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

环境科学
(HUANJING KEXUE)
ENVIRONMENTAL SCIENCE
第40卷 第5期
2019年5月15日

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(1 534 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，李霁，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碳的响应及释放风险 ………………………………………… 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，张娴(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降解水溶液中文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镉的机制 ………………………………… 黄博，郭朝晖，肖细元，彭驰，朱惠文，史磊，阳安迪(2287)
新型材料磁性氧化锆的除氟效能 ………………………………………………………… 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℃ 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，李毳，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 CH_4 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水田 CH_4 和N_2O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…………………………… 曾蔓漫，慈恩，樊晶晶，李江文，翁昊璐，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)
种植油麦菜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)

Eco-Environmental Knowledge Web

环 境 科 学
Environmental Science

第40卷 第5期 2019年5月
Vol. 40, No. 5 May, 2019

绿狐尾藻对铜绿微囊藻和羊角月牙藻的抑藻效应

毕业亮[1], 吴诗敏[2], 周思宁[2], 吴尚华[2], 宿辉[1]*, 白志辉[2], 徐圣君[2]*

(1. 河北工程大学水利水电学院, 邯郸 056038; 2. 中国科学院生态环境研究中心, 北京 100085)

摘要: 分别将不同起始浓度(10^5、10^6、10^7、10^8 和 10^9 ind.·L^{-1})的铜绿微囊藻和羊角月牙藻分组与绿狐尾藻进行共培养, 连续10 d, 每天测定各组铜绿微囊藻或羊角月牙藻的光密度值, 用以确定绿狐尾藻对两种藻类不同浓度的生长抑制情况. 结果表明, 2.5 g·(200 mL)$^{-1}$的绿狐尾藻对起始浓度为10^7 ind.·L^{-1}和10^8 ind.·L^{-1}的铜绿微囊藻具有明显的抑制作用; 而对实验所设的所有起始浓度的羊角月牙藻生长均没有显著的抑制作用. 并且, 采用溶剂浸提与气相色谱-质谱联用(GC-MS)测定的方法, 分析了绿狐尾藻粉末浸提液和绿狐尾藻生长液中可能存在的化感物质, 通过分析, 确定棕榈酸是绿狐尾藻分泌的化感物质之一, 并且发现了3种可能是绿狐尾藻分泌的新型化感物质:3-乙基-3-甲基庚烷、磷酸三乙酯和酞酸二丁酯.

关键词:绿狐尾藻; 铜绿微囊藻; 羊角月牙藻; 化感作用; 化感物质

中图分类号: X52 **文献标识码**: A **文章编号**: 0250-3301(2019)05-2265-06 **DOI**: 10.13227/j.hjkx.201810064

Allelopathic Effects and Allelochemicals of *Myriophyllum elatinoides* on *Microcystis aeruginosa* and *Selenastrum capricornutum*

BI Ye-liang[1], WU Shi-min[2], ZHOU Si-ning[2], WU Shang-hua[2], SU Hui[1]*, BAI Zhi-hui[2], XU Sheng-jun[2]*

(1. School of Water Conservancy and Hydroelectric Power, Hebei University of Engineering, Handan 056038, China; 2. Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China)

Abstract: The allelopathic effects of *Myriophyllum elatinoides* on algal growth were investigated and potential allelochemicals secreted by *Myriophyllum elatinoides* were analyzed. *Myriophyllum elatinoides* were co-cultivated with different initial concentrations (10^5, 10^6, 10^7, 10^8, and 10^9 ind.·L^{-1}) of *Microcystis aeruginosa* and *Selenastrum capricornutum*. The optical density of each group was measured daily. The results showed that 2.5 g·(200 mL)$^{-1}$ of *Myriophyllum elatinoides* has significant inhibition effect on *Microcystis aeruginosa* growth with initial concentrations of 10^7 ind.·L^{-1} and 10^8 ind.·L^{-1}. However, there was no significant inhibition on the growth of *Selenastrum capricornutum*. Through solvent extraction and GC-MS analysis, hexadecanoic acid was extracted and determined as an allelochemical in *Myriophyllum elatinoides*. Additionally, three potentially novel allelochemical compounds secreted by *Myriophyllum elatinoides* were determined as follows: 3-ethyl-3-methylheptane, triethyl phosphate and dibutyl phthalate.

Key words: *Myriophyllum elatinoides*; *Microcystis aeruginosa*; *Selenastrum capricornutum*; allelopathic effects; allelochemicals

近年来, 随着人口和经济的快速增长, 水环境污染日趋严重. 大量未达标的生活污水、农业废水和工业尾水被排入自然水体中, 导致水体N、P、重金属以及其他有机质和有毒有害物质的污染越发严重. 历史资料和调查结果显示, 近30年来, 水体富营养化程度明显上升[1], 大规模蓝藻水华在太湖[2]、滇池[3]等水体中频繁地暴发. 目前, 控制蓝藻水华暴发的主要手段有物理清除、化学杀藻和生物控藻等方法[4]. 生物控藻中, 水生植物释放化感物质抑制藻类大规模繁殖, 是控制水华暴发的重要途径[5].

化感作用指植物(含微生物)向环境中释放化学物质以对其他的植物和微生物产生直接或者间接的促进、有害或者自毒作用[6,7], 而其产生的化学物质则被命名为化感物质(allelochemic). 根据化学结构与性质的不同, 可以分为酚类、酮类、醇类、醌类、类萜类、生物碱类以及酯类等近20个类别的物质[7].

