

百方知库
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.12
第40卷 第12期

目次(卷终)

研究报告

京津冀秋冬季 PM_{2.5} 污染概况和预报结果评估 朱媛媛, 高愈霄, 刘冰, 王晓彦, 朱莉莉, 许荣, 汪巍, 丁俊男, 李健军, 段小丽 (5191)

2016 ~ 2017 年采暖期华北平原东部 PM_{2.5} 组分特征及来源解析 张逸琴, 王杰, 高健, 徐仲均, 车飞, 马彤, 杨艳, 刘素, 闫璐璐 (5202)

霾不同发展阶段下污染气体和水溶性离子变化特征分析 王振彬, 刘安康, 卢文, 杨晓旻, 王红磊, 陈魁, 夏丽 (5213)

上海郊区家庭妇女 PM_{2.5} 重金属组分暴露水平、来源与健康风险 罗燃燃, 戴海夏, 张蕴晖, 乔利平, 马英歌, 周敏, 夏斌, 朱清扬, 赵迎亚, 黄成 (5224)

固定污染源可凝结颗粒物测量方法 蒋靖坤, 邓建国, 王刚, 张莹, 李妍菁, 段雷, 郝吉明 (5234)

家具企业挥发性有机物排放特征及其环境影响 张嘉妮, 曾春玲, 刘锐源, 姚懿娟, 柯云婷, 范丽雅, 叶代启 (5240)

抗生素企业 VOCs 排放清单及影响范围模拟 竹涛, 吕怡蓉, 边文璟, 牛文凤, 袁前程, 段二红, 于洋, 林军 (5250)

新乡市机动车排放对道路灰尘中重金属与多环芳烃污染的影响 李琦路, 吴锦涛, 张颖, 孙玉静, 乔泓钦, 张子伟, 裴梦园, 张孟琼, 任明浩 (5258)

成都市道路积尘中全氟化合物的污染特征及暴露风险评估 方淑红, 朱和祥, 叶芝祥, 印红玲, 孙静 (5265)

祁连山北坡中段降水稳定同位素特征及水汽来源分析 张百娟, 李宗省, 王昱, 李永格, 吕越敏, 袁瑞丰, 桂娟 (5272)

长江南京段水源水中抗生素的赋存特征与风险评估 封梦娟, 张芹, 宋宁慧, 卜元卿, 杨正标, 刘艳华, 郭瑞昕, 陈建秋, 张圣虎 (5286)

夏秋季混凝剂对复合锰氧化膜去除地表水中氨氮和锰的影响 程丽杰, 黄廷林, 程亚, 张莎莎, 阮昭意, 卢磊 (5294)

浙江省 H 市供水系统消毒副产物及其健康风险评价 刘俊萍, 于建全, 李青松, 马晓雁, 杨玉龙, 贾佳 (5302)

三峡库区城镇化背景下河流 DOM 的吸收及荧光光谱特征 陈昭宇, 李思悦 (5309)

川西高原河流水体 CDOM 的光化学降解特性 刘堰杨, 孙辉, 刘琛, 王小沁 (5318)

三峡库区典型紫色土小流域径流及氮磷流失特征 曹瑞霞, 刘京, 邓开开, 先宇, 王伟, 方芳, 欧阳文娟, 郭劲松 (5330)

九龙江流域河流磷输出对土地利用模式及水文状况的响应 黄亚玲, 唐莉, 黄金良, 肖才荣 (5340)

不同尺度土地利用方式对鄱阳湖湿地水质的影响 方娜, 刘玲玲, 游清徽, 田娜, 吴燕平, 阳文静 (5348)

太湖草藻型湖区磷赋存特征及其环境意义 耿雪, 文帅龙, 孙培荣, 徐楚天, 李大鹏, 黄勇 (5358)

太湖竺山湾沉积物碳氮磷分布特征与污染评价 方家琪, 祁闯, 张新厚, 韩睿明, 黄和笑, 王卓森, 王国祥 (5367)

降雨强度对洱海流域凤羽河氮磷排放的影响 李晓虹, 雷秋良, 周脚根, 张亦涛, 李影, 胡万里, 武淑霞, 翟丽梅, 王洪媛, 刘宏斌 (5375)

外源 Ca²⁺ 和 K⁺ 作用下河口区碱蓬水质净化效果和耐盐碱提高机制 吴丹, 孙萍, 陈广琳, 陈友媛, 彭昌盛 (5384)

泽泻 (*Alisma orientale*) 对全氟化合物的吸收和传输特征-浓度的影响 王团团, 李贝贝, 王赛, 华佩, 陈军, 应光国 (5394)

复合人工湿地中反硝化除磷作用的发生及其稳定性 刘冰, 郑煜铭, 李清飞, 赵承美, 魏巍, 张凯 (5401)

铅、镉和铜改性沸石添加控制底泥磷释放的对比 刘婷, 赵钰颖, 林建伟, 詹艳慧, 秦琴 (5411)

生物炭结构性质对氨氮的吸附特性影响 陈梅, 王芳, 张德俐, 易维明 (5421)

溶解氧对悬浮与附着生长系统短程硝化反应的影响机制 王嗣禹, 刘灵婕, 王芬, 季民 (5430)

间歇恒定/梯度曝气对 SNAD 工艺启动的影响 李冬, 刘志成, 徐贵达, 李帅, 张杰 (5438)

共基质模式下铁盐脱氮反应器的运行性能及微生物学特征 王茹, 刘梦瑜, 刘冰茵, 赵治国, 袁林江 (5446)

阶梯曝气对城市污水好氧颗粒污泥系统的影响 李冬, 魏子清, 劳会妹, 李帅, 张杰 (5456)

酵母菌降解胞外聚合物提升剩余活性污泥的脱水性能 俞心怡, 向金豪, 刘英, 龚天翼, 张彬辉, 吕文洲 (5465)

基于 GEE 的 1998 ~ 2018 年京津冀土地利用变化对生态系统服务价值的影响 娄佩卿, 付波霖, 林星辰, 闭璐, 马瑞雪, 唐廷元 (5473)

基于 MDS 与 TOPSIS 模型的滨海滩涂围垦区土壤质量评价 解雪峰, 濮励杰, 朱明, 吴涛, 许艳 (5484)

淹水增加对闽江河口淡水潮汐湿地孔隙水地球化学特征及 CO₂ 和 CH₄ 排放通量的影响 李敬, 黄佳芳, 罗敏, 刘育秀, 谭季, 朱爱菊, 王声钰, 仝川 (5493)

养殖塘 CH₄ 排放特征及其影响因素 王娇, 肖薇, 张秀芳, 张弥, 张文庆, 刘强, 陈争, 董保华, 李旭辉 (5503)

施肥对高粱地土壤呼吸及其温度敏感性的影响 严俊霞, 张媛, 焦晓燕 (5515)

高硒高镉区土地安全区划方法 王锐, 侯宛苓, 李雨潼, 余涛, 陈娟 (5524)

不同配比复合材料对农田镉污染土壤的修复效果 陈树兰, 许晨阳, 耿增超, 王强, 祝乐, 龚园, 拓卫卫 (5531)

水铝钙石对不同镉污染农田重金属的钝化效果及机制 吴秋梅, 刘刚, 王慧峰, 胡文友, 黄标 (5540)

狮子山矿区不同土地利用类型对土壤微生物群落多样性的影响 黄健, 朱旭炎, 陆金, 孙雨, 赵兴青 (5550)

林地转型耕地对东北丘陵区白浆土 *cbbL* 细菌群落丰度和结构的影响 王蕊, 吴宪, 李刚, 修伟明, 王丽丽, 张贵龙 (5561)

