

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



2019

Vol.40 No.5
第40卷 第5期

目次

2016年10~11月期间北京市大气颗粒物污染特征与传输规律 张晗宇,程水源,姚森,王晓琦,张俊峰(1999)

餐饮排放有机颗粒物的质量浓度、化学组成及排放因子特征 王红丽,景盛翱,乔利平(2010)

泰山顶(1534 m)夏季气溶胶粒径分布特征 沈利娟,王红磊,银燕,陈魁,陈景华,施双双(2019)

郑州-新乡冬季PM_{2.5}中元素浓度特征及其源分析 闫广轩,张朴真,黄海燕,高雅,张靖雯,宋鑫,张佳羽,李怀刚,曹治国,姜继韶,樊静,王跃思,金彩霞(2027)

我国PM_{2.5}浓度分阶段改善目标情景分析 贺晋瑜,燕丽,王彦超,雷宇,汪旭颖(2036)

安阳市典型工业源PM_{2.5}排放特征及减排潜力估算 杜小申,燕丽,贺晋瑜,汪旭颖,王克,张瑞芹(2043)

郑州市典型工业炉窑细颗粒物排放特征及清单 赵庆炎,韩士杰,张轶舜,杨留明,张瑞芹,燕启社(2052)

2015年南京市城区挥发性有机物组成特征及大气反应活性 乔月珍,陈凤,赵秋月,刘倩(2062)

兰州市化石燃料燃烧源排放VOCs的臭氧及二次有机气溶胶生成潜势 刘镇,朱玉凡,郭文凯,刘晓,陈强(2069)

12种常见落叶果树BVOCs排放清单和排放特征 李双江,袁相洋,李琦,冯兆忠(2078)

我国典型陆地生态系统水化学离子特征及空间分布 黄丽,张心昱,袁国富,朱治林,唐新斋,孙晓敏(2086)

我国典型区域地表水环境中抗生素污染现状及其生态风险评价 刘昔,王智,王学雷,李珍,杨超,厉恩华,位慧敏(2094)

我国七大流域水体多环芳烃的分布特征及风险评价 范博,王晓南,黄云,李霖,高祥云,李雯雯,刘征涛(2101)

大连海域入海污染源中PFASs的赋存、输入通量和季节特征 陈虹,韩建波,张灿,程嘉熠(2115)

干旱内陆河流域降水稳定同位素的时空特征及环境意义 袁瑞丰,李宗省,蔡玉琴,邹海明(2122)

柳林泉域岩溶地下水区域演化规律及控制因素 黄奇波,覃小群,刘朋雨,程瑞瑞,李腾芳(2132)

崇左响水地区岩溶地下水主要离子特征及控制因素 周巾枚,蒋忠诚,徐光黎,覃小群,黄奇波,张连凯(2143)

三峡水库水体溶解磷与颗粒磷的输移转化特征分析 秦延文,韩超南,郑丙辉,马迎群,杨晨晨,刘志超,张雷,赵艳民(2152)

三峡水库蓄水至175 m后干流沉积物磷蓄积特征及释放潜力 黎睿,潘婵娟,汤显强,肖尚斌,李青云,杨文俊(2160)

不同水期洞庭湖水体中磷分布特征及影响因素 李莹杰,王丽婧,李虹,欧阳美凤(2170)

巢湖十五里河沉积物磷平衡浓度对外源磷的响应及释放风险 李如忠,鲍琴,戴源(2178)

闽江上游溪流沉积物有机磷空间分布及其环境意义分析 徐健,袁旭音,叶宏萌,张晓辉,周慧华,韩年(2186)

生态工程综合治理系统对农业小流域氮磷污染的治理效应 蒋倩文,刘锋,彭英湘,王华,姚燃,李红芳,罗沛,刘新亮,吴金水(2194)

太湖流域河流沉积物重金属分布及污染评估 张杰,郭西亚,曾野,邓建才(2202)

三峡水库支流汝溪河口水体汞的时空变化特征 马尉斌,陈秋禹,尹德良,孙涛,王永敏,王定勇(2211)

多功能型城市人工湿地水体汞分布特征及其量变分析 刘伟豪,王永敏,樊宇飞,吕东威,王定勇(2219)

不同类型城市人工湿地水体汞的分布特征 樊宇飞,刘伟豪,孙涛,苑萌,吕东威,李先源,王永敏,王定勇(2226)

微塑料对河口沉积物抗生素抗性基因的影响 黄福义,杨凯,张子兴,苏建强,朱永官,张娟(2234)

上海市郊道路地表径流多环芳烃污染特征对比及源解析 吴杰,熊丽君,吴健,沙晨燕,唐浩,林匡飞,李大雁,沈城(2240)

异龙湖不同湖区浮游植物群落特征及其与环境因子的关系 王振方,张玮,杨丽,徐玉萍,赵凤斌,王丽卿(2249)

水库热分层期藻类水华与温跃层厌氧成因分析 刘雪晴,黄廷林,李楠,杨尚业,李扬,徐进,王涵玥(2258)

绿狐尾藻对铜绿微囊藻和羊角月牙藻的抑藻效应 毕业亮,吴诗敏,周思宁,吴尚华,宿辉,白志辉,徐圣君(2265)

紫外/亚硫酸钠还原降解三氯乙酰胺的效能 伏芝萱,郭迎庆,楚文海(2271)

UV降解水溶液中拉法辛的影响因素及机制 吕娟,许志伟,王言(2278)

铝代水铁矿协同吸附砷的机制 黄博,郭朝晖,肖细元,彭驰,朱惠文,史磊,阳安迪(2287)

新型材料磁性氧化铁的除氯效能 方文侃,李小娣,方菁,吴德意(2295)

羧基改性阴极对微生物电合成系统产乙酸性能的影响机制 祁家欣,曾翠平,骆海萍,刘广立,张仁铎,卢耀斌(2302)

基于分区供氧与溶解氧调控的低C/N比污水短程硝化反硝化 吴春雷,荣懿,刘晓鹏,史会欣,章武首,金鹏康,马文伟(2310)

不同COD浓度下低基质厌氧氨氧化的启动特征 马艳红,赵智超,安芳娇,黄利,师晓娟,慕浩,陈永志(2317)

15°C SBBR短程硝化快速启动和稳定运行性能 孙艺齐,卞伟,李军,赵青,王文啸,梁东博,吴耀东(2326)

长期低聚磷条件对AO-SBR系统Accumulibacter代谢特性的影响 王少坡,李柱,赵乐丹,于静洁,赵明,郑胜达,孙力平(2333)

厌氧氨氧化颗粒污泥EPS及其对污泥表面特性的影响 杨明明,刘子涵,周杨,祁菁,赵凡,郭劲松,方芳(2341)

HN-AD菌生物强化接触氧化工艺处理猪场沼液 刘向阳,张千,吴恒,李宸,唐健泓,封丽,肖芃颖,赵天涛(2349)

温度对自养型同步脱氮工艺处理猪场废水厌氧消化液性能及微生物群落的影响 黄方玉,邓良伟,杨红男,杨含,肖友乾,王兰(2357)

城市污水处理系统真核微生物群落特性与地域性差异 秦文韬,张冰,孙晨翔,陈湛,文湘华(2368)

三江平原湿地开垦对土壤微生物群落结构的影响 王娜,高婕,魏静,刘颖,庄绪亮,庄国强(2375)

亚高山湖群中真菌群落的分布格局和多样性维持机制 刘晋仙,李鑫,罗正明,王雪,暴家兵,柴宝峰(2382)

生物质炭对双季稻田土壤反硝化功能微生物的影响 刘杰云,邱虎森,王聪,沈健林,吴金水(2394)

地膜覆盖和施氮对菜地CH₄排放的影响 倪雪,江长胜,陈世杰,李晓茜,石孝均,郝庆菊(2404)

亏缺灌溉对冬小麦农田温室气体排放的影响 王晓云,蔡焕杰,李亮,徐家屯,陈慧(2413)

不同施肥模式对热区晚稻田CH₄和N₂O排放的影响 田伟,伍延正,汤水荣,胡玉麟,赖倩倩,文冬妮,孟磊,吴川德(2426)

周期性变温对紫色土有机碳矿化的影响 曾蔓蔓,慈思,樊晶晶,李江文,翁吴璐,李松(2435)

广西高镉异常区水田土壤Cd含量特征及生态风险评价 宋波,王佛鹏,周浪,吴勇,庞瑞,陈同斌(2443)

超富集植物藿香蓟(Ageratum conyzoides L.)对镉污染农田的修复潜力 张云霞,宋波,宾娟,周子阳,陈记玲,陈同斌(2453)

种植油菜麦评价多环芳烃污染土壤的农用风险 焦海华,郭佳佳,张婧旻,张晓霞,茹文明,白志辉(2460)