水生植物化感抑藻的研究最早源于对植物根系与藻类之间数量消长关系的观察, 大量研究表明该类机制主要包括:化感物质影响藻类光合系统, 对藻类产生氧化胁迫以及影响其他生理生化过程等3个方面. 化感物质可通过影响藻类放氧过程来抑制藻类生长, 例如壬酸可降低铜绿微囊藻的放氧速度[8]; 也可通过改变藻类的叶绿素含量[9]和光合系统电子传递速率来抑制藻类生长[10]. 另一方面, 一些植物分泌的化感物质可以影响藻类的抗氧化酶的活性[11~13], 甚至可以促使ROS大量堆积, 导致生物死亡[14]. 邻苯三酚和咖啡酸[15]能影响细胞膜的形态结构; 阿魏酸等酚酸类化感物质能抑制藻类吸收代谢氮、磷等元素[16,17]; 还有一些化感物质能够影响细胞内呼吸作用[18], 抑制酯酶的活性[19].

不同水生植物能够抑制的浮游藻类的种类与起

收稿日期: 2018-10-12; **修订日期**: 2018-12-03
基金项目: 国家自然科学基金项目(31700429); 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2015ZX07206-006)
作者简介: 毕业亮(1982~), 男, 博士研究生, 主要研究方向为水生态修复, E-mail:406747008@qq.com
* 通信作者, E-mail:sjxu@rcees.ac.cn; 13082114687@163.com

始浓度是不同的. 例如:相比硅藻、绿藻等, 穗花狐尾藻对蓝藻的抑制效果最强, 其中包括铜绿微囊藻、湖丝藻等多种藻类, 且抑制效果和穗花狐尾藻的生物量相关[20,21]. 穗花狐尾藻分泌的化感物质中对铜绿微囊藻起抑制作用的主要包括焦性没食子酸、鞣花酸、五倍子酸、儿茶酸、没食子单宁这5种酚酸类物质, 以及顺-6-十八碳烯酸、壬酸、反-9-十八碳烯酸这3种脂肪酸类[20,21]. 轮叶狐尾藻对蓝藻门的湖丝藻与硅藻门的极小冠盘藻的抑制作用显著高于其他藻类[22]; 金鱼藻对蓝藻门的铜绿微囊藻、湖丝藻等以及绿藻门的小球藻、斜生栅藻和被甲栅藻及硅藻门的极小冠盘藻都有一定的抑制效果[21,23,24].

绿狐尾藻(*Myriophyllum elatinoides*)属于小二仙草科, 狐尾藻属, 原产地为南美洲, 为多年生沉水或浮水草本植物. 目前, 有研究发现绿狐尾藻能通过促进水体的硝化和反硝化作用, 去除畜禽养殖废水中90%以上的总氮和84%的铵态氮[25]. 笔者推测绿狐尾藻通过分泌化感物质来影响 *nirS* 与 *nirK* 等关键基因的丰度, 促进硝化与反硝化作用, 但目前对于绿狐尾藻的化感抑藻作用以及化感物质的研究较少, 仅有绿狐尾藻对铜绿微囊藻和水华鱼腥藻这2种典型水华藻类的化感抑藻作用研究[26]. 本文以典型水华藻类铜绿微囊藻为对象, 进一步研究绿狐尾藻对不同起始浓度的铜绿微囊藻的化感抑制效果; 同时以常见淡水藻类羊角月牙藻[27]为对照, 了解绿狐尾藻对普通淡水藻类是否有抑制作用. 在此基础上, 分离、分析并鉴定可能由绿狐尾藻分泌的化感物质类型, 以期为研究化感物质及控制水体富营养化提供思路与方法.

1 材料与方法

1.1 材料

本研究用的绿狐尾藻, 取自中国科学院亚热带农业生态研究所长沙农业环境观测研究站. Hoagland营养液用于绿狐尾藻的无土扩大培养, 5 d更换一次培养液. 在与绿狐尾藻共培养前, 用BG11培养液进行适应性培养7 d, 选取长势良好的备用.

本实验所用的藻种购自中国科学院水生生物研究所. 铜绿微囊藻(*Microcystis aeruginosa*, FACHB315)和羊角月牙藻(*Selenastrum capricornutum*, FACHB271)均取7 mL藻种原液, 在BG11培养液中培养. 使用钠灯在80 cm高度处照射(光周期为12 h∶12 h)预培养7 d, 保持培养温度25℃[28].

1.2 实验方法

1.2.1 绿狐尾藻与铜绿微囊藻和羊角月牙藻共培养实验

取66个500 mL的锥形瓶, 每个加入200 mL BG11培养液灭菌备用. 绿狐尾藻分出33份各2.5 g左右, 超纯水冲洗浸泡. 本实验藻类生长至对数期后, 用血球计数板法测定藻类密度, 按照起始藻密度的不同, 取不同体积藻液分别转接到已接种和未接种绿狐尾藻的锥形瓶中, 使各组培养液分别含10^5、10^6、10^7、10^8和10^9 ind.·L^{-1}铜绿微囊藻或羊角月牙藻, 每组3个平行. 另外, 分别设置3个不含以及3个含绿狐尾藻的空白对照[29]. 每天取样测定藻类培养液的光密度值, 连续检测10 d, 第0 d为培养3 h后取样. 每次取5 mL混匀的培养液, 分别在680 nm和430 nm波长处测定铜绿微囊藻与羊角月牙藻的光密度值.

1.2.2 绿狐尾藻化感物质测定

绿狐尾藻化感物质的提取方法参考文献[20, 30]:取足量的绿狐尾藻, 自来水洗净后用蒸馏水浸泡3次, 每次20 min. 剪碎后用液氮研磨, 快速称取3份10 g重的绿狐尾藻粉末, 与甲醇(色谱纯)以1∶20(质量浓度)混合均匀, 常温下避光浸提48 h, 间歇搅拌, 浸提液用定性滤纸过滤. 滤液用旋转蒸发仪(50℃, 300 mbar, 76 r·min^{-1})蒸干形成浸膏后, 用氮吹仪将其完全吹干形成粉末. 粉末溶于10 mL甲醇(色谱纯), 并用0.1 mol·L^{-1} HCl将溶液pH调至3后, 4℃冷藏备用.

