12.
- [32] Karl M, Guenther A, Köble R, *et al.* A new European plant-specific emission inventory of biogenic volatile organic compounds for use in atmospheric transport models [J]. *Biogeosciences*, 2009, **6**(6): 1059-1087.
- [33] 牟玉静, 宋文质, 张晓山, 等. 落叶阔叶树异戊二烯排放研究 [J]. *环境化学*, 1999, **18**(1): 21-27.
- Mu Y J, Song W Z, Zhang X S, *et al.* Study on emissions of isoprene from deciduous and broadleaf trees [J]. *Environmental Chemistry*, 1999, **18**(1): 21-27.
- [34] 李品, 冯兆忠, 尚博, 等. 6 种绿化树种的气孔特性与臭氧剂量的响应关系 [J]. *生态学报*, 2018, **38**(8): 2710-2721.

- Li P, Feng Z Z, Shang B, *et al.* Stomatal characteristics and ozone dose-response relationships for six greening tree species [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, **38**(8): 2710-2721.
- [35] Klinger L F, Li Q J, Guenther A B, *et al.* Assessment of volatile organic compound emissions from ecosystems of China [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2002, **107**(D21): ACH 16-1-ACH 16-21.
- [36] Curtis A J, Helmig D, Baroch C, *et al.* Biogenic volatile organic compound emissions from nine tree species used in an urban tree-planting program [J]. *Atmospheric Environment*, 2014, **95**: 634-643.
- [37] Winters A J, Adams M A, Bleby T M, *et al.* Emissions of isoprene, monoterpene and short-chained carbonyl compounds from *Eucalyptus* spp. in southern Australia [J]. *Atmospheric Environment*, 2009, **43**(19): 3035-3043.
- [38] 陈颖, 史奕, 何兴元. 沈阳市四种乔木树种 BVOCs 排放特征 [J]. *生态学杂志*, 2009, **28**(12): 2410-2416.
Chen Y, Shi Y, He X Y. Emission characteristics of biogenic volatile organic compounds from four tree species in Shenyang, China [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2009, **28**(12): 2410-2416.
- [39] 李洪远, 王芳, 熊善高, 等. 植物挥发性有机物的作用与释放影响因素研究进展 [J]. *安全与环境学报*, 2015, **15**(2): 292-296.
Li H Y, Wang F, Xiong S G, *et al.* Research review on the role and the influential factors of the biogenic volatile organic compounds [J]. *Journal of Safety and Environment*, 2015, **15**(2): 292-296.
- [40] Benjamin M T, Sudol M, Bloch L, *et al.* Low-emitting urban forests: a taxonomic methodology for assigning isoprene and monoterpene emission rates [J]. *Atmospheric Environment*, 1996, **30**(9): 1437-1452.
- [41] Matsunaga S N, Shimada K, Masuda T, *et al.* Emission of biogenic volatile organic compounds from trees along streets and in urban parks in Tokyo, Japan [J]. *Asian Journal of Atmospheric Environment*, 2017, **11**(1): 29-32.
- [42] 张倩, 李洪远, 吕铃钥, 等. 不同绿地类型下城市绿化树种 BVOCs 排放特征 [J]. *水土保持通报*, 2017, **37**(3): 22-27, 34.
- [43] Benjamin M T, Winer A M. Estimating the ozone-forming potential of urban trees and shrubs [J]. *Atmospheric Environment*, 1998, **32**(1): 53-68.
- [44] Owen S M, Boissard C, Hewitt C N. Volatile organic compounds (VOCs) emitted from 40 Mediterranean plant species: VOC speciation and extrapolation to habitat scale [J]. *Atmospheric Environment*, 2001, **35**(32): 5393-5409.
- [45] Wang C T, Wiedinmyer C, Ashworth K, *et al.* Leaf enclosure measurements for determining volatile organic compound emission capacity from *Cannabis* spp. [J]. *Atmospheric Environment*, 2019, **199**: 80-87.
- [46] Harrison S P, Morfopoulos C, Dani K G S, *et al.* Volatile isoprenoid emissions from plastid to planet [J]. *New Phytologist*, 2013, **197**(1): 49-57.
- [47] Guidolotti G, Calfapietra C, Loreto F. The relationship between isoprene emission, CO₂ assimilation and water use efficiency across a range of poplar genotypes [J]. *Physiologia Plantarum*, 2011, **142**(3): 297-304.