土壤重金属累积对土地利用与景观格局的响应 舒心,李艳,李锋,冯靖仪,沈嘉瑜,史舟(2471)

某区生活垃圾焚烧发电厂周边及厂区内土壤中重金属元素的污染特征及评价 吕占禄,张金良,陆少游,邹天森,刘凯,张晗,谷亚亚(2483)

《环境科学》征订启事(2018) 《环境科学》征稿简则(2042) 信息(2114, 2348, 2393)

12种常见落叶果树BVOCs排放清单和排放特征

李双江^{1,2}, 袁相洋², 李琦^{1*}, 冯兆忠^{2,3*}

(1. 西北大学城市与环境学院, 西安 710127; 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. 南京信息工程大学环境科学与工程学院, 南京 210044)

摘要: 为了解城市近郊区域植物源挥发性有机化合物(biogenic volatile organic compounds, BVOCs)排放情况, 运用动态采样法对北京地区广泛种植的12种典型落叶果树(其中9种为首次报道)BVOCs进行野外采样和实验室分析. 结果表明, 果树释放物中含有烃类、醇类和醛类等9类物质, 烃类含量最高, 占39.0%. 12种果树均释放异戊二烯和单萜(6种果树释放倍半萜), 其中, 桃等3种果树为高BVOCs排放树种, 海棠等9种果树为中等BVOCs排放树种. 果树总BVOCs(异戊二烯、单萜和倍半萜之和)释放速率在(2.6 ± 0.1) ~ (14 ± 0.8) μg·(g·h)⁻¹之间, 其中杏子总BVOCs释放速率最高[(14 ± 0.8) μg·(g·h)⁻¹]. 对不同科属及生活型果树BVOCs进行显著性分析发现, 木本类果树异戊二烯释放速率[(4.2 ± 1.4) μg·(g·h)⁻¹]显著高于藤本类[(0.6 ± 0.2) μg·(g·h)⁻¹, P = 0.03], 但果树BVOCs的释放速率不具有显著的科属差异, 暂不能依据果树科属关系对BVOCs释放水平进行分类. 与松柏科植物不同, 具有花香或脂香味的β-月桂烯(β-myrcene)、D-柠檬烯(D-limonene)和γ-松油烯(γ-terpinene)是果树释放的主要成分, β-月桂烯(β-myrcene)含量最高, 占单萜总释放量的59.3%. 此外, 果树还可能释放芴、菲和萘等8种具有芳香味的有毒有害大气污染物. 本研究拓展了BVOCs研究领域, 为丰富BVOCs数据库及BVOCs环境效应评估提供了基础数据.

关键词: 植物源挥发性有机化合物(BVOCs); 果树; 有毒有害大气污染物; 排放清单; 排放特征

中图分类号: X511 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)05-2078-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.201811240

Inventory and Characteristics of Biogenic Volatile Organic Compounds (BVOCs) for 12 Deciduous Fruit Trees

LI Shuang-jiang^{1,2}, YUAN Xiang-yang², LI Qi^{1*}, FENG Zhao-zhong^{2,3*}

(1. College of Urban and Environmental Science, Northwest University, Xi'an 710127, China; 2. State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Science, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China; 3. School of Environmental Science and Engineering, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China)

Abstract: To better understand the emission of biogenic volatile organic compounds (BVOCs) in suburbs, we selected 12 typical deciduous fruit trees and conducted field sampling and laboratory analysis of BVOCs using a dynamic sampling technique. To our knowledge, details of BVOC emissions for nine of the selected fruit tree species are reported here for the first time. Emissions of BVOCs from fruit trees contained nine kinds of compounds, including hydrocarbons, alcohols, and aldehydes, of which hydrocarbons accounted for up to 39.0%. All fruit trees were found to emit isoprene and monoterpenes (six species also emitted sesquiterpenes), of which three species were high emitters and nine species, such as *Catalpa*, were medium emitters. The emission rates of total BVOCs (including isoprene, monoterpenes, and sesquiterpenes) from different fruit trees ranged from (2.6 ± 0.1) μg·(g·h)⁻¹ to (14 ± 0.8) μg·(g·h)⁻¹. Analyses of BVOCs from different families and plant forms indicated that isoprene emission rates were significantly higher from woody fruit trees [(4.2 ± 1.4) μg·(g·h)⁻¹] than from vine fruit trees [(0.6 ± 0.2) μg·(g·h)⁻¹, P = 0.03], whereas there was no significant difference between family or genus. This suggests that the emission level of BVOCs from fruit trees cannot be classified by family and genera. In contrast to coniferous plants, β-myrcene, D-limonene, and γ-terpinene—associated with floral or resinous aromas—were the main monoterpenes of fruit trees. The emission rate of β-myrcene was highest, accounting for 59.3% of the total monoterpene emissions. In addition, fruit trees may emit eight other fragrant VOCs listed as hazardous air pollutants (HAPs), e.g., fluorene, phenanthrene, and naphthalene. This study expands the field of BVOCs research and provides basic data for enriching the BVOCs database, as well as for evaluating the environmental effects of BVOCs.

Key words: biogenic volatile organic compounds (BVOCs); fruit tree; hazardous air pollutants (HAPs); emissions inventory; emission characteristics

植物源挥发性有机化合物(BVOCs)是植物抵御外界环境热胁迫、氧化胁迫^[1]和生物侵害^[2]释放的次生代谢产物, 主要由异戊二烯(C₅H₈, isoprene)、单萜(C₁₀H₁₆, monoterpenes)、倍半萜(C₁₅H₂₄, sesquiterpenes)、醇、醛和酯类等物质组成. 从全球尺度看, BVOCs排放总量高达1150 Tg·a⁻¹^[3]远超于人为活动释放的VOCs. 同时, 该类

物质大多含有不饱和化学键, 具有较高的化学活

收稿日期: 2018-11-28; 修订日期: 2018-12-30

基金项目: 江苏省大气环境监测与污染控制高技术研究重点实验室开放基金项目(KHK1801); 国家重点研发计划项目(2017YFC0210106)

作者简介: 李双江(1993~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为植物源挥发性有机物及其生态效应, E-mail: 1871082928@163.com

* 通信作者, E-mail: qili726@163.com; zhzhfeng201@hotmail.com

性, 释放到大气中能够与羟基自由基($\cdot\text{OH}$)及硝酸根自由基($\cdot\text{NO}_3^-$)快速反应^[4], 并在适宜的外部条件下形成臭氧(O_3)、SOA 和 PAN 等二次污染物, 显著影响大气光化学反应和全球气候变化进程. 国外学者结合上世纪气候变化数据预测, 未来由 BVOCs 释放造成北半球 O_3 浓度升高 4 ~ 30 $\text{nmol}\cdot\text{mol}^{-1}$ ^[5].

基于经验动力学的 EKMA (empirical kinetic modeling approach) 模型发现, VOCs 浓度与其生成的光化学二次污染物浓度(尤其是 O_3)存在显著的非线性响应关系, 呈现出城市核心区及近郊区域 VOCs 浓度直接控制 O_3 浓度的特征^[6]. 已有观测数据表明城市近郊区域 O_3 浓度高于城市核心区^[7]. 而目前我国进行雾-霾、 O_3 等污染控制和源解析研究中着重关注人为源 VOCs (anthropogenic volatile organic compounds, AVOCs) 作用, 对 BVOCs 贡献的报道寥寥可数, 在此基础上提出的削减和治理措施可能并不能完全解决由 VOCs 引起的区域大气污染问题.

我国对不同植物释放 BVOCs 的研究有近 30 年的历史, 截至目前, 已经对不同地区的多种天然森林^[8]、经济林^[9]、灌木^[10]及草本^[11,12]等植物进行了研究, 但果树 BVOCs 排放清单和特征数据仍然存在很大空白. 由于不同树种 BVOCs 释放具有较大差异^[13], 并考虑到我国果树资源的多样性^[14], 以及在便利的交通条件和广阔的市场需求下, 果树广泛种植于城市近郊区域的现实, 因此非常有必要开展果树 BVOCs 释放清单和排放特征的研究. 本文系统报道了 12 种常见落叶果树 BVOCs 的释放情况, 通过丰富对于不同植物类型 BVOCs 释放特征的认识, 以期今后准确估算地区及全球尺度 BVOCs 排放总量提供科学依据和数据支撑.

1 材料与方法

1.1 实验区概况

本实验分别在北京市昌平区营坊村($\text{E}116^\circ17'$, $\text{N}40^\circ15'$)和北京市延庆区唐家堡村($\text{E}115^\circ59'$, $\text{N}40^\circ30'$)完成, 两地均为温带大陆性气候, 降水量 443 ~ 550 mm, 年平均气温 8 ~ 11.8 $^\circ\text{C}$, 年日照 2 700 ~ 2 800 h, 全年无霜期 160 ~ 200 d. 现栽培有

苹果、梨、柿子等多种果树, 果园实有面积达 52 512 hm^2 , 是北京重要的果品产区之一^[15].