粤港澳大湾区场地污染特征、治理修复与环境管理研究专辑

粤港澳大湾区污染场地土壤风险管控制度体系建设与思考 常春英, 董敏刚, 邓一荣, 肖荣波, 刘丽丽 (5570)

粤港澳大湾区土壤污染问题计量及可视化分析 张宁, 张盛, 杨海超, 张建通 (5581)

城市生活垃圾填埋场的物质存量特征及其环境影响:以粤港澳大湾区为例 马仕君, 周传斌, 杨光, 赵志岚, 刘懿颀 (5593)

粤港澳大湾区丘陵区地带某电镀场地重金属污染特征与迁移规律分析 侯文隽, 龚星, 詹泽波, 刘锋, 黄子航, 杨立宏, 林晓琛 (5604)

粤港澳大湾区典型化工场地苯系物污染特征及迁移规律 邓一荣, 陆海建, 董敏刚, 程洲, 庄长伟, 肖荣波, 钟音, 彭平安 (5615)

针铁矿-富里酸复合材料对铅镉污染土壤的钝化修复性能 刘千钧, 李想, 周阳媚, 唐杰鹏, 林亲铁, 姚琨 (5623)

广东大宝山矿区土壤植物体系重金属迁移过程及风险评价 陈洁宜, 刘广波, 崔金立, 肖唐付 (5629)

Hydrus-1D 模型在推导基于保护地下水的土壤风险控制值中的应用 林挺, 罗飞, 朱艳, 杨坤, 郝秀平 (5640)

《环境科学》第 40 卷(2019 年) 总目录 (5649)

《环境科学》征订启事(5233) 《环境科学》征稿简则(5285) 信息(5357, 5420, 5429)

泽泻 (*Alisma orientale*) 对全氟化合物的吸收和传输特征-浓度的影响

王团团^{1,2,3}, 李贝贝², 王赛⁴, 华佩², 陈军², 应光国^{2*}

(1. 中国科学院广州地球化学研究所, 有机地球化学国家重点实验室, 广州 510640; 2. 华南师范大学环境理论化学教育部重点实验室, 环境研究院, 广州 510631; 3. 中国科学院大学, 北京 100049; 4. 暨南大学生态学系, 水生生物研究中心, 广州 510632)

摘要: 为探究泽泻 (*Alisma orientale*) 对不同浓度全氟化合物 (PFASs) 的吸收、积累和传输特征, 进行了为期 3 周的水培实验, 全氟辛酸和全氟辛烷磺酸的暴露浓度分别为 0、5、10、50、100、200、500 和 1 000 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$. 结果表明: 随着 PFASs 浓度的增加, 根系电导率、根茎中 Cu 含量、茎叶中 Ca 含量均降低, 但泽泻生长状况良好; 植物对 PFASs 的去除量不断增加 (0.87 ~ 116.50 μg), 去除率却不断降低 (20.1% ~ 2.9%). 根、茎和叶中 PFASs 的浓度随着 PFASs 浓度的增加呈线性增加, 且符合 Langmuir 吸附等温式和 Michaelis-menten 方程, 表明泽泻通过被动扩散的方式吸收 PFASs. 计算 PFOA 和 PFOS 的根、茎和蒸腾流富集系数 (RCF、SCF、TSCF), 并用限制分配模型对 RCF 和 SCF 值进行拟合, 发现 RCF、SCF、TSCF 和限制分配模型准平衡分配系数 α_{pt} 均随着 PFASs 浓度的增加而降低, 这是由于随着 PFASs 浓度的增加, 达到平衡所需要的水分量增加, 达到平衡的时间也变长.

关键词: 全氟化合物 (PFASs); 湿地植物; 泽泻; 限制分配模型; 被动扩散

中图分类号: X171.5 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)12-5394-07 DOI: 10.13227/j.hjxx.201906060

Concentration-dependent Accumulation and Translocation of PFASs by Wetland Plant *Alisma orientale*

WANG Tuan-tuan^{1,2,3}, LI Bei-bei², WANG Sai⁴, HUA Pei², CHEN Jun², YING Guang-guo^{2*}

(1. State Key Laboratory of Organic Geochemistry, Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China; 2. Environmental Research Institute, Ministry of Education Key Laboratory of Environmental Theoretical Chemistry, South China Normal University, Guangzhou 510631, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 4. Research Center of Hydrobiology, Department of Ecology, Jinan University, Guangzhou 510632, China)

Abstract: This study investigated the concentration-dependent accumulation and translocation of perfluoroalkyl substances (PFASs) by wetland plant *Alisma orientale*. The concentrations of PFASs in nutrient solution were 0, 5, 10, 50, 100, 200, 500, and 1000 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$. The electrolytic leakage of roots, Cu concentration in roots and stems, and Ca concentration in stems and leaves decreased with an increase in PFASs concentration in external solution, while the plants were growing well. The removal mass of PFASs by plants increased (0.87-116.50 μg) with an increase in PFASs concentration, while the removal efficiency decreased (20.1%-2.9%). The PFASs concentration in plant roots, stems, and leaves increased linearly with that in nutrient solution, and fitted the Langmuir adsorption isotherm and Michaelis-Menten equation well, which indicated PFASs were uptaken through passive diffusion. The root concentration factor, stem concentration factor, transpiration stream concentration factor, and partition limited quasi-equilibrium factor α_{pt} decreased with that of PFASs in nutrient solution, probably due to the increase in the volume of transpiration water and the longer time to reach equilibrium.

Key words: perfluoroalkyl substances (PFASs); wetland plants; *Alisma orientale*; partition-limited model; passive diffusion

全氟化合物 (perfluoroalkyl substance, PFASs) 是一类人工合成的有机物, 广泛应用于工业和商业活动中, 例如: 含氟聚合物、纺织涂层、水成膜泡沫灭火剂、表面活性剂和食品包装材料等^[1]. 由于 PFASs 的广泛使用及排放, 导致其在地表水^[2] 和水生生物体中被广泛检出^[3]. 全氟辛酸 (perfluorooctanoic acid, PFOA) 和全氟辛烷磺酸 (perfluorooctane sulfonic acid, PFOS) 是 PFASs 类化合物中最具代表性的两种物质^[4], 由于他们在环境中的高检出率^[5], 环境持久性^[6], 高生物积累性及

潜在危害性^[7], 引起了人们的广泛关注. 为降低其环境危害和健康风险, 急需一种有效地去除废水中 PFASs 的修复技术.

植物修复是一种成本低廉、有效和环境友好的技术, 已广泛应用于去除各种各样的持久性微量有机污染物^[8, 9]. 植物去除水体中污染物的途径主要

收稿日期: 2019-06-08; 修订日期: 2019-06-25

基金项目: 国家自然科学基金-广东联合基金项目 (U1701242); 全国大学生创新创业大赛项目 (82619300)

作者简介: 王团团 (1989 ~), 女, 博士研究生, 主要研究方向为植物修复及生态与环境, E-mail: tuantuan.wang@foxmail.com

* 通信作者, E-mail: guangguo.ying@m.scnu.edu.cn

包括:非生物去除(如挥发、光解和化学降解)、生物降解、根系直接去除和根系分泌物促进的生物降解^[9]。由于 PFASs 具有持久性,难于生物降解、光解和化学降解的特性,植物根系直接去除(包括植物根系吸收和传输)对水环境中 PFASs 的去除贡献最大^[10,11]。相比于陆生植物,湿地植物因其独特的生理特征(例如:根组织中通气组织发达,根系泌氧等)在污水修复中具有更广泛的应用前景^[12]。大量研究表明,较高的污染物浓度会影响植物的正常生长,因此考察不同污染物浓度下植物去除污染物的效果和耐受污染物的能力至关重要。此外,本课题组前期探究了 8 种常见的湿地植物(美人蕉、再力花、风车草、芦苇、芦竹、梭鱼草、纸莎草、泽泻)对 PFASs 的富集特性(未发表),发现泽泻对 PFASs 的富集效果最好。因此本研究以泽泻(*Alisma orientale*)为例,利用水培实验,探究不同 PFASs 浓度下,泽泻吸收、传输和积累 PFASs 的特性及其耐受性变化。