先用5 mL甲醇活化OASIS HLB固相萃取柱(Waters, 6cc), 再用5 mL 75%的乙醇进行平衡, 然后将备用的浸提液通过固相萃取柱, 之后用超纯水、甲醇(色谱纯)、丙酮(色谱纯)、石油醚(色谱纯)、正丁醇(色谱纯)各10 mL依次洗脱. 固相萃取柱的流速为1~2 mL·min^{-1}[31].

洗脱的各组分分别吹干后, 各加3 mL甲醇(色谱纯)溶解, 取1 mL用有机系滤膜过滤(0.22 μm), 滤液进行GC-MS检测. GC-MS的条件设置, 色谱柱:HP-5MS(长30 m, 内径0.25 mm, 膜厚0.25 μm); 载气:氦气(纯度≥99.99%, 1.3 mL·min^{-1}); 升温程序:60℃保持2 min, 10 ℃·min^{-1}升温至160℃, 保持1 min, 5 ℃·min^{-1}升温至235℃, 保持1 min, 30 ℃·min^{-1}升温至280℃, 保持5 min; 进样量:1 μL, 不分流进样; 进样口与检测口温度:260℃; 采用电子轰击源, 轰击电压70 eV, 扫描范围 m/z 30~600 u, 以速度1.0 s进行全程扫描[32].

将绿狐尾藻以一定比例(50 g湿重∶2 L营养

液)25℃室温培养一周后，取200 mL营养液用滤纸过滤. 过滤所得的绿狐尾藻生长液按前述步骤处理后进行GC-MS分析.

2　结果与讨论

2.1　绿狐尾藻对铜绿微囊藻及羊角月牙藻的化感抑制效果

绿狐尾藻分别与铜绿微囊藻及羊角月牙藻进行共培养实验，连续10 d检测对照组与相应实验组的藻类光密度值，其动态变化如图所示(图1和图2). 对不同起始浓度的藻类动态变化分别进行独立样本 t 检验(表1)，结果显示，在铜绿微囊藻起始浓度为 10^5、10^7 和 10^8 ind. ·L^{-1} 时，对照组与实验组铜绿微囊藻的光密度值在实验期内(10 d)出现显著差异；而羊角月牙藻对照组与实验组的光密度值在5个起始浓度中均没有显著差异.

图1(a)显示，10^5 ind. ·L^{-1} 起始浓度的铜绿微囊藻，10 d内并没有明显生长，光密度值在误差范围内基本约等于零，尽管在该浓度下，对照组与实验组的光密度值存在显著差异，绿狐尾藻的抑藻作用并没有体现. 同样，绿狐尾藻对铜绿微囊藻在 10^6 ind. ·L^{-1} 起始浓度时的生长抑制作用也不显著[图1(b)和表1]. 当铜绿微囊藻起始浓度为 10^7 ind. ·L^{-1} 及 10^8 ind. ·L^{-1} 时[图1(c)和1(d)]，对照组的光密度值有明显的上升，但实验组的铜绿微囊藻的生长受到了显著的抑制，显著性检验结果分别为 $P<0.05$ 及 $P<0.01$(表1). 铜绿微囊藻起始浓度为 10^7 ind. ·L^{-1} 时，从第5 d开始，对照组与实验组的光密度值差异就较为明显，且此后差异越来越明显；当起始浓度为 10^8 ind. ·L^{-1} 时，光密度的差异从第4 d开始. 但是如图1(e)所示，在 10^9 ind. ·L^{-1} 的起始浓度下，实验组的光密度值一直高于对照组，所以绿狐尾藻并未对铜绿微囊藻的生长起到抑制作用. 而在羊角月牙藻的共培养实验中，绿狐尾藻对5个起始浓度的羊角月牙藻(10^5、10^6、10^7、10^8 及 10^9 ind. ·L^{-1})在培养时间内均无显著的抑制生长作用(图2和表1).