1.2 实验设计

依据文献[16, 17]中我国果树种植基础资料, 将广泛栽培的 6 种蔷薇科果树苹果 (*Malus domestica*)、梨 (*Pyrus* spp.)、桃 (*Amygdalus persica*)、樱桃 (*Cerasus pseudocerasus*)、杏子 (*Armeniaca vulgaris*)和李子(*Prunus salicina*)及由红枣(*Ziziphus jujuba*)、柿子(*Diospyros kaki*)、海棠 (*Malus prunifolia*)、核桃 (*Juglans regia*)、葡萄 (*Vitis vinifera*)和猕猴桃(*Actinidia chinensis*)组成的 6 种其他科果树作为实验材料. 按照生活型差异, 前 10 种为木本类果树, 后 2 种为藤本类果树. 所有供试树种均为无扦插和嫁接且在自然状态下生长, 树龄超过 5 a 的实生苗木. 考虑到不同果树物候的差异, 在各果树果实处于膨大期至成熟期(7 ~ 9 月)时, 选择晴朗无风的天气, 于 10:00 ~ 15:00 对不同供试树种叶片水平 BVOCs 及比叶重(LMA)进行原位采集. 其中, BVOCs 采样部位为树冠向阳面疏密程度适中且长势相近的叶片. 为减少采集过程的误差, 保证数据的准确性, 每种果树选 3 株长势相近的植株作为重复, 并在采样期间采集空气本底作为空白对照.

实验运用经过改装的 Li-6400 便携式光合测定仪(Li-Cor, Inc, 美国)和抽气泵(GS1, Gerstel, 德国)组成的动态采样装置(图 1), 将 BVOCs 收集到装有 Tenax 填料的铜质吸附管中(热解析管, 目数 60/80, 英国 Markes). 同时利用 Li-6400 记录叶片温度(T_{leaf})和光合有效辐射(PAR), 方法详见文献[18]. 样品采集流量为 200 $\text{mL}\cdot\text{min}^{-1}$, 采样时长 25 min, 采样结束后立即用带有聚四氟乙烯涂层的黄铜帽密封采样管, 储存于 4 $^\circ\text{C}$ 恒温冰箱中, 随后运用 GC-MS 进行分析. 待叶片 BVOCs 采集结束后, 用直径为 13.5 mm 的打孔器避开叶片主脉, 在叶基到叶尖间随机取 10 钻叶片装于信封中, 带回实验室测定比叶重.

1.3 指标测定

1.3.1 比叶重测定

将叶片在 60 $^\circ\text{C}$ 的恒温烘箱中烘 48 h 至恒重后称重, 计算其比叶重($\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$).

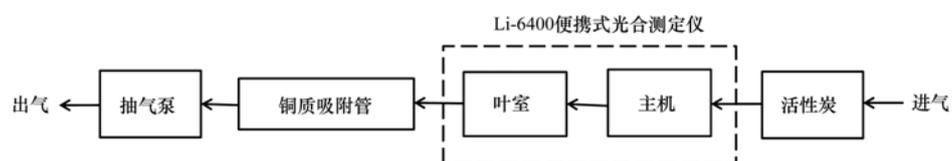


图 1 采样装置示意

Fig. 1 Schematic diagram of sampling devices

1.3.2 BVOCs 测定

BVOCs 的分析在配备有自动进样的热脱附仪 (TD-100) 和安捷伦气相色谱-质谱联用仪 (GC7890-MSD5975C, 安捷伦, 美国) 中进行. 升温程序如下: 样品经热脱附系统在 250℃ 下解析 5 min, 传输至 -50℃ 的冷阱中进行富集, 然后样品被注入 HP-5MS 石英毛细管色谱柱 (长度 30 m × 直径 0.25 mm × 膜厚 0.25 μm, 安捷伦, 美国) 中, 不分流进样, 载气为氦气, 色谱柱气体流速 1 mL·min⁻¹, 初始温度为 35℃ (保持 2 min), 以 5℃ 的速率升温至 160℃ (保持 3 min), 再以 20℃·min⁻¹ 程序升温升至 270℃ (保持 3 min), 共 38.5 min.

质谱以 EI 源方式电离, 扫描范围为 35 ~ 300 (*m/z*). 根据不同物质色谱保留时间的差异, 运用 NIST11. L 谱库的检索结果对 BVOCs 进行定性分析, 并通过配制异戊二烯 (isoprene)、D-柠檬烯 (D-limonene)、α-蒎烯 (α-pinene)、β-蒎烯 (β-pinene)、β-月桂烯 (β-myrcene)、γ-松油烯 (γ-terpinene) 及 β-丁香烯 (β-caryophyllene) 这 7 种物质的甲醇标准系列, 对 BVOCs 进行定量计算. 由于采样过程中叶片温度 (*T*_{leaf}) 和光合有效辐射 (PAR) 随外界环境小幅波动, 故将不同果树的 BVOCs 释放速率按照“G93 算法”^[19] 进行标准化处理, 得到标准状态下 [PAR = 1 000 μmol·(m²·s)⁻¹, *T*_{leaf} = 30℃] 的释放速率.

1.4 数据处理与分析

经 Excel 2016 对 BVOCs 数据初步整理及峰面

积归一化处理, 应用 SPSS 17.0 进行单因素方差分析, 采用 Turkey HSD 对 12 种果树 BVOCs 排放速率进行多重比较和显著性分析. 同时运用独立样本 *T* 检验, 对不同科属及生活型果树排放物进行显著性分析. 运用 Origin 9.0 Pro 绘图, 文中数据均为平均值 (*n* = 3) ± 标准误差 (SE).

2 结果与分析

2.1 果树释放物的种类及相对含量清单

运用 NIST11. L 谱库对不同果树的色谱总离子流出图 (TIC) 检索和自动匹配, 若匹配度大于 90% 的化合物, 表明可靠性高, 若匹配度小于 60%, 表明化合物可靠性差 (未计入统计结果), 以此得到各类 BVOCs 排放物数量和相对百分含量 (质量分数, 表 1). 12 种果树平均释放各类物质 50 种, 其中海棠释放物最多 (90 种), 李子 (53 种)、苹果 (42 种) 和核桃 (62 种) 较少, 猕猴桃释放物最少 (31 种), 不同树种差异较大, 释放物种类最多的果树比最少的高出 2 倍. 烃类、醇类、酯类、酚类以及含氧或含氮的其他化合物在 12 种果树释放物中均有检出. 此外李子、海棠和樱桃等释放物中还检出醛类、酸类、酮类及醚类物质. 从几何均值来看, 烃类化合物为果树释放物的主要成分, 各类化合物相对释放量大小依次为: 烃类 (39.0%) > 其他含氮含氧化合物 (20.4%) > 醇类 (10.4%) > 酯类 (7.1%) > 酸类 (7.0%) > 酚类 (5.8%) > 酮类 (5.6%) > 醛类 (3.7%) > 醚类 (1.0%).

表 1 果树释放物种类及相对含量清单¹⁾

Table 1 List of species and relative emitted contents from fruit trees

物种	释放物 (种)	烃类		醇类		酮类		酸类		酯类		酚类		醛类		醚类		其他	
		含量 /%	数量 (种)																
杏子	66	27.2	20	11.2	7	12.4	5	8.9	4	3.8	4	9.7	7	2.7	2	4.0	3	19.6	14
海棠	90	35.2	39	9.0	8	4.5	2	8.0	6	5.4	7	13.6	6	8.0	2	1.5	2	14.9	18
李子	53	36.0	27	1.8	2	23.4	4	3.3	2	1.0	1	16.6	7	3.1	1	1.1	1	13.8	8
樱桃	53	28.3	17	14.7	6	8.3	3	6.3	6	0.5	1	7.6	2	4.9	2	0.7	1	28.8	15
核桃	62	57.7	35	4.7	3	3.7	2	0.0	0	2.4	2	5.7	4	7.1	5	2.4	2	16.8	9
柿子	39	57.2	17	4.4	2	2.2	2	6.3	4	4.2	2	1.7	1	0.0	0	0.0	0	23.8	11
苹果	42	21.5	12	19.5	6	4.6	4	12.0	3	12.4	4	2.7	1	3.6	1	0.0	0	23.8	11
红枣	46	25.6	15	30.1	5	2.3	3	13.2	6	10.8	5	0.6	1	6.2	4	2.1	1	9.0	6
葡萄	48	47.2	17	12.8	7	0.7	1	7.0	4	11.9	7	1.8	3	1.5	2	0.0	0	17.1	7
桃	37	37.6	11	0.9	1	1.2	2	15.0	6	14.4	4	3.0	2	1.9	1	0.0	0	25.9	10
猕猴桃	31	50.5	13	10.0	3	1.1	1	4.4	4	9.7	3	1.9	1	0.0	0	0.0	0	22.3	6
梨	38	43.7	11	5.9	2	1.9	2	0.0	5	8.8	5	4.9	3	5.5	1	0.0	0	29.4	9