- [48] Loreto F, Ciccioli P, Cecinato A, *et al.* Evidence of the photosynthetic origin of monoterpenes emitted by *Quercus ilex* L. leaves by ¹³C labeling [J]. *Plant Physiology*, 1996, **110**(4): 1317-1322.
- [49] Laffineur Q, Aubinet M, Schoon N, *et al.* Isoprene and monoterpene emissions from a mixed temperate forest [J]. *Atmospheric Environment*, 2011, **45**(18): 3157-3168.
- [50] Filella I, Peñuelas J, Llusà J. Dynamics of the enhanced emissions of monoterpenes and methyl salicylate, and decreased uptake of formaldehyde, by *Quercus ilex* leaves after application of jasmonic acid [J]. *New Phytologist*, 2006, **169**(1): 135-144.
- [51] Yuan X Y, Shang B, Xu Y S, *et al.* No significant interactions between nitrogen stimulation and ozone inhibition of isoprene emission in Cathay poplar [J]. *Science of the Total Environment*, 2017, **601-602**: 222-229.
- [52] Jardine K, Harley P, Karl T, *et al.* Plant physiological and environmental controls over the exchange of acetaldehyde between forest canopies and the atmosphere [J]. *Biogeosciences*, 2008, **5**(6): 1559-1572.
- [53] Yuan X Y, Calatayud V, Gao F, *et al.* Interaction of drought and ozone exposure on isoprene emission from extensively cultivated poplar [J]. *Plant, Cell & Environment*, 2016, **39**(10): 2276-2287.
- [54] 花圣卓, 陈俊刚, 余新晓, 等. 温带典型森林树种的萜烯类化合物排放及其与环境要素的相关性 [J]. *林业科学*, 2016, **52**(11): 19-28.
Hua S Z, Chen J G, Yu X X, *et al.* Correlation between terpenes emission from typical forest tree species and environmental elements in temperate zone [J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2016, **52**(11): 19-28.

CONTENTS

Comparison Analysis of the Effect of Emission Reduction Measures for Major Events and Heavy Air Pollution in the Capital	ZHONG Yi-sheng, ZHOU Ying, CHENG Shui-yuan, <i>et al.</i>	(3449)
Evaluation of Different ISORROPIA-II Modes and the Influencing Factors of Aerosol pH Based on Tianjin Online Data	GAO Jie, SHI Xu-rong, WEI Yu-ting, <i>et al.</i>	(3458)
Emission Characteristics of Particulate Organic Matter from Cooking	LI Yuan-ju, WU Ai-hua, TONG Meng-xue, <i>et al.</i>	(3467)
Characteristics and Sources of 12 Trace Amount Elements in PM _{2.5} During a Period of Heavy Pollution in Huanggang, Central China	CHEN Zhan-le, TIAN Qian, MAO Yao, <i>et al.</i>	(3475)
Aerosol Optical Properties over the Ebinur Region	ZHANG Zhe, DING Jian-li, WANG Jin-jie	(3484)
Characteristics of Secondary Organic Particles and the Potential Formation of SOA from VOCs During Wintertime Heavy Pollution Episodes in Tianjin	XU Hong, TANG Miao, XIAO Zhi-mei, <i>et al.</i>	(3492)
Characteristics and Source Apportionment of VOCs at Different Pollution Levels During the Winter in an Urban Area in Zhengzhou	LI Yi-dan, YIN Sha-sha, ZHANG Rui-qin, <i>et al.</i>	(3500)
Emission Inventory of Intermediate Volatility Organic Compounds (IVOCs) from Biomass Burning in the Yangtze River Delta During 2010-2018	ZHU Yong-hui, WANG Qian, HUANG Ling, <i>et al.</i>	(3511)
Emission Characteristics of Biogenic Volatile Compounds (BVOCs) from Common Greening Tree Species in Northern China and Their Correlations with Photosynthetic Parameters	XU Yan, LI Shuang-jiang, YUAN Xiang-yang, <i>et al.</i>	(3518)
Characteristics of Surface Ozone and Impact Factors at Different Station Types During the Autumn in Guangzhou	GAO Ping, ZHUANG Li-yue, WANG Long, <i>et al.</i>	(3527)