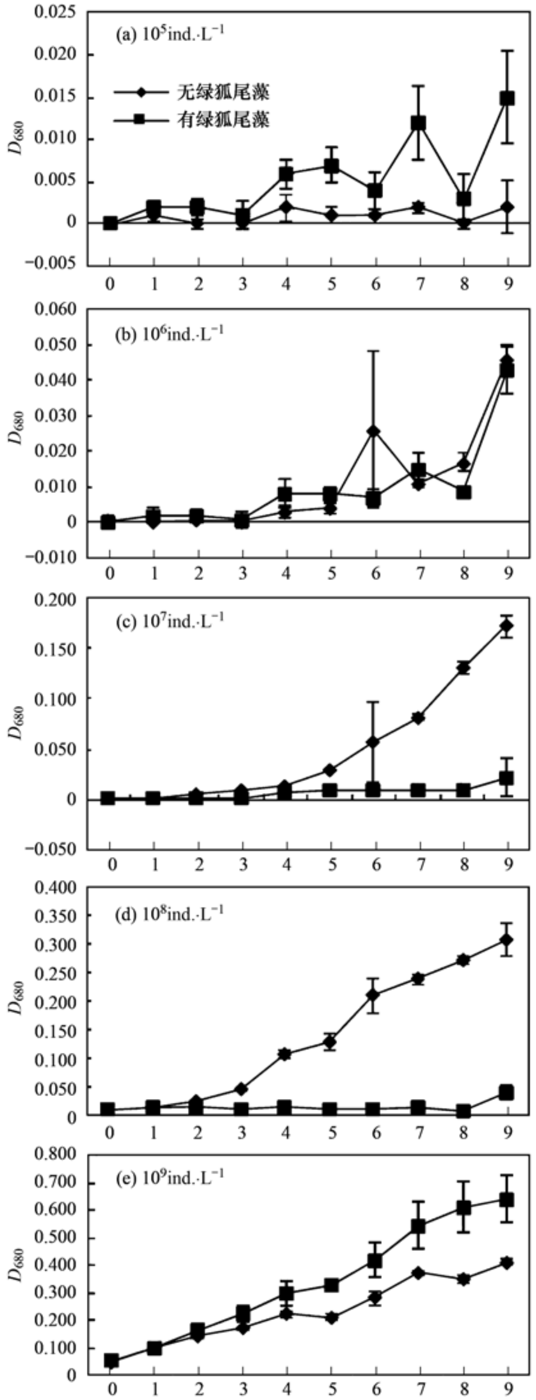


图1　绿狐尾藻对不同起始浓度的铜绿微囊藻的光密度值变化影响

Fig. 1　Effects of *Myriophyllum elatinoides* on the optical density of *Microcystis aeruginosa* with different initial concentrations

综上所述，2.5 g·(200 mL)$^{-1}$ 的绿狐尾藻能对起始浓度 10^7 ind. ·L^{-1} 和 10^8 ind. ·L^{-1} 的铜绿微囊藻的生长起到很好的抑制效果；但在 10^5 ind. ·L^{-1} 和 10^6 ind. ·L^{-1} 起始浓度时，由于藻类浓度过低，绿狐尾藻并未产生强烈的抑制作用；而对于 10^9 ind. ·L^{-1} 的起始浓度的铜绿微囊藻，由于起始浓度过高，2.5 g·(200 mL)$^{-1}$ 的绿狐尾藻未能抑制藻类的生长.

有研究指出，(15 ± 5) g·(8 L)$^{-1}$ 的黄丝草对初始浓度 10^6 ind. ·L^{-1} 和 10^7 ind. ·L^{-1} 的铜绿微囊藻有明显的抑制作用；(15 ± 5) g·(8 L)$^{-1}$ 的马来眼子菜对初始浓度 10^8 ind. ·L^{-1} 的铜绿微囊藻有明显的抑制作用；(15 ± 5) g·(8 L)$^{-1}$ 的菹草对初始浓度 10^5 ind. ·L^{-1} 和 10^6 ind. ·L^{-1} 的铜绿微囊藻有明显的抑制作用[29]. 所以，相比本文的研究结果可知，多种水生植物对铜绿微囊藻都有化感抑藻作用，但

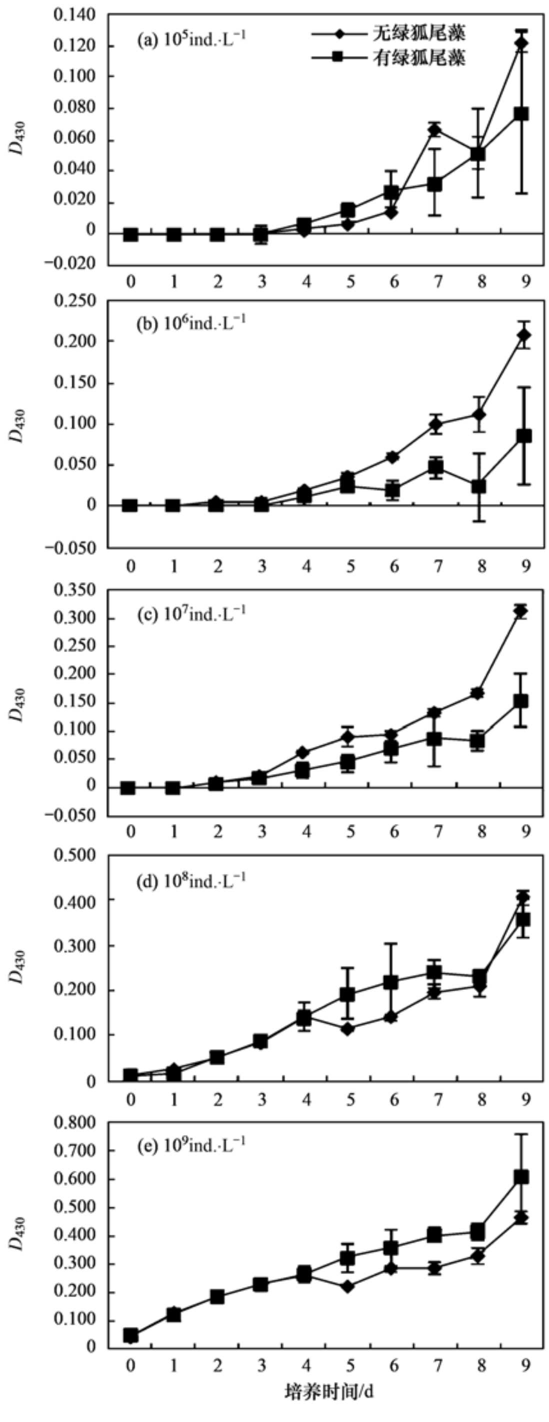


图 2　绿狐尾藻对不同起始浓度的羊角月牙藻的光密度值变化影响

Fig. 2　Effects of *Myriophyllum elatinoides* on the optical density of *Selenastrum capricornutum* with different initial concentrations

是不同水生植物抑制铜绿微囊藻生长所对应的藻类起始浓度不同，且对应的水生植物最小生物量也不同. 但共同点是它们在铜绿微囊藻起始浓度过低时均无化感抑制作用，浓度过高时化感作用无法抑制其生长. 本实验中铜绿微囊藻浓度过高时，与绿狐尾藻共培养时生长速度反而快于对照组，该现象还需进一步实验分析.