1) 表中数据为同种果树 3 株长势相近的重复植株的平均值

2.2 潜在污染物的识别

为进一步认识果树释放物, 建立果树有毒有害 BVOCs 排放名录. 依据美国国家环保署 (EPA) 在文献 [20] 中编制的有毒有害大气污染物数据库, 对不

同果树释放物进行筛选, 发现果树普遍释放一定数量的该类物质. 图 2 给出了各果树释放物中所含有毒有害大气污染物的种类和相对百分含量 (质量分数), 可以看出不同树种之间存在明显差别. 核桃释

放物含 11 种与有毒有害大气污染物数据库重复的物质, 释放量占核桃总释放物的 14.1%。然而, 梨的释放物中与有毒有害大气污染物存在交集的有 8 种化合物, 其相对含量达梨总释放物质的 24.4%。

通过归类统计, 表 2 给出了 12 种落叶果树释

放物中出现超过 4 次且匹配度大于 90% 的 8 种有毒有害大气污染物, 作为落叶果树潜在排放的有毒有害大气污染物。8 种物质中对-甲苯酚、甲苯等 7 种为苯系物, 其中芴、菲和萘等 4 种物质为多环芳烃类苯系物。

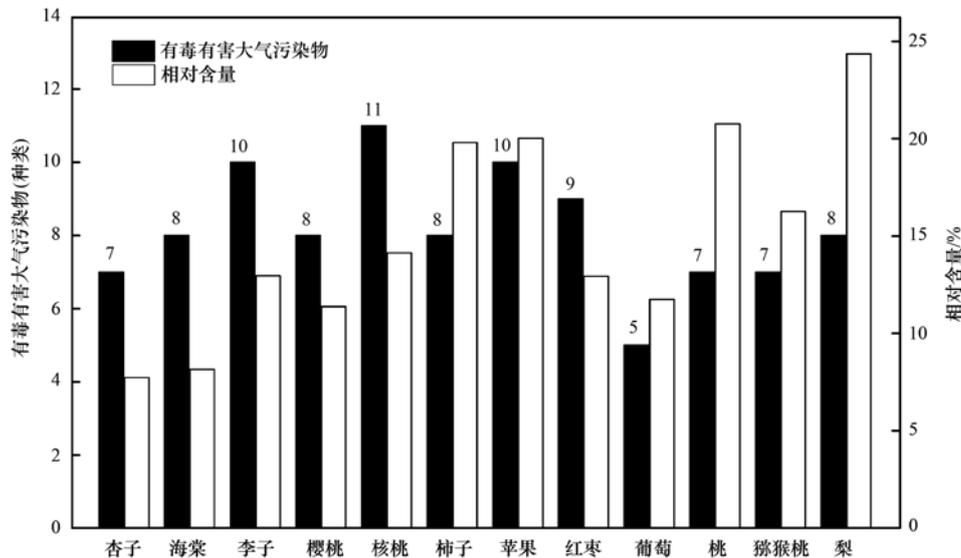


图 2 果树释放物中有毒有害大气污染物的种类及相对含量

Fig. 2 Species and relative content of HAPs in the fruit trees

表 2 果树可能排放的有毒有害大气污染物名录¹⁾

Table 2 List of HAPs be emitted by fruit trees

保留时间/min	中文名	英文名	分子式	匹配度/%	出现频次
27.052	芴	Fluorene	C ₁₃ H ₁₀	96	8
13.683	对-甲苯酚	<i>p</i> -Cresol	C ₇ H ₈ O	95	8
33.777	邻苯二甲酸二丁酯	Dibutyl phthalate	C ₁₆ H ₂₂ O ₄	97	6
3.654	甲基丙烯酸甲酯	Methyl methacrylate	C ₅ H ₈ O ₂	94	5
4.605	甲苯	Toluene	C ₇ H ₈	93	5
31.813	菲	Phenanthrene	C ₁₄ H ₁₀	96	5
16.779	萘	Naphthalene	C ₁₀ H ₈	95	4
19.852	1-甲基萘	1-methyl Naphthalene	C ₁₁ H ₁₀	96	4

1) 匹配度指样品中该物质的质谱信息与 NIST11. L 标准谱库的匹配程度; 表中数据为释放该种物质果树的平均值

2.3 BVOCs 释放速率及差异

表 3 为果树不同组分 BVOCs 的标准化 [PAR = 1 000 μmol·(m²·s)⁻¹, T_{leaf} = 30℃] 释放速率。12 种果树均释放异戊二烯和单萜, 部分果树释放倍半萜烯, 总 BVOCs (异戊二烯、单萜和倍半萜烯之和) 释放速率在 (1.6 ± 0.1) ~ (14 ± 0.8) μg·(g·h)⁻¹ 之间。依照 Benjamin^[21] 提出的分类标准, 12 种果树 BVOCs 排放水平可分为 3 组: ①低 BVOCs 排放能力 [< 1 μg·(g·h)⁻¹] 的果树 0 种; ②中等 BVOCs 排放能力 [1 ~ 10 μg·(g·h)⁻¹] 的果树 9 种; ③高 BVOCs 排放能力 [> 10 μg·(g·h)⁻¹] 的果树 3 种。中等排放水平和高排放水平的果树分别占 75% 和 25%。多重比较结果显示, 果树不同 BVOCs 组分的释放速率存在差异, 主要集中在异戊二烯和单萜两

方面。李子 [(9.3 ± 0.2) μg·(g·h)⁻¹]、杏子 [(7.9 ± 1.2) μg·(g·h)⁻¹] 和桃 [(12.0 ± 0.8) μg·(g·h)⁻¹] 异戊二烯释放速率高, 其中, 桃异戊二烯释放速率显著高于除李子外的其他 10 种果树 (P < 0.05), 柿子 [(0.2 ± 0.1) μg·(g·h)⁻¹] 异戊二烯释放速率仅为桃的 1.7%。同样, 基于“G93 算法”计算, 12 种果树单萜烯释放速率范围为 (0.1 ± 0.1) ~ (5.9 ± 2.1) μg·(g·h)⁻¹, 杏子最高, 樱桃和桃较低, 前后两者平均值差异达 11 倍。然而, 相比于小分子量的单萜和异戊二烯, 倍半萜烯释放速率很小, 在有排放能力的果树中没有表现出显著差异。图 3 为果树单萜释放种类和不同物质的组成情况, 由结果可知, 每种果树释放标准系列中的 2 ~ 4 种物质, 但各组分的贡献率存在差异。在有该物质

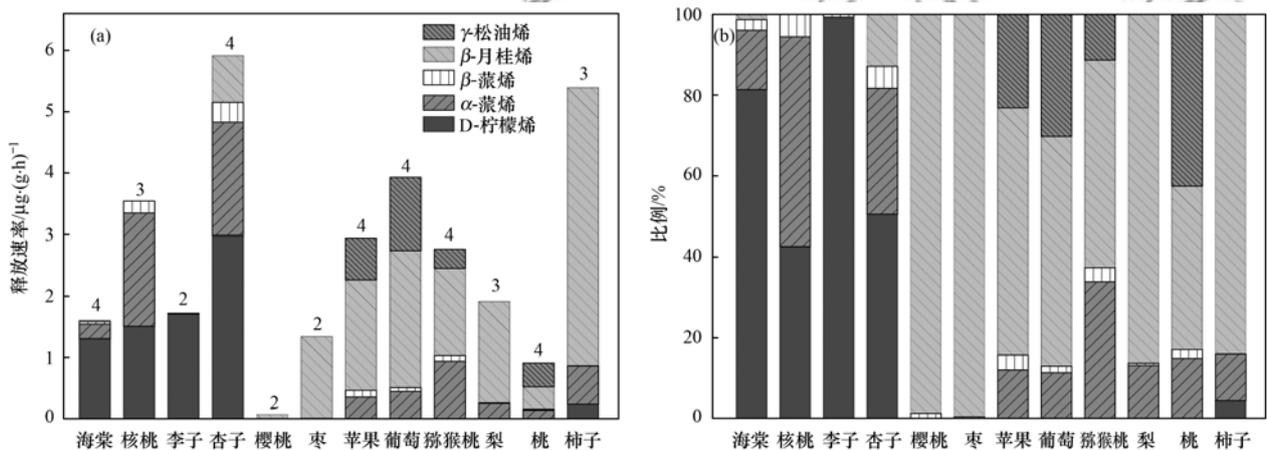
释放的果树中, 5 种单萜平均贡献率从大到小依次为: β -月桂烯(59.3%) > D-柠檬烯(49.2%) > γ -松油烯(26.8%) > α -蒎烯(22.4%) > β -蒎烯(2.3%)。