Pollution Characteristics and Sensitivity Analysis of Atmospheric Ozone in Taian City	LI Kai, LIU Min, MEI Ru-bo	(3539)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Road Dust from Non-ferrous Smelting Parks	FENG Yu-yao, SHI Jian-wu, ZHONG Yao-qian, <i>et al.</i>	(3547)
Pollution and Source Analysis of Heavy Metal in Surface Dust from Xi'an University Campuses	FAN Xin-yao, LU Xin-wei, LIU Hui-min, <i>et al.</i>	(3556)
Monitoring Method of Total Particulate Matter in Ultra-low-emission and High-humidity Exhaust Gas from Stationary Sources and an Actual Test in a Gas Power Plant	HU Yue-qi, YAN Xu, KONG Chuan, <i>et al.</i>	(3563)
Vessels' Air Pollutant Emissions Inventory and Emission Characteristics in the Xiamen Emission Control Area	WANG Jian, HUANG Zhi, LIU Yan-ying, <i>et al.</i>	(3572)
Method for High-resolution Emission Inventory for Road Vehicles in Chengdu Based on Traffic Flow Monitoring Data	PAN Yu-jin, LI Yuan, CHEN Jun-hui, <i>et al.</i>	(3581)
Inversion of Water Quality Parameters Based on UAV Multispectral Images and the OPT-MPP Algorithm	HUANG Xin-xi, YING Han-ting, XIA Kai, <i>et al.</i>	(3591)
Effects of Different Water Stratification on the Vertical Distribution of Nitrogen in Sediment Interstitial Waters: A Case Study of the Three Gorges Reservoir and Xiaowan Reservoir	LIU Jing-si, ZHU Xiao-sheng, HU Zi-long, <i>et al.</i>	(3601)
Pollution Status and Pollution Behavior of Microplastic in Surface Water and Sediment of Urban Rivers	ZHAO Xin, CHEN Hao, JIA Qi-long, <i>et al.</i>	(3612)
Spatial and Temporal Variation of Phytoplankton Community Structure and Its Influencing Factors in Shanghai River Channels	XU Zhi, CHEN Xiao-hua, SHEN Gen-xiang, <i>et al.</i>	(3621)
Restoration of River Sediment by Calcium Peroxide (CaO ₂) Combined with Biochar	LI Yu-ping, JIANG Ying-ying, LIU Bao-ming, <i>et al.</i>	(3629)
Quantification of Nitrate Sources to Groundwater in Karst Trough-valley Areas Based on Dual Stable Isotopes of $\delta^{15}\text{N-NO}_3^-$ and $\delta^{18}\text{O-NO}_3^-$ and the IsoSource Model	XU Lu, JIANG Yong-jun, DUAN Shi-hui, <i>et al.</i>	(3637)
Dynamic Process of Nitrogen and Phosphorus Export and Loss Load in an Intensive Orchard with Ridge and Furrow Plantation in the Three Gorges Reservoir Area	YAN Kun, WANG Yu-kuan, LIU Qin, <i>et al.</i>	(3646)
Analysis of Rainfall Runoff Pollution and Pollution Load Estimation for Urban Communities in a Highly Urbanized Region	GAO Bin, XU You-peng, LU Miao, <i>et al.</i>	(3657)
Adsorption of As(III) in Water by Iron-loaded Graphene Oxide-Chitosan	ZHAO Chao-ran, SHAN Hui-mei, ZENG Chun-ya, <i>et al.</i>	(3665)
Sorption Behaviors of Copper Ions and Tetracycline on Microplastics in Aqueous Solution	XUE Xiang-dong, WANG Xing-yuan, MEI Yu-chen, <i>et al.</i>	(3675)
Effect of Porous Fillers Properties on Biofilm Growth	JIANG Yu-qin, LI Jiong-hui, FANG Zhi-guo	(3684)
Adaptability of Nitrifying Biofilm Systems to Low Temperature: MBBR and IFAS	LI Ren, YU Li-fang, ZHANG Xing-xiu, <i>et al.</i>	(3691)
Improved on Nitrogen Removal of Anaerobic Ammonia Oxidation by Coupling Element Sulfur-based Autotrophic Short-cut Denitrification	FANG Wen-ye, LI Xiang, HUANG Yong, <i>et al.</i>	(3699)
Nitrogen and Phosphorus Removal from Domestic Sewage Aerobic Granular Sludge Under Intermittent Gradient Aeration	ZHANG Yu-jun, LI Dong, LI Shuai, <i>et al.</i>	(3707)