表 1　不同起始浓度条件下绿狐尾藻对两种藻类生长影响的独立样本 *t* 检验[1)]

Table 1　The *t*-test analysis of the effects of *Myriophyllum elatinoides* on the growth of two species of algae at different initial concentrations

项目	起始浓度 /ind.·L^{-1}	绿狐尾藻影响 (P 值)
铜绿微囊藻	10^5	*
	10^6	ns
	10^7	*
	10^8	* *
	10^9	ns
羊角月牙藻	10^5	ns
	10^6	ns
	10^7	ns
	10^8	ns
	10^9	ns

1) ns 代表实验组与对照组之间差异不显著，* 表示实验组与对照组之间 $P < 0.05$，* * 表示实验组与对照组之间 $P < 0.01$

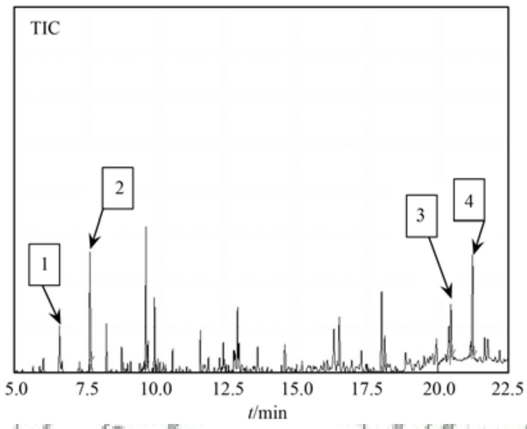
另外，对羊角月牙藻的化感抑制研究发现，芦苇及菖蒲对其有明显的抑制作用[27,33]，而加拿大一枝黄花则基本没有明显的抑制效果[34]. 不同水生植物对羊角月牙藻化感抑制效果不同，有的水生植物对羊角月牙藻生长并没有抑制效果，也说明了水生植物的抑藻作用是有选择性的，不同的水生植物可抑制不同类型的藻类[35]. 本文中绿狐尾藻对羊角月牙藻生长无抑制作用，可能是羊角月牙藻对绿狐尾藻和加拿大一枝黄花释放的化感物质耐受性高[26].

对比两种藻类生长情况可知，铜绿微囊藻对绿狐尾藻化感物质的耐受性比羊角月牙藻低[26]. 据此推测，绿狐尾藻可用于蓝藻水华泛滥水域的治理，既能抑制铜绿微囊藻和水华鱼腥藻两种典型水华藻类的生长，又不会抑制常规淡水藻类羊角月牙藻生长，这就间接提高了其他非水华藻类的生长竞争力，使水域向一个良性状态发展[26,27].

2.2　绿狐尾藻化感物质分离鉴定结果与分析

对绿狐尾藻的浸提液与生长液进行 GC-MS 检测(图 3 和图 4)，选取两者当中皆有特征峰的物质与谱库进行比对，结果显示，出峰时间在 6.579、7.660、20.469 及 21.241 min 的物质分别为 3-乙基-3-甲基庚烷、磷酸三乙酯、棕榈酸和酞酸二丁酯；其中，棕榈酸在之前的研究报道中已确定为水生植物分泌的化感物质之一. 棕榈酸属饱和脂肪酸类化感物质，在香蒲、芦苇、马来眼子菜、穗花狐尾藻等水生植物中都存在[35,36]. 在绿狐尾藻的浸提液与生长液中均检测出棕榈酸，这证明绿狐尾藻自身产生的棕榈酸能分泌到外界水环境中；并且研究证明，其同类穗花狐尾藻可抑制铜绿微囊藻生长，而

起主要作用的是酚酸类和脂肪酸类化感物质[20,21]，所以棕榈酸作为一种脂肪酸类化感物质有较大可能是绿狐尾藻抑制铜绿微囊藻生长的一种关键化感物质. 根据 Li 等[25]的研究，笔者推测绿狐尾藻的化感物质可影响水体中反硝化作用关键基因(*nirS* 与 *nirK*)的丰度. 所以，在后期实验中可向富营养化水体中单独投加棕榈酸，来验证其是否会影响 *nirS* 与 *nirK* 基因的丰度. 另外 3 种物质中磷酸三乙酯和酞酸二丁酯都属于比较常见的酯类化感物质，而 3-乙基-3-甲基庚烷同类型的较为少见，但是三者在已知有关化感物质的报道中并未提及，所以需后续抑藻实验才能确定是否为化感物质.



图中 1、2、3 及 4 分别代表：3-乙基-3-甲基庚烷、磷酸三乙酯、棕榈酸及酞酸二丁酯，下同

图 3　绿狐尾藻浸提液 GC-MS 出峰图谱

Fig. 3　GC-MS spectrum of *Myriophyllum elatinoides*' extract

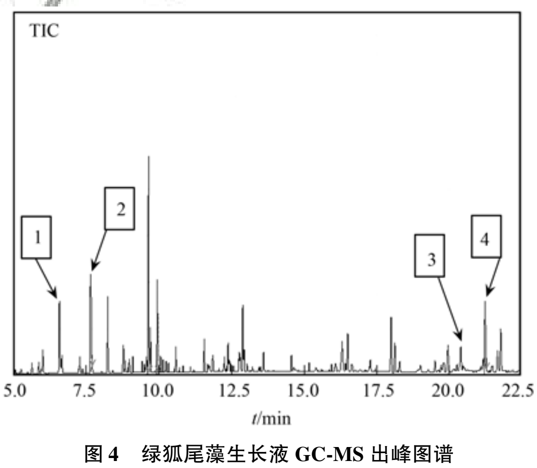


图 4　绿狐尾藻生长液 GC-MS 出峰图谱

Fig. 4　GC-MS spectrum of *Myriophyllum elatinoides*' culture solution

3　结论

(1)2.5 g·(200 mL)$^{-1}$的绿狐尾藻对起始培养浓度为10^7 ind.·L^{-1}和10^8 ind.·L^{-1}的铜绿微囊藻，具有显著的抑制生长作用，在铜绿微囊藻起始浓度过高(10^9 ind.·L^{-1})或者过低时(10^5 ind.·L^{-1}和10^6ind.·L^{-1})抑藻作用均不明显.