表 3 BVOCs 释放速率及统计分析¹⁾

Table 3 Statistical analysis of emission rates of BVOCs

排放水平	树种	拉丁名	所属科	不同 BVOCs 的释放速率/ $\mu\text{g}\cdot(\text{g}\cdot\text{h})^{-1}$			
				异戊二烯	单萜	倍半萜烯	合计
M	海棠	<i>Malus prunifolia</i>	藤黄科	6.1 ± 1.8^{bc}	1.6 ± 0.7^{abc}	0.1 ± 0.1^a	7.8 ± 1.2^{bc}
M	核桃	<i>Juglans regia</i>	胡桃科	3.5 ± 1.2^{cd}	3.5 ± 0.8^{abc}	0.1 ± 0.1^a	7.1 ± 0.4^{bcd}
M	枣	<i>Prunus salicina</i>	鼠李科	1.2 ± 0.1^d	1.3 ± 0.1^{bc}	—	2.6 ± 0.1^e
M	葡萄	<i>Vitis vinifera</i>	葡萄科	0.8 ± 0.1^d	3.9 ± 0.6^{abc}	0.1 ± 0.1^a	4.8 ± 0.6^{de}
M	猕猴桃	<i>Actinidia Chinensis</i>	猕猴桃科	0.4 ± 0.1^d	2.8 ± 0.4^{abc}	—	3.2 ± 0.4^{de}
M	柿子	<i>Diospyros kaki</i>	柿科	0.2 ± 0.1^d	5.4 ± 1.7^{abc}	0.1 ± 0.1^a	5.6 ± 1.7^{de}
M	梨	<i>Pyrus spp.</i>	蔷薇科	0.3 ± 0.1^d	1.9 ± 0.3^{abc}	—	2.3 ± 0.2^e
M	樱桃	<i>Cerasus pseudocerasus</i>	蔷薇科	1.5 ± 0.1^d	0.1 ± 0.1^e	—	1.6 ± 0.1^e
M	苹果	<i>Malus domestica</i>	蔷薇科	0.3 ± 0.1^d	2.9 ± 0.3^{abc}	0.2 ± 0.1^a	3.4 ± 0.3^{de}
H	桃	<i>Amygdalus persica</i>	蔷薇科	12.0 ± 0.8^a	0.9 ± 0.2^{bc}	—	13 ± 0.8^a
H	李子	<i>Prunus salicina</i>	蔷薇科	9.3 ± 0.2^{ab}	1.7 ± 0.1^{abc}	—	11 ± 0.3^{ab}
H	杏子	<i>Armeniaca vulgaris</i>	蔷薇科	7.9 ± 1.2^b	5.9 ± 2.1^a	0.1 ± 0.1^a	14 ± 0.8^a
显著性(P 值)				<0.01	<0.01	<0.01	<0.01

1) 表中所有数据为经标准化[$\text{PAR} = 1\,000 \mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$, $T_{\text{leaf}} = 30^\circ\text{C}$]处理的释放速率; 排放水平: M 代表中等排放水平, H 代表高排放水平; 数值后不同字母表示物种间差异极显著($P < 0.01$); “—”表示未检出[$< 0.01 \mu\text{g}\cdot(\text{g}\cdot\text{h})^{-1}$]



(a) 中柱上数字代表单萜组成的种类

图 3 果树不同单萜释放速率及组成比例

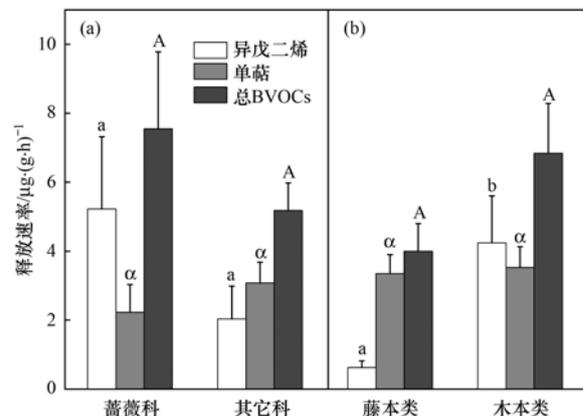
Fig. 3 Emission rates and composition of monoterpinene from different fruit trees

2.4 果树 BVOCs 的排放特征

结合异戊二烯、单萜和倍半萜烯的统计结果, 总 BVOCs 释放速率高的 3 种果树均为蔷薇科果树, 其中杏子和桃释放速率显著高于其余 10 种果树($P < 0.05$, 表 3), 但通过对 6 种蔷薇科果树和 6 种其他科果树 BVOCs 释放速率统计分析发现, 异戊二烯($P = 0.21$)、单萜($P = 0.43$)和总 BVOCs($P = 0.36$)在蔷薇科与其他科果树之间均无显著性差异[图 4(a)]. 同时, 对 6 种蔷薇科果树异戊二烯、单萜和总 BVOCs 释放速率进行科内统计(表 3), 发现除杏子和樱桃存在差异外, 其余 4 种果树单萜释放速率没有显著差异. 而异戊二烯和总 BVOCs 释放速率在科内差异较大, 李子、杏子和桃显著高于樱桃、苹果和梨($P < 0.01$).

然而, 对比不同生活型果树 BVOCs 的研究发

现[图 4(b)], 木本类果树总 BVOCs 释放速率



大写字母、小写字母和希腊字母分别代表总 BVOCs、单萜和异戊二烯, 不同字母表示组间(科或生活型)差异显著($P < 0.05$)

图 4 不同科及生活型果树 BVOCs 释放速率

Fig. 4 BVOCs emission rate from different plant families and forms

[$(6.8 \pm 1.4) \mu\text{g} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$] 高于藤本类果树 [$(4.0 \pm 0.8) \mu\text{g} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$], 尽管两者在统计学中并没有显著差异 ($P = 0.42$). 与此同时, 木本类果树 [$(4.2 \pm 1.4) \mu\text{g} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$] 异戊二烯释放能力显著高于藤本类 [$(0.6 \pm 0.2) \mu\text{g} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$, $P = 0.03$], 单萜的释放在两者之间无显著差异.

3 讨论

3.1 常见落叶果树 BVOCs 的组成

植物不同营养器官释放的 BVOCs 达 1 700 多种^[22,23], 由 BVOCs 带来的植物碳损失约占植物固碳量的 2% ~ 5%^[24]. 本研究发现, 北京地区常见 12 种果树都具有异戊二烯和单萜释放能力, 其中 6 种果树有倍半萜烯释放能力. Sardans 等^[25]对 75 种热带雨林中的木本植物 BVOCs 研究表明, 73 种植物释放 BVOCs, Tsui 等^[26]对香港常见植物调查发现, 13 种植物中 8 种具有异戊二烯或单萜释放能力, Tambunan 等^[27]报道指出, 42 种日本冲绳地区本土植物都不同程度地释放异戊二烯. 结合前人的报道, 除少数物种外, 植物可能普遍具有 BVOCs 释放能力. 不同植物 BVOCs 释放物中月季花 (*Rosa chinensis*) 释放醛、醇、酮和炔等 7 类物质^[28]; 华山松 (*Pinus armandii*)、沙地柏 (*Sabina vulgaris*) 释放醚、酚和芳香族化合物等 10 类物质 96 种化合物^[29]; 油松 (*Pinus tabulaeformis*)、白皮松 (*Pinus bungeana*)、雪松 (*Cedrus deodara*)、云杉 (*Picea asperata*) 和侧柏 (*Platycladus orientalis*) 释放包含有醇、酮、醛和酯等 8 类物质的 70 种化合物; 国槐 (*Robinia pseudoacacia*) 和法桐 (*Platanus acerifolia*) 等 5 种阔叶树共释放 8 类物质 51 种化合物^[30]. 从物质类别上与其他植物类对比表明, 果树与其他植物 BVOCs 释放种类没有根本性的差别. 但需要注意的是, 依照 NIST11. L 谱库自动匹配结果 (匹配度 > 90%) 判断, 果树可能释放具有芳香味的茆、菲、萘等多环芳烃类有毒有害大气污染物, 相对含量占果树释放物的 8.2% ~ 24.4%, 此部分在其他关于植物 BVOCs 的研究中少有报道.

另外值得一提的是, 对单萜组成分析表明, α -蒎烯 (22.4%) 和 β -蒎烯 (2.3%) 在果树单萜释放物中贡献率较小, 相反, 具有花香味或酯香味的 β -月桂烯 (59.3%)、D-柠檬烯 (49.2%) 和 γ -松油烯 (26.8%) 这 3 种单萜贡献率较大, 这一现象和对 991 种开花植物花香的研究结果一致^[31]. 而前人对油松 (*Pinus tabulaeformis*)^[32]、红松 (*Pinus koraiensis*)^[33]、华山松 (*Pinus armandii*) 和沙地柏 (*Sabina vulgaris*)^[29] 等松柏科植物研究发现, α -蒎

烯、 β -蒎烯和桉烯等具有松香味的单萜是其主要组成部分, 分布在印度中部的小叶九里香 (*Murraya koenigii*) α -蒎烯排放甚至占总单萜的 41.4%^[34]. 这种差别可能由果树、花卉等植物自身基因因素决定, 在未来的研究中需重点关注.