1 材料与方法

1.1 植物暴露实验

本实验用湿地植物泽泻购自佛山某花圃场,挑选高度均为 10 cm 左右的泽泻幼苗带回实验室培养。买回的泽泻幼苗先用自来水冲洗干净根系表面的泥土,然后放到 1/2 强度的 Hoagland 营养液的水培箱内进行培养,将水培箱放在温室内培养并用曝气泵向水培箱内不断充氧。培养 2~3 周待植物长出完整的新根后,将植物幼苗转移到分别含 0、5、10、50、100、200、500 和 1 000 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 PFASs (含相同浓度的 PFOA 和 PFOS) 目标物的营养液中进行

暴露实验,每个浓度设置 3 个平行。实验体系在 1 L 的 PP 塑料烧杯中进行,暴露液体积为 1 L,将 4 株植物放在用海绵固定的 4 个定植篮内,然后将定植篮放到带孔的塑料板中,塑料板盖在塑料烧杯上,并确保只有植物根部能接触到暴露液。每周更换一次培养液,培养 3 周后收获植物。记录实验过程中的水分蒸发量,并用去离子水加以补充。

1.2 样品采集

将收获的植物样用去离子水冲洗干净,用滤纸吸干表面水分,分成根、茎和叶三部分并称量其鲜重,然后用冷冻干燥机(Biocool FD-2A,北京)冻干并称量,冻干的植物用液氮研磨均匀,过 60 目筛。植物中 PFOA 和 PFOS 的提取参考 Ullah 等^[13]的方法。步骤如下:称取 0.1 g 植物样放入 50 mL 的聚丙烯(PP)离心管中,加入 5 ng 内标。加入 0.4 $\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ NaOH 溶液 5 mL,涡旋 1 min;然后加入 0.25 $\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 $\text{Na}_2\text{CO}_3/\text{NaHCO}_3$ (pH = 10) 缓冲液 4 mL 和 0.5 $\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的四丁基硫酸氢铵溶液 2 mL,涡旋 1 min,室温下超声 5 min。加入 5 mL 叔丁基甲醚,涡旋 1 min,室温下超声 15 min,再于 10 000 $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$ 下离心 10 min,并转移上清液至 15 mL PP 离心管中。重复该提取过程 2 次,合并 3 次提取的上清液并氮吹至近干,并用 0.5 mL 甲醇复溶,过 0.22 μm 尼龙有机相滤膜至 1 mL PP 进样小瓶中,于 -18°C 冰箱保存待测。

1.3 样品分析

采用安捷伦 1200 液相系统串联 6460 三重四极杆质谱仪测定样品中 PFOA 和 PFOS,仪器参数参考课题组之前的研究^[4]。方法的回收率,检出限和定量限见表 1。

表 1 PFOA 和 PFOS 在植物根、茎和叶中的回收率、检测限和定量限

目标物	部位	回收率(以干重计)/%		检测限(以干重计) / $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$	定量限(以干重计) / $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$
		50 $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$	100 $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$		
PFOA	根	117.39 \pm 2.07	107.79 \pm 2.02	0.11	0.39
	茎	109.86 \pm 7.88	94.46 \pm 2.40	0.15	0.51
	叶	114.96 \pm 3.63	96.15 \pm 3.28	0.09	0.30
PFOS	根	111.57 \pm 6.45	113.43 \pm 3.07	0.10	0.33
	茎	106.94 \pm 6.09	87.46 \pm 4.60	0.10	0.32
	叶	106.61 \pm 2.42	95.16 \pm 4.48	0.11	0.36

植物根和茎中的脂质含量参考 Zhu 等^[14]的方法测定。植物根系电导率参考 Wang 等^[15]的方法测定,步骤如下:取新鲜根样(距根尖 1.5~2 cm 往上的部分),用去离子水冲洗干净表面污染物,切成 1 cm 长小段,放入含 10 mL 去离子水的离心管中,放入真空箱室温下静置 3 h,用电导率仪(Thermo fisher Scientific,美国)测定溶液中电导率并记录为 EC1,

然后将离心管放入 100°C 水浴锅内加热 15 min,冷却至室温后再次测定溶液中电导率并记录为 EC2,植物根系电导率为 $\text{EL} = (\text{EC1}/\text{EC2}) \times 100\%$,并以百分比表示。参考 Grčman 等^[16]的方法测定叶片中叶绿素含量。植物根、茎和叶中 K、Ca、Mg、Fe、Mn、Zn 和 Cu 的含量测定参考 Gröman 等^[16]的方法,步骤如下:准确称取 0.1 g 植物根、茎和叶干样,

用 65% 的 HNO_3 进行微波消解,同步进行空白样的消解,消解液定容至 10 mL,用原子吸收光谱仪(AA-6800 model, Shimadzu)测定 Fe、Mn、Zn 和 Cu 含量(以干重计),检测限分别为 0.3、0.1、0.5、0.5 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$;用离子色谱仪(Aquion, Thermo scientific)测定 K、Ca 和 Mg 含量(以干重计),检测限分别为 0.1、0.1、0.1 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$.

1.4 RCF、TSCF 和 SCF 的计算方法

根系富集系数(root concentration factor, RCF)用来描述植物根系对污染物的积累能力,蒸腾流富集系数(transpiration stream concentration factor, TSCF)用来评估污染物从外部溶液转移至蒸腾流的能力,茎富集系数(stem concentration factor, SCF)用来表示污染物在植物茎内的积累能力^[17],具体公式如下:

$$\text{RCF} = C_{\text{root}}/C_w \quad (1)$$

$$\text{TSCF} = C_{\text{aerial}}/(V_t C_w) \quad (2)$$

$$\text{SCF} = C_{\text{stem}}/C_w \quad (3)$$

$$C_{\text{aerial}} = (C_{\text{leaf}}M_{\text{leaf}} + C_{\text{stem}}M_{\text{stem}})/(M_{\text{leaf}} + M_{\text{stem}}) \quad (4)$$

式中, C_{root} 、 C_{stem} 和 C_{leaf} 表示污染物在植物根、茎和叶中的含量($\mu\text{g}\cdot\text{d}^{-1}$, 以鲜重计), C_w 表示根系外部溶液中污染物浓度($\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$), C_{aerial} 表示地上部分污染物含量($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$, 以鲜重计), V_t 表示整个实验过程中的蒸发水量总量(mL), M_{stem} 和 M_{leaf} 表示植物茎和叶的重量(g, 以鲜重计).

2 结果和讨论

2.1 PFASs 对植物生长的影响

在整个实验周期内,不同浓度组的泽泻生长状况均良好,根系发达,叶片正常,表明 PFOA 和 PFOS 联合暴露(PFOA 和 PFOS 的浓度均 $\leq 1 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)对泽泻生长无影响,这与之前 Wen 等对玉米幼苗的研究结果一致^[18]. 不同 PFASs 暴露组植物根、茎和叶中 K、Mg、Fe、Mn 和 Zn 含量、根中 Ca 含量和叶中 Cu 含量均没有显著差异. 植物根系电导率、根和茎中 Cu 含量、茎和叶中 Ca 含量随溶液中 PFASs 浓度的变化如图 1 所示. 泽泻根系电导率却随着 PFASs 浓度的升高而降低,与 Qu 等^[19]对小麦的研究结果相反,表明在本实验浓度下根细胞膜的通透性并未受到影响,根系电导率的降低可能是由于根系外排的离子与吸附在根系自由空间内的 PFASs 相结合^[20],导致根系电解质溶液中离子浓度降低. 与空白组相比,添加有 PFASs 的实验组根和茎中 Cu 浓度显著降低,茎和叶中 Ca 含量随着 PFASs 浓度的增加而不断降低,这可能是由于 Cu^{2+} 和 Ca^{2+} 与 PFASs 中的羧酸、磺酸等活性基团通过键桥作用结

合形成了复合物^[21],导致 Cu 的根系吸收和 Ca 的传输受影响. 虽然根系电导率、根和茎中 Cu 含量、茎和叶中 Ca 含量均有降低,但植物生长状况良好,这可能是因为降低的程度较小,未对植物正常生长产生影响.