Rapid Start-up and Stability of Partial Denitrification Based on Different Waste Sludge Sources	ZHANG Xing-xing, WANG Chao-chao, WANG Yao, <i>et al.</i>	(3715)
Decision-making Analysis of Excess Sludge Pretreatment for Struvite Recovery Based on AHP-PROMETHEE II Method	LIU Xiao-lei, LI An-jie	(3725)
Effect on Ammonia Inhibition Mitigation in the Anaerobic Digestion Process with Zero-Valent Iron	LIU Ji-bao, NIU Yu-tong, YU Da-wei, <i>et al.</i>	(3731)
Performance of Anaerobic Membrane Bioreactors for the Co-digestion of Sewage Sludge and Food Waste	DAI Jin-jin, NIU Cheng-xin, PAN Yang, <i>et al.</i>	(3740)
Antibiotics Induce Horizontal Gene Transfer of Resistance at Sublethal Concentrations	YUAN Qi-yi, CHEN Hong-jie, Laurence Haller, <i>et al.</i>	(3748)
Impact of Tetracycline Antibiotic on the Transcriptional Expression of Tetracycline Resistance Genes in <i>Shigella flexneri</i>	GAO Pin, RUAN Xiao-hui, QIU Wen-jie, <i>et al.</i>	(3758)
Competitive Selection of Hydroxylamine on Ammonia Oxidizing Bacteria and Nitrite Oxidizing Bacteria	QIAO Xin, WANG Bo, GUO Yuan-yuan, <i>et al.</i>	(3765)
Analysis of the Effect of Temperature on the Microbial Flora Structure During the Nitrite Oxidation Process Using 16S rRNA High-throughput Sequencing	HOU Xiao-wei, NIU Yong-jian, LI Wei-wei, <i>et al.</i>	(3773)
Universality and Potential Application of Mn(II) Oxidation Triggered by Microbial Interspecies Interactions	NING Xue, LIANG Jin-song, BAI Yao-hui, <i>et al.</i>	(3781)
Distribution and Potential Nitrification Rates of Aerobic Ammonia-Oxidizing Microorganisms in Surface Sediments of Mangrove in Sanya River	LUO Qing, ZHEN Yu, PENG Zong-bo, <i>et al.</i>	(3787)
Effects of Ozone Pollution on Growth, Yields, and Mineral Metallic Element Contents of Paddy Rice	FANG Xiao-kun, LUO Xiao-san, ZHANG Dan, <i>et al.</i>	(3797)
Short Term Effects of a Changing Carbon Input on the Soil Respiration of <i>Picea schrenkiana</i> Forests in the Tianshan Mountains, Xinjiang	SHAO Kang, GONG Lu, HE Xue-min, <i>et al.</i>	(3804)
Effects of the Combined Application of Organic and Inorganic fertilizers on N ₂ O Emissions from Saline Soil	ZHOU Hui, SHI Hai-bin, GUO Jia-wei, <i>et al.</i>	(3811)
Mechanism and Influencing Factors of Increasing Soil Temperature by <i>in-situ</i> Electrical Resistance Heating	GE Song, MENG Xian-rong, XU Wei, <i>et al.</i>	(3822)
Acid Mine Wasteland Reclamation by <i>Juncus ochraceus</i> Buchen as a Potential Pioneer Plant	HUANG Jian-hong, FU Jiang-li, YAN Xin-rui, <i>et al.</i>	(3829)
Effects of Drip Irrigation Patterns and Biochar Addition on Soil Mineral Nitrogen and Microbial Regulation of Greenhouse	CAI Jiu-mao, LIU Jie-yun, QIU Hu-sen, <i>et al.</i>	(3836)
Effects of Cotton Stalk Biochar on the Structure and Function of Fungi Community in Alkaline Rhizosphere Soil of Rice Under Cadmium Pollution	LIU Shi-dou, HAN Yao-guang, ZHU Xin-ping, <i>et al.</i>	(3846)
Effects of Different Treatments with Water Management Combined with Leaf Spraying Silicon Fertilizer on Cd Accumulation in Rice	WEI Bin-yun, ZHOU Hang, LIU Jia-wei, <i>et al.</i>	(3855)
Effects of Chelate GLDA on the Remediation of Cadmium Contaminated Farmland by <i>Pennisetum purpureum</i> Schum	QIN Jian-jun, TANG Sheng-shuang, JIANG Kai, <i>et al.</i>	(3862)
Situation Analysis and Trend Prediction of the Prevention and Control Technologies for Planting Non-Point Source Pollution	YU Ying-liang, YANG Lin-zhang, LI Hong-na, <i>et al.</i>	(3870)