3.2 果树 BVOCs 排放特征

异戊二烯和单萜是 BVOCs 的重要组分, Guenther 通过模型测算显示, 两者释放量占 BVOCs 总释放量的 50% ~ 70%^[35]. 本研究表明, 果树异戊二烯和单萜释放速率存在显著的种间差异性 ($P < 0.01$), 这一现象与森林乔木、经济林、灌木和草本等研究结果相似^[36-38]. 国外研究发现梨、桃^[38]和苹果^[39], BVOCs 释放速率接近 0. 王志辉^[40]测定了 23 种北京地区常见植物 BVOCs 释放情况, 发现桃 BVOCs 释放速率为 $(6.8 \pm 0.1) \mu\text{g} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$, 梨为 $(1.8 \pm 0.6) \mu\text{g} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$, 苹果为 $(279 \pm 180) \mu\text{g} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$, 桃和梨分别低于本研究 47% 和 22%, 而苹果排放速率高出本研究 81 倍, 但考虑到该研究结果中苹果异常高的标准偏差, 实际的释放速率可能存在很大的不确定性. 同种植物排放速率的差异可能源于叶片生长阶段、采样时间及树龄的不同^[41], 也可能由植物健康状况、采样方法的差异引起^[34]. 本研究首次报道了包括柿子、杏子和葡萄在内的 9 种果树 BVOCs 释放情况, 其中, 柿子树冠高、叶生物量大, 统计资料显示柿子年产量达 396.9 万 t^[16], 本研究表明其单萜释放速率 [$(5.4 \pm 1.7) \mu\text{g} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$] 在所有果树中处于较高水平, 从区域 BVOCs 总量估算角度来看柿子可能是重要的贡献树种. 相反, 红枣总 BVOCs 释放速率 [$(2.6 \pm 0.1) \mu\text{g} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$] 较低, 但作为北方主要的果树品种, 年产量高达 824.1 万 t^[16], 其对 BVOCs 总量的贡献同样应该得到重视.

Guenther 等^[39]对苔藓类、禾草类和藤本类等 7 种演替阶段的植物研究发现, 次生林和原始森林中的松柏科植物是重要的单萜排放源; Harley 等^[42]发现杨柳科、壳斗科植物异戊二烯释放能力高于其他植物; 白建辉等^[9]运用 PAR 守恒原理模拟得出亚热带竹林是重要的异戊二烯排放源. 本实验将蔷薇科与其他科果树 BVOCs 释放情况进行统计分析, 结果发现在科属水平上果树 BVOCs 排放水平没有明显的差异性, 就果树而言, 不同科果树 BVOCs 排放水平仍没有明显的规律, 在 BVOCs 总量估算等研究中暂不能以树种之间的科属关系对 BVOCs 排放水平进行分级. 但是, 对不同生长型果树 BVOCs 分类统计表明, 木本类果树异戊二烯释放速率却显著高于藤本类 ($P = 0.03$), 这一结果对未来果树

BVOCs 排放研究和城市周边林地规划具有一定的启示意义。

4 结论

(1) 本研究系统报道了常见落叶果树 BVOCs 释放情况。果树总共释放醇、烃和酯等 9 类化合物, 其中烃类物质含量居首, 占总释放物的 39%, 醚类物质释放最少仅占 1%。

(2) 12 种落叶果树均释放异戊二烯和单萜, 其中 6 种果树释放倍半萜烯, 杏子等 3 种果树为高 BVOCs 排放果树, 海棠等 9 种果树为中等 BVOCs 排放果树。桃树 [$(12.0 \pm 0.8) \mu\text{g} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$] 异戊二烯释放速率大, 杏子 [$(5.9 \pm 2.1) \mu\text{g} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$] 和柿子 [$(5.4 \pm 1.6) \mu\text{g} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$] 单萜释放速率大, 不同果树倍半萜烯释放能力普遍很小。

(3) 果树以释放具有花香或脂香味的 β -月桂烯、D-柠檬烯与 γ -松油烯等单萜类物质为主, 这与松柏科植物存在明显差异, 可能由果树自身基因决定。

(4) 果树 BVOCs 的排放在科间和科内都存在显著差异, 暂不能依据果树科属关系对 BVOCs 排放水平进行分级, 然而对不同生长型果树研究发现, 木本类果树异戊二烯释放速率显著高于藤本类果树。

(5) 常见落叶果树可能释放萹、菲和蔡等 8 种有毒有害大气污染物, 对区域大气质量存在潜在影响。

参考文献:

- [1] 李庆军, 王永峰. 陆地生态系统植物挥发性有机化合物的排放及其生态学功能研究进展[J]. 植物生态学报, 2005, **29**(3): 487-496.
Li Q J, Wang Y F. BVOCs emitted from plants of terrestrial ecosystems and their ecological functions[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2005, **29**(3): 487-496.
- [2] Amey M, Allmann S, Verwaeren J, *et al.* Green leaf volatile production by plants: a meta-analysis[J]. New Phytologist, 2018, **220**(3): 666-683.
- [3] Guenther A, Nicholas Hewitt C, Erickson D, *et al.* A global model of natural volatile organic compound emissions[J]. Journal of Geophysical Research, 1995, **100**(D5): 8873-8892.
- [4] Pacifico F, Harrison S P, Jones C D, *et al.* Isoprene emissions and climate[J]. Atmospheric Environment, 2009, **43**(39): 6121-6135.
- [5] Zare A, Christensen J H, Gross A, *et al.* Quantifying the contributions of natural emissions to ozone and total fine PM concentrations in the Northern Hemisphere[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2014, **13**(6): 16775-16830.
- [6] Dentener F, Stevenson D, Ellingsen K, *et al.* The global atmospheric environment for the next generation [J]. Environmental Science & Technology, 2006, **40**(11): 3586-3594.
- [7] 万五星, 夏亚军, 张红星, 等. 北京远郊区臭氧污染及其对敏感植物叶片的伤害[J]. 生态学报, 2013, **33**(4): 1098-1105.
- Wan W X, Xia Y J, Zhang H X, *et al.* The ambient ozone pollution and foliar injury of the sensitive woody plants in Beijing exurban region[J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, **33**(4): 1098-1105.
- [8] 杨丹菁, 白郁华, 李金龙, 等. 珠江三角洲地区天然源碳氢化合物的研究[J]. 中国环境科学, 2001, **21**(5): 422-426.
Yang D J, Bai Y H, Li J L, *et al.* Study on hydrocarbon compounds from natural source in the Pearl River Delta area[J]. China Environmental Science, 2001, **21**(5): 422-426.
- [9] 白建辉, Tiffany D, 余树全, 等. 亚热带竹林挥发性有机物排放的模拟[J]. 生态环境学报, 2015, **24**(12): 1923-1937.
Bai J H, Tiffany D, Yu S Q, *et al.* Simulation of BVOC emissions in a subtropical bamboo forest in China[J]. Ecology & Environmental Sciences, 2015, **24**(12): 1923-1937.
- [10] Geron C, Owen S, Guenther A, *et al.* Volatile organic compounds from vegetation in southern Yunnan Province, China: emission rates and some potential regional implications [J]. Atmospheric Environment, 2006, **40**(10): 1759-1773.
- [11] 白建辉, Baker B. 草地异戊二烯排放通量影响因子的研究[J]. 大气科学, 2004, **28**(5): 783-794.
Bai J H, Baker B. A study of the affecting factors of isoprene emission at grassland[J]. Journal of Atmospheric Sciences, 2004, **28**(5): 783-794.
- [12] Bai J H, Baker B, Liang B S, *et al.* Isoprene and monoterpene emissions from an Inner Mongolia grassland [J]. Atmospheric Environment, 2006, **40**(30): 5753-5758.
- [13] Calafpietra C, Fares S, Loreto F. Volatile organic compounds from Italian vegetation and their interaction with ozone [J]. Environmental Pollution, 2009, **157**(5): 1478-1486.
- [14] 牛竹梅. 中国果树资源利用现状与发展潜力分析[J]. 中国果菜, 2008, **12**(5): 5-7.
- [15] 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, 2002, **107**(D21): ACH 16-1-ACH 16-21.
- [16] 国家统计局. 中国统计年鉴 2017 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2017. 184-206.
National Bureau of Statistics. China statistical yearbook 2017 [M]. Beijing: China Statistics Press, 2017. 184-206.
- [17] 中华人民共和国农业部. 中国农业统计资料 2016 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2017. 104-116.
The Ministry of Agriculture of the People's Republic of China. China agriculture statistical report 2016 [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2017. 104-116.
- [18] 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.
- [19] 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, 1993, **98**(7): 12609-12617.
- [20] US EPA. US Clean air act section 112 (b) [M]. Washington DC: US EPA, 1990.
- [21] Benjamin M T, Sudol M, Bloch L, *et al.* Low-emitting urban forests: a taxonomic methodology for assigning isoprene and monoterpene emission rate [J]. Atmospheric Environment, 1996, **30**(9): 1437-1452.