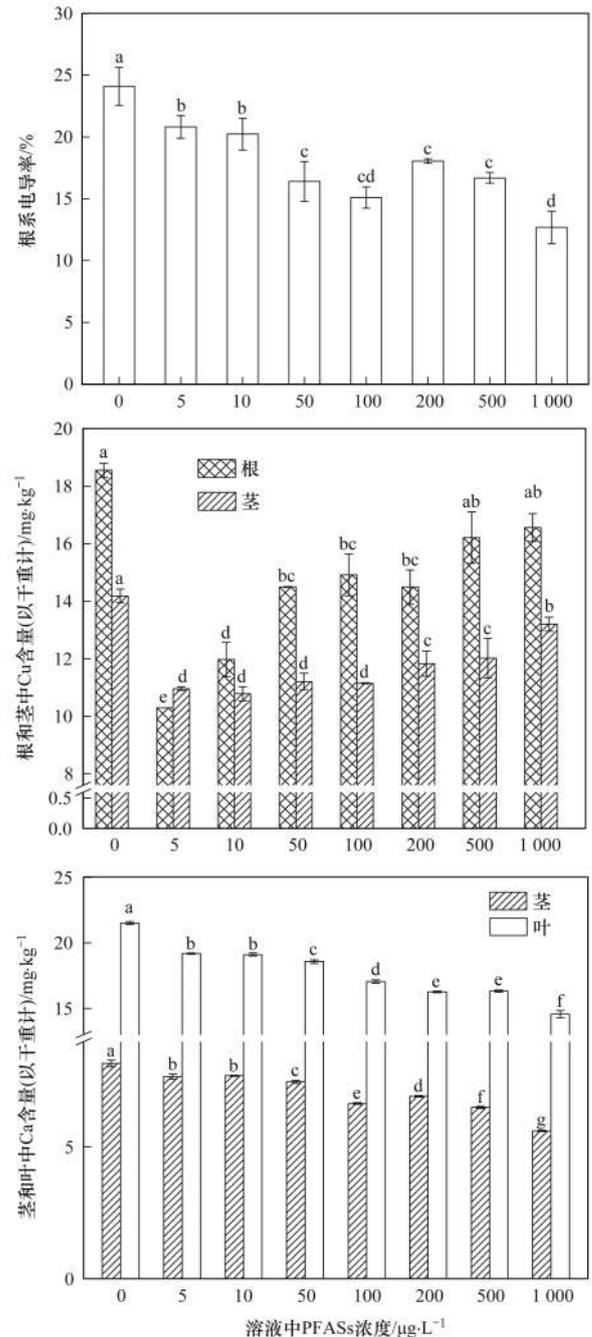


图 1 不同 PFASs 浓度下泽泻的根系电导率、根茎中 Cu 含量和茎叶中 Ca 含量

Fig. 1 Electrolytic leakage of root, Cu concentration in roots and stems, and Ca concentration in stems and leaves of *Alisma orientale* treated with different PFASs levels

2.2 植物对 PFASs 的去除量

不同 PFASs 浓度下泽泻对 PFOA 和 PFOS 的去除量和去除率见表 2. 泽泻对 PFOA 的去除量为

0.87 ~ 61.47 μg , 占总添加量的 2.9% ~ 12.3%; 对 PFOS 的去除量为 0.88 ~ 116.50 μg , 占总添加量的 5.0% ~ 20.1%。随着 PFASs 暴露浓度的增加, PFOA 和 PFOS 的去除总量也不断增加, 但 PFOA 和 PFOS 的去除率却不断降低, 表明植物去除 PFASs 的效果与污染物浓度有关, 在一定浓度范围内(5 ~ 10 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$), 去除效果较好。不同 PFASs 浓度下

PFOA 和 PFOS 在泽泻根、茎、叶各部位的质量分配如图 2 所示。对于 PFOA, 植物地上部分积累占主导; 而对 PFOS, 根系积累占主导, 这与 Felizeter 等^[17]对生菜的研究结果一致, 这种差异是由 PFASs 的碳氟链长度和官能团类型决定^[22]。本研究结果也说明, 收割植物地上部分能有效地去除 PFOA, 清除植物根部能有效地去除 PFOS。

表 2 不同 PFASs 浓度下泽泻对 PFOA 和 PFOS 的去除量和去除率¹⁾

Table 2 Removal mass and removal percentage of PFOA and PFOS by *Alisma orientale* treated with different PFASs levels

项目	CK	5 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	10 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	50 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	100 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	200 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	500 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	1 000 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$
PFOA 总去除量/ μg	0.49(0.02)	0.87(0.02)	1.57(0.03)	5.82(0.08)	9.81(0.56)	19.19(0.34)	49.56(2.87)	61.47(2.43)
PFOA 去除率/%	/	12.3(0.34)	11.1(0.19)	4.1(0.05)	3.8(0.22)	3.8(0.07)	3.9(0.23)	2.9(0.11)
PFOS 总去除量/ μg	0.03(0.00)	0.88(0.01)	1.97(0.01)	8.42(0.50)	15.39(0.93)	31.65(0.39)	75.75(3.68)	116.50(2.31)
PFOS 去除率/%	/	20.1(0.23)	23.8(0.16)	7.5(0.45)	8.1(0.49)	7.9(0.10)	6.9(0.34)	5.0(0.10)

1) 括号中的数字代表标准差

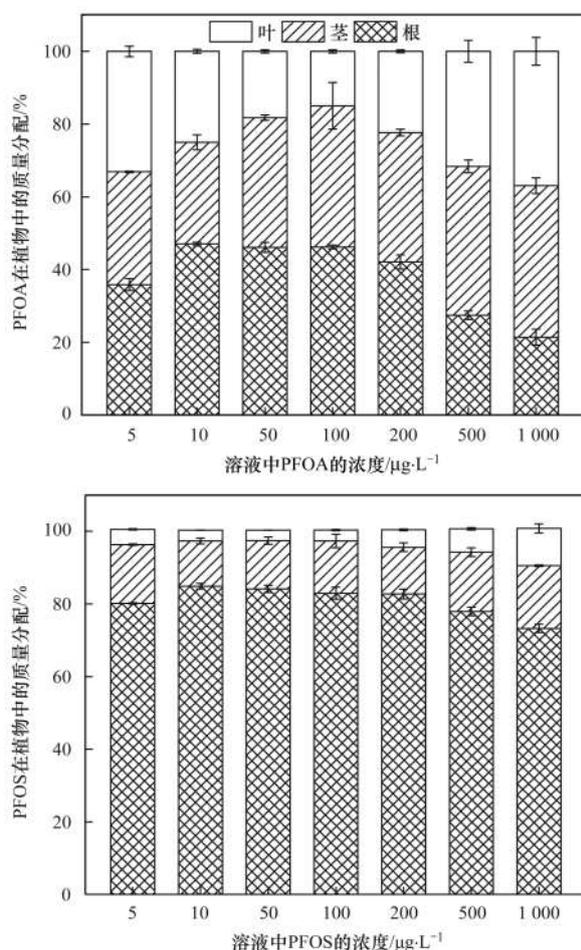


图 2 不同 PFASs 浓度下 PFOA 和 PFOS 在泽泻中的质量分配

Fig. 2 Mass distribution of PFOA and PFOS in different parts of *Alisma orientale* treated with different PFAS levels