(2)在实验范围内，绿狐尾藻对羊角月牙藻的生长均没有显著的抑制作用.

(3)对绿狐尾藻的浸提液和生长液进行 GC-MS 检测分析，证明棕榈酸是绿狐尾藻的化感物质之一，与化感抑藻作用相关，并发现 3 种疑似绿狐尾藻分泌的化感物质，有待后续实验验证.

参考文献：

[1] 陈小锋，揣小明，杨柳燕. 中国典型湖区湖泊富营养化现状、历史演变趋势及成因分析[J]. 生态与农村环境学报，2014，**30**(4)：438-443.
Chen X F, Chuai X M, Yang L Y. Status quo, historical evolution and causes of eutrophication in lakes in typical lake regions of China[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2014, **30**(4): 438-443.

[2] 秦伯强，王小冬，汤祥明，等. 太湖富营养化与蓝藻水华引起的饮用水危机——原因与对策[J]. 地球科学进展，2007，**22**(9)：896-906.
Qin B Q, Wang X D, Tang X M, *et al*. Drinking water crisis caused by eutrophication and cyanobacterial bloom in Lake Taihu: Cause and measurement[J]. Advances in Earth Science, 2007, **22**(9): 896-906.

[3] 盛虎，郭怀成，刘慧，等. 滇池外海蓝藻水华爆发反演及规律探讨[J]. 生态学报，2012，**32**(1)：56-63.
Sheng H, Guo H C, Liu H, *et al*. Reversion and analysis on cyanobacteria bloom in Waihai of Lake Dianchi[J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, **32**(1): 56-63.

[4] 过龙根. 除藻与控藻技术[J]. 中国水利，2006，(17)：34-36.
Guo L G. Algae removal and control technologies[J]. China Water Resources, 2006, (17): 34-36.

[5] 刘佳，刘永立，叶庆富，等. 水生植物对水体中氮、磷的吸收与抑藻效应的研究[J]. 核农学报，2007，**21**(4)：393-396，332.
Liu J, Liu Y L, Ye Q F, *et al*. Study on the removal of nitrogen, phosphorus and inhibiting effect of algae growth by aquatic plants[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2007, **21**(4): 393-396, 332.

[6] Rice E L. Allelopathy[M]. New York: Academic Press, 1974.

[7] Rice E L. Allelopathy[M]. New York: Academic Press, 1984.

[8] Shao J H, Wu X Q, Li R H. Physiological responses of *Microcystis aeruginosa* PCC7806 to nonanoic acid stress[J]. Environmental Toxicology, 2009, **24**(6): 610-617.

[9] 孙文浩，俞子文，邰根福，等. 凤眼莲无菌苗培养及其克藻效应[J]. 植物生理学报，1990，**16**(3)：301-305.
Sun W H, Yu Z W, Tai G F, *et al*. Sterilized culture of water hyacinth and its application in the study of allelopathic effect on algae[J]. Acta Phytophysiologica Sinica, 1990, **16**(3): 301-305.

[10] Zhu J Y, Liu B Y, Wang J, *et al*. Study on the mechanism of allelopathic influence on cyanobacteria and chlorophytes by submerged macrophyte (*Myriophyllum spicatum*) and its secretion[J]. Aquatic Toxicology, 2010, **98**(2): 196-203.

[11] 李锋民，胡洪营，门玉洁，等. 化感物质对小球藻抗氧化体系酶活性的影响[J]. 环境科学，2006，**27**(10)：2091-2094.
Li F M, Hu H Y, Men Y J, *et al*. Effects of EMA on activities of algal antioxidant enzymes[J]. Environmental Science, 2006, **27**(10): 2091-2094.

[12] Wu Z B, Deng P, Wu X H, *et al*. Allelopathic effects of the submerged macrophyte *Potamogeton malaianus* on *Scenedesmus*

obliquus[J]. Hydrobiologia, 2007, **592**(1): 465-474.

[13] Hong Y, Hu H Y, Li F M. Physiological and biochemical effects of allelochemical ethyl 2-methyl acetoacetate (EMA) on cyanobacterium *Microcystis aeruginosa*[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2008, **71**(2): 527-534.

[14] Stermitz F R, Hufbauer R A, Vivanco J M. Enantiomeric-dependent phytotoxic and antimicrobial activity of (±)-Catechin. A rhizosecreted racemic mixture from spotted knapweed [J]. Plant Physiology, 2002, **128**(4): 1173-1179.

[15] 花铭, 陈良燕, 尹大强. 邻苯三酚和咖啡酸对铜绿微囊藻的化感作用及其机理[J]. 环境化学, 2008, **27**(3): 331-334.
Hua M, Chen L Y, Yin D Q. The compare on the mechanism of pyrogallic acid and caffeic acid allelochemicals to algae (*Microcystis aeruginosa*)[J]. Environmental Chemistry, 2008, **27**(3): 331-334.

[16] Booker F L, Blum U, Fiscus E L. Short-term effects of ferulic acid on ion uptake and water relations in cucumber seedlings[J]. Journal of Experimental Botany, 1992, **43**(250): 649-655.