- [22] 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.
- [23] 冯兆忠, 袁相洋. 臭氧浓度升高对植物源挥发性有机化合物 (BVOCs) 影响的研究进展 [J]. *环境科学*, 2018, **39**(11): 5257-5265.
Feng Z Z, Yuan X Y. Effect of evaluated ozone on biogenic organic compounds (BVOCs) emission-a review [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(11): 5257-5265.
- [24] Loreto F, Schnitzler J P. Abiotic stresses and induced BVOCs [J]. *Trends in Plant Science*, 2010, **15**(3): 154-166.
- [25] Sardans J, Llusia J, Owen S M, *et al.* Screening study of leaf terpene concentration of 75 borneo rainforest plant species: relationships with leaf elemental concentrations and morphology [J]. *Records of Natural Products*, 2015, **9**(1): 19-40.
- [26] Tsui J K Y, Guenther A, Yip W K, *et al.* A biogenic volatile organic compound emission inventory for Hong Kong [J]. *Atmospheric Environment*, 2009, **43**(40): 6442-6448.
- [27] Tambunan P, Baba S, Kuniyoshi A, *et al.* Isoprene emission from tropical trees in Okinawa island, Japan [J]. *Chemosphere*, 2006, **65**(11): 2138-2144.
- [28] 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.
- [29] 来雨晴. 华山松和沙地柏挥发物季节变化规律研究 [D]. 北京: 北京林业大学, 2016.
Lai Y Q. Seasonal variations of volatile organic compounds from *Pinus amandii* and *Juniperus sabina* [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2016.
- [30] 谢小洋. 西安市主要绿化树种 VOCs 组成及释放规律研究 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2016.
Xie X Y. Research on composition and release regularities of VOCs from main landscape plants in Xi'an [D]. Yangling: Northwest A & F University, 2016.
- [31] Knudsen J T, Eriksson R, Gershenzon J, *et al.* Diversity and distribution of floral scent [J]. *Botanical Review*, 2006, **72**(1): 1-120.
- [32] 李德文, 史奕, 何兴元. O₃ 浓度升高对银杏及油松 BVOCs 排放的影响 [J]. *环境科学*, 2008, **29**(2): 300-304.
Li D W, Shi Y, He X Y. Effects of elevated O₃ on the volatile organic compounds emit from *Ginkgo biloba* and *Pinus tabulaeformis* [J]. *Environmental Science*, 2008, **29**(2): 300-304.
- [33] 白建辉, 林凤友, 万晓伟, 等. 长白山温带森林挥发性有机物的排放通量 [J]. *环境科学学报*, 2012, **32**(3): 545-554.
Bai J H, Lin F Y, Wan X W, *et al.* Volatile organic compound emission fluxes from a temperate forest in Changbai Mountain [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2012, **32**(3): 545-554.
- [34] Malik T G, Gajbhiye T, Pandey S K. Plant specific emission pattern of biogenic volatile organic compounds (BVOCs) from common plant species of central India [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2018, **190**: 631-642.
- [35] Greenberg J P, Asensio D, Turnipseed A, *et al.* Contribution of leaf and needle litter to whole ecosystem BVOC fluxes [J]. *Atmospheric Environment*, 2012, **59**(9): 302-311.
- [36] 黄爱葵, 李楠, Guenther A, 等. 深圳市显著排放 VOCs 的园林植物调查与分析 [J]. *环境科学*, 2011, **32**(12): 3555-3559.
Huang A K, Li N, Guenther A, *et al.* Investigation on emission properties of biogenic VOCs of landscape plants in Shenzhen [J]. *Environmental Science*, 2011, **32**(12): 3555-3559.
- [37] 王效科, 牟玉静, 欧阳志云, 等. 太湖流域主要植物异戊二烯排放研究 [J]. *植物学通报*, 2002, **19**(2): 224-230, 223.
Wang X K, Mu Y J, Ouyang Z Y, *et al.* Study on emission of isoprene from major plants living in Taihu Basin [J]. *Chinese Bulletin of Botany*, 2002, **19**(2): 224-230, 223.
- [38] Benjamin M T, Winer A M. Estimating the ozone-forming potential of urban trees and shrubs [J]. *Atmospheric Environment*, 1998, **32**(1): 53-68.
- [39] Guenther A, Zimmerman P, Wildermuth M. Natural volatile organic compound emission rate estimates for U. S. woodland landscapes [J]. *Atmospheric Environment*, 1994, **28**(6): 1197-1210.
- [40] 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.
- [41] Bracho-Nunez A, Welter S, Staudt M, *et al.* Plant-specific volatile organic compound emission rates from young and mature leaves of Mediterranean vegetation [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2011, **116**(D16): 304-317.
- [42] Harley P C, Monson R K, Lerdau M T. Ecological and evolutionary aspects of isoprene emission from plants [J]. *Oecologia*, **118**(2): 109-123.