2.3 泽泻对 PFASs 的吸收和传输

不同 PFASs 浓度下泽泻根、茎和叶中 PFASs 含量如图 3 所示。PFOA 和 PFOS 在植物根、茎和叶中浓度呈现根 > 茎 > 叶的趋势, 表明根系吸收是 PFASs 最主要的运输途径。泽泻根、茎和叶中

PFASs 的浓度随着外部溶液中污染物浓度的增加呈线性增加, 这与 Blaine 等^[22]在生菜和草莓果实中发现的线性浓度效应一致, 表明泽泻主要通过被动扩散的方式吸收 PFOA 和 PFOS。为了更好地对数据进行分析, 分别用 Langmuir 吸附等温式和米氏方程 (Michaelis-menten equation) 对根系中 PFOA 和 PFOS 浓度进行拟合。Langmuir 吸附等温式和米氏方程的公式如下:

$$V = K_L V_{\max} C / (1 + K_L C) \quad (5)$$

$$V = V_{\max} C / (K_m + C) \quad (6)$$

式中, V 表示吸收速率 [$\text{mg}\cdot(\text{kg}\cdot\text{d})^{-1}$, 以干重计], C 表示外部溶液中 PFOA 和 PFOS 的浓度 ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)。 K_L 值表示 Langmuir 吸附等温常数 ($\text{L}\cdot\text{mg}^{-1}$), 与吸附强度成正比; Langmuir 吸附等温式中 V_{\max} 表示均相吸附剂表层吸附层的最大吸附速率 [$\text{mg}\cdot(\text{kg}\cdot\text{d})^{-1}$, 以干重计]^[23]。在米氏方程中, K_m 为米氏常数 ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$), 为 1/2 最大吸收速率时的基质浓度; 通常认为 K_m 值越低, 底物与载体的亲和性越强^[24]; V_{\max} 表示所有可利用吸附位点均被利用时的最大吸附速率 [$\text{mg}\cdot(\text{kg}\cdot\text{d})^{-1}$, 以干重计], V_{\max} 越高, 可与底物结合的载体数量越多^[25]。

根系中 PFOA 和 PFOS 浓度的 Langmuir 吸附等温式和米氏方程拟合结果如表 3 所示。结果显示, 两个方程均能较好地拟合其变化规律, PFOA 和 PFOS 的 K_L 值和 K_m 值接近, 表明根中 PFASs 的积累是 PFASs 与根系固体物质相结合的结果, 且 PFOS 与 PFOA 的结合强度相同。PFOS 的 V_{\max} 值远大于 PFOA, 表明 PFOS 的结合速率比 PFOA 大, 且与 PFOS 结合的固体物质量高于 PFOA。

2.4 泽泻对 PFASs 的吸收和传输

采用 RCF、TSCF 和 SCF 值能更好地表示

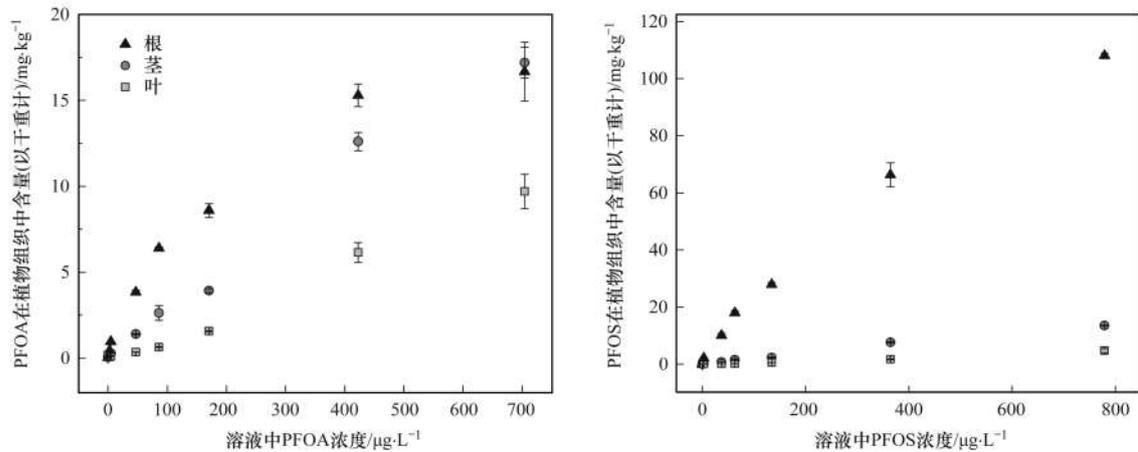


图3 不同 PFASs 浓度下泽泻根、茎和叶中 PFASs 含量

Fig. 3 PFASs concentrations in roots, stems, and leaves of *Alisma orientale* treated with different PFASs levels表3 泽泻根中 PFOA 和 PFOS 含量的 Langmuir 吸附等温式和米氏方程拟合参数¹⁾Table 3 Estimates of Langmuir adsorption isotherm parameter K_L and Michaelis-Menten equation parameters K_m of PFOS and PFOA uptaken by *Alisma orientale*

模型	物质	K_L /L·mg ⁻¹	K_m /mg·L ⁻¹	V_{max} /mg·(kg·d) ⁻¹ (以干重计)	R^2
Langmuir 吸附等温式	PFOA	15.06		0.65	0.994**
	PFOS	15.34		2.34	0.991**
米氏方程	PFOA		0.07	0.65	0.994**
	PFOS		0.07	2.34	0.991**

PFASs 在植物体内的吸收和传输特征,结果如表 4 所示.随着暴露浓度的增加,RCF、TSCF 和 SCF 不断降低,表明 PFASs 在泽泻体内的吸收和传输能力受外部溶液中污染物含量的影响较大. PFOS 的 RCF 值大于 PFOA,但其 TSCF 值和 SCF 值均小于 PFOA,与 Felizeter 等^[17]对生菜、黄瓜和番茄的研究结果一致,说明 RCF、TSCF 和 SCF 值主要与 PFOA 和 PFOS 本身的分子结构有关^[22].

Chiou 等^[26]提出了限制分配模型,用 α_{pt} 值来描述污染物在外部溶液和根系组织间的分配平衡状态,公式如下:

$$C_{pt} = \alpha_{pt} C_w [f_{pw} + f_{ch} K_{ch} + f_{lip} K_{lip}]$$

$$\approx \alpha_{pt} C_w [f_{pw} + f_{ch} K_{ch} + f_{lip} K_{ow}] \quad (7)$$

式中, C_{pt} 表示植物根或茎中污染物浓度 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 以鲜重计), C_w 表示水培液或茎木质部汁液中目标物的浓度 ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$), f_{pw} 表示植物组织中的水分比重, f_{ch} 表示植物组织中除了水分和脂质外的有机质的比重, f_{lip} 表示植物组织中脂质的比重, K_{ch} 表示碳水化合物-水分配系数, PFOA 和 PFOS 的 K_{ch} 均为 3^[26], K_{lip} 表示脂质-水分配系数,用 K_{ow} 值近似替代, PFOA 和 PFOS 的 $\lg K_{ow}$ 值分别为 4.22 和 5.02^[27]. 泽泻根和茎中水分含量比重分别为 94.47% 和 92.21%; 脂质含量比重分别为 0.14% 和 0.11%.