[17] Mjelde M, Faafeng B A. *Ceratophyllum demersum* hampers phytoplankton development in some small Norwegian lakes over a wide range of phosphorus concentrations and geographical latitude [J]. Freshwater Biology, 1997, **37**(2): 355-365.

[18] Jose S, Gillespie A R. Allelopathy in black walnut (*Juglans nigra* L.) alley cropping. I. Spatio-temporal variation in soil juglone in a black walnut-corn (*Zea mays* L.) alley cropping system in the midwestern USA[J]. Plant and Soil, 1998, **203**(2): 191-197.

[19] Gala W R, Giesy J P. Effects of ultraviolet radiation on the primary production of natural phytoplankton assemblages in Lake Michigan[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 1991, **22**(3): 345-361.

[20] Nakai S, Inoue Y, Hosomi M, *et al*. Growth inhibition of blue-green algae by allelopathic effects of macrophyte[J]. Water Science and Technology, 1999, **39**(8): 47-53.

[21] Körner S, Nicklisch A. Allelopathic growth inhibition of selected phytoplankton species by submerged macrophytes[J]. Journal of Phycology, 2002, **38**(5): 862-871.

[22] Hilt S, Ghobrial M G N, Gross E M. *In situ* allelopathic potential of *Myriophyllum verticillatum* (Haloragaceae) against selected phytoplankton species[J]. Journal of Phycology, 2006, **42**(6): 1189-1198.

[23] 袁峻峰, 章宗涉. 金鱼藻(*Ceratophyllum demersum* Kom.)对藻类的生化干预作用[J]. 生态学报, 1993, **13**(1): 45-50.
Yuan J F, Zhang Z S. Biochemical interference of aquatic macrophyte *Ceratophyllum demersum* on algae [J]. Acta Ecologica Sinica, 1993, **13**(1): 45-50.

[24] 李小路, 潘慧云, 徐洁, 等. 金鱼藻与铜绿微囊藻共生情况下的化感作用[J]. 环境科学学报, 2008, **28**(11): 2243-2249.
Li X L, Pan H Y, Xu J, *et al*. Allelopathic effects of *Ceratophyllum demersum* and *Microcystis aeruginosa* in co-cultivation[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2008, **28**(11): 2243-2249.

[25] Li X, Zhang M M, Liu F, *et al*. Abundance and distribution of microorganisms involved in denitrification in sediments of a *Myriophyllum elatinoides* purification system for treating swine wastewater[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2015, **22**(22): 17906-17916.

[26] Wang H P, Liu F, Luo P, *et al*. Allelopathic effects of *Myriophyllum aquaticum* on two cyanobacteria of *Anabaena flos-aquae* and *Microcystis aeruginosa*[J]. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology, 2017, **98**(4): 556-561.

[27] 门玉洁, 李锋民, 胡洪营. 芦苇化感组分对羊角月牙藻和雷氏衣藻生长特性的影响[J]. 湖泊科学, 2007, **19**(4): 473-478.
Men Y J, Li F M, Hu H Y. Effects of an allelopathic fraction in *Phragmitis communis* Trin on the growth characteristics of *Selenastrum capricornutum* and *Chlamydomonas reinhardtii*[J]. Journal of Lake Sciences, 2007, **19**(4): 473-478.

[28] 朱俊英, 刘碧云, 王静, 等. 穗花狐尾藻化感作用对铜绿微囊藻光合效率的影响[J]. 环境科学, 2011, **32**(10): 2904-2908.
Zhu J Y, Liu B Y, Wang J, *et al*. Allelopathic influence of *Myriophyllum spicatum* on the photosynthetic efficiency of *Microcystis aeruginosa*[J]. Environmental Science, 2011, **32**(10): 2904-2908.

[29] 吴晓辉. 常见眼子菜科沉水植物对浮游藻类的化感作用研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院(水生生物研究所), 2005.
Wu X H. Studies on the allelopathy of several submerged Potamogetonaceae species on planktonic algae[D]. Beijing: Institute of Hydrobiology, Chinese Academy of Sciences, 2005.

[30] Gross E M, Meyer H, Schilling G. Release and ecological impact of algicidal hydrolysable polyphenols in *Myriophyllum spicatum* [J]. Phytochemistry, 1996, **41**(1): 133-138.

[31] 贺金娜, 曹栋, 史苏佳. 苹果多酚的固相萃取纯化研究[J]. 食品工业科技, 2014, **35**(16): 290-293.
He J N, Cao D, Shi S J. Study on solid phase extraction in the purification of apple polyphenols[J]. Science and Technology of Food Industry, 2014, **35**(16): 290-293.

[32] 刘成. 芦苇化感作用及其化感物质分离与鉴定[D]. 重庆: 西南大学, 2014.
Liu C. Allelopathy of *Phragmites australis* and the isolaton and identification of allelochemicals in *P. australis*[D]. Chongqing: Southwest University, 2014.

[33] 丁惠君, 张维昊, 王超, 等. 菖蒲对几种常见藻类的化感作用研究[J]. 环境科学与技术, 2007, **30**(6): 20-22.
Ding H J, Zhang W H, Wang C, *et al*. Allelopathic effect of *Acorus calamus* on some species of algae[J]. Environmental Science & Technology, 2007, **30**(6): 20-22.

[34] 白羽, 黄莹莹, 孔海南, 等. 加拿大一枝黄花化感抑藻效应的初步研究[J]. 生态环境学报, 2012, **21**(7): 1296-1303.
Bai Y, Huang Y Y, Kong H N, *et al*. Studies on the allelopathic effects of *Solidago canadensis* L. on algae[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2012, **21**(7): 1296-1303.

[35] 洪喻, 胡洪营. 水生植物化感抑藻作用研究与应用[J]. 科学通报, 2009, **54**(3): 287-293.
Hong Y, Hu H Y. Research and application of inhibitory allelopathy from aquatic plants on algae[J]. Chinese Science Bulletin, 2009, **54**(3): 287-293.