CONTENTS

Pollution Characteristics and Regional Transport of Atmospheric Particulate Matter in Beijing from October to November, 2016	ZHANG Han-yu, CHENG Shui-yuan, YAO Sen, <i>et al.</i> (1999)
Chemical Compositions, Mass Concentrations, and Emission Factors of Particulate Organic Matters Emitted from Catering	WANG Hong-li, JING Sheng-ao, QIAO Li-ping (2010)
Size Distributions of Aerosol During the Summer at the Summit of Mountain Taishan (1534 m) in Central East China	SHEN Li-juan, WANG Hong-lei, YIN Yan, <i>et al.</i> (2019)
Concentration Characteristics and Source Analysis of PM _{2.5} During Wintertime in Zhengzhou-Xinxiang	YAN Guang-xuan, ZHANG Pu-zhen, HUANG Hai-yan, <i>et al.</i> (2027)
Scenario Analysis of PM _{2.5} Concentration Targets and Milestones in China	HE Jin-yu, YAN Li, WANG Yan-chao, <i>et al.</i> (2036)
PM _{2.5} Emission Characteristics and Estimation of Emission Reduction Potential from Typical Industrial Sources in Anyang	DU Xiao-shen, YAN Li, HE Jin-yu, <i>et al.</i> (2043)
Emission Characteristics and List of Inorganic Elements in Fine Particles of Typical Industrial Kilns in Zhengzhou City	ZHAO Qing-yan, HAN Shi-jie, ZHANG Yi-shun, <i>et al.</i> (2052)
Composition and Atmospheric Reactivity of Ambient Volatile Organic Compounds(VOCs) in the Urban Area of Nanjing, China	QIAO Yue-zhen, CHEN Feng, ZHAO Qiu-yue, <i>et al.</i> (2062)
Formation Potential of Ozone and Secondary Organic Aerosol of VOCs from Fossil Fuel Combustion in Lanzhou City	LIU Zhen, ZHU Yu-fan, GUO Wen-kai, <i>et al.</i> (2069)
Inventory and Characteristics of Biogenic Volatile Organic Compounds (BVOCs) for 12 Deciduous Fruit Trees	LI Shuang-jiang, YUAN Xiang-yang, LI Qi, <i>et al.</i> (2078)
Ion Concentrations and Their Spatial Variability in Underground Water and Surface Water in Typical Terrestrial Ecosystems in China	HUANG Li, ZHANG Xin-yu, YUAN Guo-fu, <i>et al.</i> (2086)
Status of Antibiotic Contamination and Ecological Risks Assessment of Several Typical Chinese Surface-Water Environments	LIU Xi, WANG Zhi, WANG Xue-lei, <i>et al.</i> (2094)
Distribution and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Water Bodies in Seven Basins of China	FAN Bo, WANG Xiao-nan, HUANG Yun, <i>et al.</i> (2101)
Occurrence, Input, and Seasonal Variations of Poly-and Perfluoroalkyl Substances (PFASs) in Rivers and Drain Outlets from the Dalian Coastal Area, China	CHEN Hong, HAN Jian-bo, ZHANG Can, <i>et al.</i> (2115)
Space-time Characteristics and Environmental Significance of Stable Isotopes in Precipitation at an Arid Inland River Basin	YUAN Rui-feng, LI Zong-xing, CAI Yu-qin, <i>et al.</i> (2122)
Regional Evolution and Control Factors of Karst Groundwater in Liulin Spring Catchment	HUNAG Qi-bo, QIN Xiao-qun, LIU Peng-yu, <i>et al.</i> (2132)
Major Ionic Characteristics and Controlling Factors of Karst Groundwater at Xiangshui, Chongzuo	ZHOU Jin-mei, JIANG Zhong-cheng, XU Guang-li, <i>et al.</i> (2143)
Analysis of Transport and Transformation Characteristics Between Dissolved Phosphorus and Particulate Phosphorus in Water of the Three Gorges Reservoir	QIN Yan-wen, HAN Chao-nan, ZHENG Bing-hui, <i>et al.</i> (2152)
Vertical Distribution Profiles and Release Potential of Mainstream Column Sediments in the Three Gorges Reservoir After Impoundment to 175 m	LI Rui, PAN Chan-juan, TANG Xian-qiang, <i>et al.</i> (2160)
Distribution Characteristics and Influencing Factors of Phosphorus in the Dongting Lake at Different Water Periods	LI Ying-jie, WANG Li-jing, LI Hong, <i>et al.</i> (2170)
Effects of Exogenous Carbon Addition on Equilibrium Phosphate Concentration and Risk of Phosphorus Release from Sediments in the Shiwuli River, Chaohu Lake Basin	LI Ru-zhong, BAO Qin, DAI Yuan (2178)
Spatial Distribution of Organic Phosphorus in Sediment and Its Environmental Implication in the Upper Stream of Minjiang River	XU Jian, YUAN Xu-yin, YE Hong-meng, <i>et al.</i> (2186)
Nitrogen and Phosphorus Removal by Integrated Ecological Engineering Treatment System in a Small Agricultural Watershed	JIANG Qian-wen, LIU Feng, PENG Ying-xiang, <i>et al.</i> (2194)
Spatial Distribution and Pollution Assessment of Heavy Metals in River Sediments from Lake Taihu Basin	ZHANG Jie, GUO Xi-ya, ZENG Ye, <i>et al.</i> (2202)
Temporal and Spatial Variation of Mercury in the Water of the Ruxi River Estuary, a Typical Tributary of the Three Gorges Reservoir Area	MA Wei-bin, CHEN Qiu-yu, YIN De-liang, <i>et al.</i> (2211)
Mercury Distribution Characteristics and Its Mass Balance in a Multifunctional Urban Wetland	LIU Wei-hao, WANG Yong-min, FAN Yu-fei, <i>et al.</i> (2219)
Distribution Characteristics of Mercury in Different Urban Constructed Wetlands	FAN Yu-fei, LIU Wei-hao, SUN Tao, <i>et al.</i> (2226)
Effects of Microplastics on Antibiotic Resistance Genes in Estuarine Sediments	HUANG Fu-yi, YANG Kai, ZHANG Zi-xing, <i>et al.</i> (2234)
Comparison and Source Apportionment of PAHs Pollution of Runoff from Roads in Suburb and Urban Areas of Shanghai	WU Jie, XIONG Li-jun, WU Jian, <i>et al.</i> (2240)
Characteristics of Phytoplankton Community and Its Relationship with Environmental Factors in Different Regions of Yilong Lake, Yunnan Province, China	WANG Zhen-fang, ZHANG Wei, YANG Li, <i>et al.</i> (2249)
Algal Bloom and Mechanism of Hypoxia in the Metalimnion of the Lijiahe Reservoir During Thermal Stratification	LIU Xue-qing, HUANG Ting-lin, LI Nan, <i>et al.</i> (2258)
Allelopathic Effects and Allelochemicals of <i>Myriophyllum elatinoideis</i> on <i>Microcystis aeruginosa</i> and <i>Selenastrum capricornutum</i>	BI Ye-liang, WU Shi-min, ZHOU Si-ning, <i>et al.</i> (2265)
Removal Efficiency of Trichloroacetamide by UV/Sodium Sulfite	FU Zhi-xuan, GUO Ying-qing, GUO Wen-hai (2271)
Influencing Factors and Transformation Mechanism of Venlafaxine Degradation by UV	LÜ Juan, XU Zhi-wei, WANG Yan (2278)
Mechanism of Synergistic Adsorption of Arsenic and Cadmium by Aluminium-substituted Ferrihydrites	HUANG Bo, GUO Zhao-hui, XIAO Xi-yuan, <i>et al.</i> (2287)
Fluoride Removal Efficiency of Novel Material: Magnetite Core/Zirconia Shell Nanocomposite	FANG Wen-kan, LI Xiao-di, FANG Jing, <i>et al.</i> (2295)
Impact Mechanisms of Carboxyl Group Modified Cathode on Acetate Production in Microbial Electrosynthesis Systems	QI Jia-xin, ZENG Cui-ping, LUO Hai-ping, <i>et al.</i> (2302)
Partial Nitrification and Denitrification of Low C/N Ratio Sewage Based on Zoning Oxygen and Dissolved Oxygen Control	WU Chun-lei, RONG Yi, LIU Xiao-peng, <i>et al.</i> (2310)
Start-up Performance of Low-substrate Anaerobic Ammonium Oxidation Under Different COD Concentrations	MA Yan-hong, ZHAO Zhi-chao, AN Fang-jiang, <i>et al.</i> (2317)
Partial Nitrification Fast Start-up and Stable Performance of 15°C SBBR	SUN Yi-qi, BIAN Wei, LI Jun, <i>et al.</i> (2326)
Effects of Long-term Poly-P Deficiency on the Metabolic Properties of <i>Accumulibacter</i> in AO-SBR System	WANG Shao-po, LI Zhu, ZHAO Le-dan, <i>et al.</i> (2333)
Extracellular Polymeric Substances of ANAMMOX Granular Sludge and Its Effects on Sludge Surface Characteristics	YANG Ming-ming, LIU Zi-han, ZHOU Yang, <i>et al.</i> (2341)
Treatment of Piggery Biogas Slurry by Enhanced Biological Contact Oxidation with HN-AD Bacteria	LIU Xiang-yang, ZHANG Qian, WU Heng, <i>et al.</i> (2349)
Effect of Different Temperatures on the Performance of Autotrophic Nitrogen Removal and Microbial Community from Swine Wastewater	HUANG Fang-yu, DENG Liang-wei, YANG Hong-nan, <i>et al.</i> (2357)
Characteristics and Regional Heterogeneity of Eukaryotic Microbial Community in Wastewater Treatment Plants	QIN Wen-tao, ZHANG Bing, SUN Chen-xiang, <i>et al.</i> (2368)
Effects of Wetland Reclamation on Soil Microbial Community Structure in the Sanjiang Plain	WANG Na, GAO Jie, WEI Jing, <i>et al.</i> (2375)
Distribution Pattern and Diversity Maintenance Mechanisms of Fungal Community in Subalpine Lakes	LIU Jin-xian, LI Cui, LUO Zheng-ming, <i>et al.</i> (2382)
Influence of Biochar Amendment on Soil Denitrifying Microorganisms in Double Rice Cropping System	LIU Jie-yun, QIU Hu-sen, WANG Cong, <i>et al.</i> (2394)
Effects of Plastic Film Mulching and Nitrogen Fertilizer Application on CH ₄ Emissions from a Vegetable Field	NI Xue, JIANG Chang-sheng, CHEN Shi-jie, <i>et al.</i> (2404)
Effects of Water Deficit on Greenhouse Gas Emission in Wheat Field in Different Periods	WANG Xiao-yun, CAI Huan-jie, LI Liang, <i>et al.</i> (2413)
Effects of Different Fertilization Modes on Greenhouse Gas Emission Characteristics of Paddy Fields in Hot Areas	TIAN Wei, WU Yan-zheng, TANG Shui-rong, <i>et al.</i> (2426)
Effects of Cyclical Temperature Fluctuations on Organic Carbon Mineralization in Purple Soil	ZENG Man-man, CI En, FAN Jing-jing, <i>et al.</i> (2435)
Cd Content Characteristics and Ecological Risk Assessment of Paddy Soil in High Cadmium Anomaly Area of Guangxi	SONG Bo, WANG Fo-peng, ZHOU Lang, <i>et al.</i> (2443)
Remediation Potential of <i>Ageratum conyzoides</i> L. on Cadmium Contaminated Farmland	ZHANG Yun-xia, SONG Bo, BIN Juan, <i>et al.</i> (2453)
Evaluation of the Potential Agricultural Risks of Polycyclic Aromatic Hydrocarbon Contaminated Soil by Planting <i>Lactuca sativa</i> L.	JIAO Hai-hua, GUO Jia-jia, ZHANG Jing-min, <i>et al.</i> (2460)
Impacts of Land Use and Landscape Patterns on Heavy Metal Accumulation in Soil	SHU Xin, LI Yan, LI Feng, <i>et al.</i> (2471)
Pollution Characteristics and Evaluation of Heavy Metal Pollution in Surface Soil Around a Municipal Solid Waste Incineration Power Plant	LÜ Zhan-lu, ZHANG Jin-liang, LU Shao-you, <i>et al.</i> (2483)