泽泻根和茎中 PFOA 和 PFOS 的限制分配模型

的准平衡分配系数结果如表 4 所示.当暴露浓度为 $10 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,根中 PFOA 和 PFOS 的 α_{pt} 值最大,分别为 0.46 和 0.26,茎中 PFOA 和 PFOS 的 α_{pt} 值也最大,分别为 0.29 和 0.09. Chiou 等^[26]指出,当存在主动运输机制或者被动分配机制达到平衡状态时, $\alpha_{pt} \geq 1$. 本研究中根和茎的 α_{pt} 值均 < 1 ,表明泽泻吸收 PFOA 和 PFOS 主要通过被动扩散的方式,且分配过程没有达到平衡,这主要与:①污染物由溶液向根中转移的速率,②污染物在水培液和根中达到分配平衡所需要吸收的水分体积有关^[26]. 随着暴露浓度的增加,达到平衡所需要的水分量也增加,达到平衡的时间变长,因此 RCF、SCF、 α_{pt} 值均随着 PFASs 浓度的增加而不断降低. 本研究还发现,不同浓度下 PFOA 的 α_{pt} 值均大于 PFOS,这可能是由于 PFOS 的脂质水分配系数高于 PFOA,达到相同的平衡状态需要吸收的水分量更多所致.

植物对外源污染物的吸收主要通过被动扩散,但对于与某些天然物质(如生长素和脱落酸)有相似结构的物质(如 2,4-D 和草甘膦),植物对其吸收是通过固有的转运蛋白介导的^[28, 29]. 虽然 Wen 等^[18]和 Zhang 等^[30]通过抑制剂添加实验发现, PFOA 和 PFOS 在玉米和小麦根系的吸收过程涉及到能量,通过主动运输的形式进行^[18]. 本实验通过研究泽泻对 PFASs 的吸收和传输随溶液中 PFASs

浓度的变化,并结合模型分析,认为泽泻根系主要通过根、茎中的积累由其在根系水分和根固体物质、蒸腾被动扩散的方式吸收 PFOA 和 PFOS,其在泽泻 腾流溶液和茎固体物质上的分配过程主导。

表 4 泽泻中 PFOA 和 PFOS 的 RCF、TSCF、SCF 及限制分配平衡分配系数 α_{pt} 值¹⁾

物质	分组	5 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	10 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	50 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	100 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	200 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	500 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	1 000 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$
PFOA	RCF	10.27(0.47)	11.26(0.12)	4.51(0.14)	4.11(0.05)	2.79(0.13)	2.00(0.09)	1.31(0.14)
	α_{pt}	0.42(0.02)	0.46(0.01)	0.18(0.01)	0.17(0.00)	0.11(0.01)	0.08(0.00)	0.05(0.01)
PFOA	SCF	4.23(0.03)	4.24(0.31)	2.10(0.04)	2.16(0.36)	1.63(0.04)	2.11(0.09)	1.73(0.09)
	α_{pt}	0.25(0.00)	0.29(0.00)	0.10(0.01)	0.11(0.00)	0.08(0.00)	0.07(0.00)	0.05(0.00)
PFOS	RCF	37.55(0.4)	43.45(0.61)	14.99(1.05)	15.69(0.68)	11.47(0.31)	10.06(0.64)	7.67(0.06)
	α_{pt}	0.21(0.02)	0.26(0.01)	0.49(0.08)	0.64(0.13)	0.38(0.02)	0.37(0.03)	0.39(0.13)
PFOS	SCF	3.62(0.08)	4.03(0.24)	1.43(0.05)	1.72(0.33)	1.23(0.10)	1.49(0.04)	1.23(0.01)
	α_{pt}	0.06(0.01)	0.09(0.00)	0.12(0.01)	0.13(0.02)	0.08(0.01)	0.09(0.02)	0.08(0.01)
PFOA	TSCF	1.02(0.13)	0.80(0.10)	0.22(0.03)	0.17(0.03)	0.21(0.01)	0.29(0.04)	0.23(0.07)
PFOS	TSCF	0.47(0.08)	0.37(0.01)	0.10(0.01)	0.11(0.01)	0.13(0.02)	0.14(0.02)	0.12(0.02)

1) 括号中数值表示标准差

3 结论

(1) 随着暴露浓度的增加,泽泻根系电导率、根茎中 Cu 浓度和茎叶中 Ca 含量均有降低,但降低程度较小,未对植物生长产生影响。

(2) 泽泻对 PFOA 和 PFOS 的去除率最高可达 12.3% 和 20.1%,但随着 PFASs 浓度的增加不断降低;去除的 PFOA 主要积累在泽泻地上部分,而 PFOS 主要积累在根中。

(3) 泽泻的根、茎和叶中 PFASs 的浓度随着暴露浓度的增加呈线性增加,且 Langmuir 吸附等温式和米氏方程均能较好地拟合其变化规律,表明泽泻主要通过被动扩散的方式吸收 PFOA 和 PFOS。

(4) 随着暴露浓度的增加,PFASs 在根和茎中的分配过程达到平衡所需要的蒸腾水量不断增加,达到平衡的时间也变长,导致其 RCF、SCF 和 α_{pt} 值均随着浓度的增加而不断降低。

致谢:感谢华南师范大学环境研究院陈涛老师在实验期间提供的帮助,感谢黄争、黄剑、林青云等同学在样品检测方面给予的帮助。

参考文献:

[1] Buck R C, Franklin J, Berger U, *et al.* Perfluoroalkyl and polyfluoroalkyl substances in the environment: terminology, classification, and origins [J]. *Integrated Environmental Assessment and Management*, 2011, **7**(4): 513-541.

[2] Xiao F. Emerging poly-and perfluoroalkyl substances in the aquatic environment: a review of current literature [J]. *Water Research*, 2017, **124**: 482-495.

[3] Pan C G, Zhao J L, Liu Y S, *et al.* Bioaccumulation and risk assessment of per-and polyfluoroalkyl substances in wild freshwater fish from rivers in the Pearl River Delta region, South China [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2014, **107**: 192-199.

[4] Pan C G, Ying G G, Liu Y S, *et al.* Contamination profiles of

perfluoroalkyl substances in five typical rivers of the Pearl River Delta region, South China [J]. *Chemosphere*, 2014, **114**: 16-25.

- [5] Pan C G, Liu Y S, Ying G G. Perfluoroalkyl substances (PFASs) in wastewater treatment plants and drinking water treatment plants: removal efficiency and exposure risk [J]. *Water Research*, 2016, **106**: 562-570.
- [6] Giesy J P, Kannan K. Peer reviewed: Perfluorochemical surfactants in the environment [J]. *Environmental Science & Technology*, 2002, **36**(7): 146A-152A.
- [7] Ahrens L, Bundschuh M. Fate and effects of poly-and perfluoroalkyl substances in the aquatic environment: a review [J]. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 2014, **33**(9): 1921-1929.
- [8] Reinhold D, Vishwanathan S, Park J J, *et al.* Assessment of plant-driven removal of emerging organic pollutants by duckweed [J]. *Chemosphere*, 2010, **80**(7): 687-692.
- [9] Sun T R, Cang L, Wang Q Y, *et al.* Roles of abiotic losses, microbes, plant roots, and root exudates on phytoremediation of PAHs in a barren soil [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2010, **176**(1-3): 919-925.
- [10] Ochoa-Herrera V, Field J A, Luna-Velasco A, *et al.* Microbial toxicity and biodegradability of perfluorooctane sulfonate (PFOS) and shorter chain perfluoroalkyl and polyfluoroalkyl substances (PFASs) [J]. *Environmental Science: Processes & Impacts*, 2016, **18**(4): 1236-1246.
- [11] Rahman M F, Peldszus S, Anderson W B. Behaviour and fate of perfluoroalkyl and polyfluoroalkyl substances (PFASs) in drinking water treatment: a review [J]. *Water Research*, 2014, **50**: 318-340.
- [12] Bhatia M, Goyal D. Analyzing remediation potential of wastewater through wetland plants: a review [J]. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 2014, **33**(1): 9-27.
- [13] Ullah S, Alsberg T, Vestergren R, *et al.* Determination of perfluoroalkyl carboxylic, sulfonic, and phosphonic acids in food [J]. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 2012, **404**(8): 2193-2201.
- [14] Zhu Y H, Zhang S Z, Zhu Y G, *et al.* Improved approaches for modeling the sorption of phenanthrene by a range of plant species [J]. *Environmental Science & Technology*, 2007, **41**(22): 7818-7823.

- [15] Wang S R, Wang Y, Luo C L, *et al.* Could uptake and acropetal translocation of PBDEs by corn be enhanced following Cu exposure? Evidence from a root damage experiment [J]. *Environmental Science & Technology*, 2016, **50**(2): 856-863.
- [16] Grčman H, Velikonja-Bolta Š, Vodnik D, *et al.* EDTA enhanced heavy metal phytoextraction: metal accumulation, leaching and toxicity[J]. *Plant and Soil*, 2001, **235**(1): 105-114.
- [17] Felizeter S, McLachlan M S, de Voogt P. Uptake of perfluorinated alkyl acids by hydroponically grown lettuce (*Lactuca sativa*) [J]. *Environmental Science & Technology*, 2012, **46**(21): 11735-11743.
- [18] Wen B, Li L F, Liu Y, *et al.* Mechanistic studies of perfluorooctane sulfonate, perfluorooctanoic acid uptake by maize (*Zea mays* L. cv. TY2) [J]. *Plant and Soil*, 2013, **370**(1-2): 345-354.
- [19] Qu B C, Zhao H X, Zhou J T. Toxic effects of perfluorooctane sulfonate (PFOS) on wheat (*Triticum aestivum* L.) plant [J]. *Chemosphere*, 2010, **79**(5): 555-560.
- [20] Tang J, Zhang Y L, Zha Y, *et al.* Oxalate enhances desorption of perfluorooctane sulfonate from soils and sediments[J]. *Water, Air, & Soil Pollution*, 2017, **228**(12): 462.
- [21] Zhou Y P, Wen B, Pei Z G, *et al.* Coadsorption of copper and perfluorooctane sulfonate onto multi-walled carbon nanotubes[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2012, **203**: 148-157.
- [22] Blaine A C, Rich C D, Sedlacko E M, *et al.* Perfluoroalkyl acid uptake in lettuce (*Lactuca sativa*) and strawberry (*Fragaria ananassa*) irrigated with reclaimed water [J]. *Environmental Science & Technology*, 2014, **48**(24): 14361-14368.
- [23] Zhan X H, Zhu M D, Shen Y, *et al.* Apoplastic and symplastic uptake of phenanthrene in wheat roots [J]. *Environmental Pollution*, 2018, **233**: 331-339.
- [24] Marschner H. *Marschner's mineral nutrition of higher plants* (3rd ed.) [M]. London: Academic Press, 2012.
- [25] Cruz C, Lips S H, Martins-Loução M A. Uptake of ammonium and nitrate by carob (*Ceratonia siliqua*) as affected by root temperature and inhibitors[J]. *Physiologia Plantarum*, 1993, **89**(3): 532-543.
- [26] Chiou C T, Sheng G Y, Manes M. A partition-limited model for the plant uptake of organic contaminants from soil and water[J]. *Environmental Science & Technology*, 2001, **35**(7): 1437-1444.
- [27] de Voogt P, Zurano L, Serné P, *et al.* Experimental hydrophobicity parameters of perfluorinated alkylated substances from reversed-phase high-performance liquid chromatography[J]. *Environmental Chemistry*, 2012, **9**(6): 564-570.
- [28] Denis M H, Delrot S. Carrier-mediated uptake of glyphosate in broad bean (*Vicia faba*) via a phosphate transporter [J]. *Physiologia Plantarum*, 1993, **87**(4): 569-575.
- [29] Sterling T M. Mechanisms of herbicide absorption across plant membranes and accumulation in plant cells[J]. *Weed Science*, 1994, **42**(2): 263-276.
- [30] Zhang L, Sun H W, Wang Q, *et al.* Uptake mechanisms of perfluoroalkyl acids with different carbon chain lengths (C2-C8) by wheat (*Triticum aestivum* L.) [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **654**: 19-27.

CONTENTS

Concentration Characteristics and Assessment of Model-Predicted Results of PM _{2.5} in the Beijing-Tianjin-Hebei Region in Autumn and Winter	ZHU Yuan-yuan, GAO Yu-xiao, LIU Bing, <i>et al.</i> (5191)
Chemical Composition Characteristics and Source Apportionment of PM _{2.5} During the Heating Period of 2016-2017 in the Eastern Part of the North China Plain	ZHANG Yi-qin, WANG Jie, GAO Jian, <i>et al.</i> (5202)
Change in Characteristics of Pollution Gas and Water-soluble Ions at Different Development Stages of Haze	WANG Zhen-bin, LIU An-kang, LU Wen, <i>et al.</i> (5213)
Exposure Levels, Sources, and Health Risks of Heavy Metal Components of PM _{2.5} in Housewives in Rural Shanghai	LUO Ran-ran, DAI Hai-xia, ZHANG Yun-hui, <i>et al.</i> (5224)
Measuring the Condensable Particle Matter from a Stationary Source	JIANG Jing-kun, DENG Jian-guo, WANG Gang, <i>et al.</i> (5234)
Volatile Organic Compound Emission Characteristics of Furniture Manufacturing Enterprises and the Influence on the Atmospheric Environment	ZHANG Jia-mi, ZENG Chun-ling, LIU Rui-yuan, <i>et al.</i> (5240)
VOCs Emission Inventory and Impact Range Simulation of Antibiotic Enterprises	ZHU Tao, LÜ Yi-rong, BIAN Wen-jing, <i>et al.</i> (5250)
Effects of Vehicle Emissions on Heavy Metals and Polycyclic Aromatic Hydrocarbons Pollution in Road Dust in Xinxiang	LI Qi-lu, WU Jin-tao, ZHANG Ying, <i>et al.</i> (5258)
Pollution Characteristics and Exposure Risk Assessment of Perfluoroalkyl Substances in Road Dust, Chengde	FANG Shu-hong, ZHU He-xiang, YE Zhi-xiang, <i>et al.</i> (5265)
Characteristics of Stable Isotopes and Analysis of Water Vapor Sources of Precipitation at the Northern Slope of the Qilian Mountains	ZHANG Bai-juan, LI Zong-xing, WANG Yu, <i>et al.</i> (5272)
Occurrence Characteristics and Risk Assessment of Antibiotics in Source Water of the Nanjing Reach of the Yangtze River	FENG Meng-juan, ZHANG Qin, SONG Ning-hui, <i>et al.</i> (5286)
Effects of Different Coagulants on Co-manganese Oxides Filter Media for Removing Ammonium and Manganese from Surface Water in Summer and Autumn	CHENG Li-jie, HUNAG Ting-lin, CHENG Ya, <i>et al.</i> (5294)
Disinfection By-products and the Relevant Health Risk in the Water Supply System in H City of Zhejiang Province	LIU Jun-ping, YU Jian-quan, LI Qing-song, <i>et al.</i> (5302)
Absorption and Fluorescence Spectra of Dissolved Organic Matter in Rivers of the Three Gorges Reservoir Area Under the Background of Urbanization	CHEN Zhao-yu, LI Si-yue (5309)
Characteristics of Chromophoric Dissolved Organic Matter (CDOM) in Natural Rivers of Western Sichuan Plateau	LIU Yan-yang, SUN Hui, LIU Chen, <i>et al.</i> (5318)
Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Losses and Runoff in a Typical Purple Soil Watershed in the Three Gorges Reservoir Area	CAO Rui-xia, LIU Jing, DENG Kai-kai, <i>et al.</i> (5330)
Responses of Riverine Phosphorus Exports to Land Use and Hydrological Regime in the Jiulong River Watershed	HUANG Ya-ling, TANG Li, HUANG Jin-liang, <i>et al.</i> (5340)
Effects of Land Use Types at Different Spatial Scales on Water Quality in Poyang Lake Wetland	FANG Na, LIU Ling-ling, YOU Qing-hui, <i>et al.</i> (5348)
Environmental Significance of Phosphorus Fractions of Phytoplankton-and Macrophyte-Dominated Zones in Taihu Lake	GENG Xue, WEN Shuai-long, SUN Pei-rong, <i>et al.</i> (5358)
Spatial Distribution and Pollution Evaluation of Carbon, Nitrogen, and Phosphorus in Sediments of Zhushan Bay at Taihu Lake	FANG Jia-qi, QI Chuang, ZHANG Xin-hou, <i>et al.</i> (5367)
Effect of Rainfall Intensity on the Content of Nitrogen and Phosphorus Components in Plateau Areas: A Case Study of the Fengyu River Watershed	LI Xiao-hong, LEI Qiu-liang, ZHOU Jiao-gen, <i>et al.</i> (5375)
Water Purification Effect and Saline-alkali Tolerance Improvement Mechanism of <i>Suaeda salsa</i> in the Estuary Area	WU Dan, SUN Ping, CHEN Guang-lin, <i>et al.</i> (5384)
Concentration-dependent Accumulation and Translocation of PFASs by Wetland Plant <i>Alisma orientale</i>	WANG Tuan-tuan, LI Bei-bei, WANG Sai, <i>et al.</i> (5394)
Occurrence of Denitrifying Dephosphatation in a Hybrid Constructed Wetland System and Its Stability	LIU Bing, ZHENG Yu-ming, LI Qing-fei, <i>et al.</i> (5401)
Comparison of the Control of Sedimentary Phosphorus Release Using Zirconium-, Lanthanum-, and Lanthanum/Zirconium-Modified Zeolites as Sediment Amendments	LIU Ting, ZHAO Yu-ying, LIN Jian-wei, <i>et al.</i> (5411)
Effect of Biochar Structure on Adsorption Characteristics of Ammonia Nitrogen	CHEN Mei, WANG Fang, ZHANG De-li, <i>et al.</i> (5421)
Effect of Dissolved Oxygen on Partial Nitrification of Suspended and Attached Growth Systems	WANG Si-yu, LIU Ling-jie, WANG Fen, <i>et al.</i> (5430)
Effects of Different Intermittent Aeration Strategies on the Start-up of SNAD Process	LI Dong, LIU Zhi-cheng, XU Gui-da, <i>et al.</i> (5438)
Operational Performance and Microbiological Characteristics of an Iron-Salt Denitrification Reactor in Co-substrate Mode	WANG Ru, LIU Meng-yu, LIU Bing-yin, <i>et al.</i> (5446)
Effect of Step Aeration on a Municipal Sewage Aerobic Granular Sludge System	LI Dong, WEI Zi-qing, LAO Hui-mei, <i>et al.</i> (5456)
Improvement of the Dewaterability of Excess Activated Sludge with Mixed Yeasts by Degrading Extracellular Polymeric Substances	YU Xin-yi, XIANG Jin-hao, LIU Ying, <i>et al.</i> (5465)
Influence of Land Use Change on Ecosystem Service Value Based on GEE in the Beijing-Tianjin-Hebei Region from 1998 to 2018	LOU Pei-qing, FU Bo-lin, LIN Xing-chen, <i>et al.</i> (5473)
Assessment of Soil Quality in Coastal Tidal Flat Reclamation Areas Based on MDS-TOPSIS Model	XIE Xue-feng, PU Li-jie, ZHU Ming, <i>et al.</i> (5484)
Effect of Increasing Tidewater Inundation on Porewater Geochemistries and CO ₂ and CH ₄ Effluxes in the Tidal Freshwater Marshes of the Minjiang River Estuary, Southeast China	LI Jing, HUANG Jia-fang, LUO Min, <i>et al.</i> (5493)
Methane Emission Characteristics and Its Influencing Factors over Aquaculture Ponds	WANG Jiao, XIAO Wei, ZHANG Xiu-fang, <i>et al.</i> (5503)
Effect of Fertilization on Soil Respiration and Its Temperature Sensitivity in a Sorghum Field	YAN Jun-xia, ZHANG Yuan, JIAO Xiao-yan (5515)
Land Safety Zoning Method in High-Selenium and High-Cadmium Areas	WANG Rui, HOU Wan-ling, LI Yu-tong, <i>et al.</i> (5524)
Remediation Effects of Different Composite Materials on Cadmium-Contaminated Farmland Soil	CHEN Shu-lan, XU Chen-yang, GENG Zeng-chao, <i>et al.</i> (5531)
Hydrocalumite Passivation Effect and Mechanism on Heavy Metals in Different Cd-Contaminated Farmland Soils	WU Qiu-mei, LIU Gang, WANG Hui-feng, <i>et al.</i> (5540)
Effects of Different Land Use Types on Microbial Community Diversity in the Shizishan Mining Area	HUANG Jian, ZHU Xu-yan, LU Jin, <i>et al.</i> (5550)
Effects of Conversion of Forest to Arable Land on the Abundance and Structure of the <i>cblL</i> -Harboring Bacterial Community in Albic Soil of the Hilly Region of Northeast China	WANG Rui, WU Xian, LI Gang, <i>et al.</i> (5561)
Thoughts on and Construction of a Risk Management and Control System for Contaminated Sites in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area	CHANG Chun-ying, DONG Min-gang, DENG Yi-rong, <i>et al.</i> (5570)
Visualized Quantitative Research of Soil Pollution in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area	ZHANG Ning, ZHANG Sheng, YANG Hai-chao, <i>et al.</i> (5581)
Characteristics and Environmental Impacts of Materials Stored in Municipal Solid Waste Landfills: A Case Study of the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area	MA Shi-jun, ZHOU Chuan-bin, YANG Guang, <i>et al.</i> (5593)
Heavy Metal Contamination and Migration in Correspondence of an Electroplating Site on the Hilly Lands of the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area, China	HOU Wen-juan, GONG Xing, ZHAN Ze-bo, <i>et al.</i> (5604)
Pollution Characteristics and Migration of BTEX at a Chemical Contaminated Site in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area	DENG Yi-rong, LU Hai-jian, DONG Min-gang, <i>et al.</i> (5615)
Immobilization Impact of Goethite-Fulvic Acid Composites on Pb-Cd Contaminated Soil	LIU Qian-jun, LI Xiang, ZHOU Yang-mei, <i>et al.</i> (5623)
Mobilization of Heavy Metals in a Soil-Plant System and Risk Assessment in the Dabaoshan Mine Area, Guangdong Province, China	CHEN Jie-yi, LIU Guang-bo, CUI Jin-li, <i>et al.</i> (5629)
Calculation of the Soil Risk Control Value through a Hydrus-1D Model for Groundwater Protection	LIN Ting, LUO Fei, ZHU Yan, <i>et al.</i> (5640)
INDEX HUANJING KEXUE CONTENTS 2019, Vol. 40	(5659)