[36] 戴树桂, 赵凡, 金朝晖, 等. 香蒲植物提取物的抑藻作用及其分离鉴定[J]. 环境化学, 1997, **16**(3): 268-271.
Dai S G, Zhao F, Jin Z H, *et al*. Allelopathic effect of plant's extracts on algae and the isolating and identifying of phototoxins [J]. Environmental Chemistry, 1997, **16**(3): 268-271.

HUANJING KEXUE Vol. 40 No. 5
Environmental Science (monthly) May 15, 2019

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, *et al.* (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 (1 534 m) in Central East China ························ SHEN Li-juan, WANG Hong-lei, YIN Yan, *et al.* (2019)
Concentration Characteristics and Source Analysis of $PM_{2.5}$ During Wintertime in Zhengzhou-Xinxiang ·························· YAN Guang-xuan, ZHANG Pu-zhen, HUANG Hai-yan, *et al.* (2027)
Scenario Analysis of $PM_{2.5}$ Concentration Targets and Milestones in China ·· HE Jin-yu, YAN Li, WANG Yan-chao, *et al.* (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, *et al.* (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, *et al.* (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, *et al.* (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, *et al.* (2069)
Inventory and Characteristics of Biogenic Volatile Organic Compounds (BVOCs) for 12 Deciduous Fruit Trees ······························· LI Shuang-jiang, YUAN Xiang-yang, LI Qi, *et al.* (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, *et al.* (2086)
Status of Antibiotic Contamination and Ecological Risks Assessment of Several Typical Chinese Surface-Water Environments ······················ LIU Xi, WANG Zhi, WANG Xue-lei, *et al.* (2094)
Distribution and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Water Bodies in Seven Basins of China ··························· FAN Bo, WANG Xiao-nan, HUANG Yun, *et al.* (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, *et al.* (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, *et al.* (2122)
Regional Evolution and Control Factors of Karst Groundwater in Liulin Spring Catchment ·· HUNAG Qi-bo, QIN Xiao-qun, LIU Peng-yu, *et al.* (2132)
Major Ionic Characteristics and Controlling Factors of Karst Groundwater at Xiangshui, Chongzuo ···································· ZHOU Jin-mei, JIANG Zhong-cheng, XU Guang-li, *et al.* (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, *et al.* (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, *et al.* (2160)
Distribution Characteristics and Influencing Factors of Phosphorus in the Dongting Lake at Different Water Periods ································· LI Ying-jie, WANG Li-jing, LI Hong, *et al.* (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, *et al.* (2186)
Nitrogen and Phosphorus Removal by Integrated Ecological Engineering Treatment System in a Small Agricultural Watershed ··········· JIANG Qian-wen, LIU Feng, PENG Ying-xiang, *et al.* (2194)
Spatial Distribution and Pollution Assessment of Heavy Metals in River Sediments from Lake Taihu Basin ··· ZHANG Jie, GUO Xi-ya, ZENG Ye, *et al.* (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, *et al.* (2211)
Mercury Distribution Characteristics and Its Mass Balance in a Multifunctional Urban Wetland ··· LIU Wei-hao, WANG Yong-min, FAN Yu-fei, *et al.* (2219)
Distribution Characteristics of Mercury in Different Urban Constructed Wetlands ··· FAN Yu-fei, LIU Wei-hao, SUN Tao, *et al.* (2226)
Effects of Microplastics on Antibiotic Resistance Genes in Estuarine Sediments ··· HUANG Fu-yi, YANG Kai, ZHANG Zi-xing, *et al.* (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, *et al.* (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, *et al.* (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, *et al.* (2258)
Allelopathic Effects and Allelochemicals of *Myriophyllum elatinoides* on *Microcystis aeruginosa* and *Selenastrum capricornutum* ················· BI Ye-liang, WU Shi-min, ZHOU Si-ning, *et al.* (2265)
Removal Efficiency of Trichloroacetamide by UV/Sodium Sulfite ··· FU Zhi-xuan, GUO Ying-qing, CHU 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, *et al.* (2287)
Fluoride Removal Efficiency of Novel Material: Magnetite Core/Zirconia Shell Nanocomposite ··· FANG Wen-kan, LI Xiao-di, FANG Jing, *et al.* (2295)
Impact Mechanisms of Carboxyl Group Modified Cathode on Acetate Production in Microbial Electrosynthesis Systems ························ QI Jia-xin, ZENG Cui-ping, LUO Hai-ping, *et al.* (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, *et al.* (2310)
Start-up Performance of Low-substrate Anaerobic Ammonium Oxidation Under Different COD Concentrations ································· MA Yan-hong, ZHAO Zhi-chao, AN Fang-jiao, *et al.* (2317)
Partial Nitrification Fast Start-up and Stable Performance of 15℃ SBBR ··· SUN Yi-qi, BIAN Wei, LI Jun, *et al.* (2326)
Effects of Long-term Poly-P Deficiency on the Metabolic Properties of *Accumulibacter* in AO-SBR System ·· WANG Shao-po, LI Zhu, ZHAO Le-dan, *et al.* (2333)
Extracellular Polymeric Substances of ANAMMOX Granular Sludge and Its Effects on Sludge Surface Characteristics ······················ YANG Ming-ming, LIU Zi-han, ZHOU Yang, *et al.* (2341)
Treatment of Piggery Biogas Slurry by Enhanced Biological Contact Oxidation with HN-AD Bacteria ·· LIU Xiang-yang, ZHANG Qian, WU Heng, *et al.* (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, *et al.* (2357)
Characteristics and Regional Heterogeneity of Eukaryotic Microbial Community in Wastewater Treatment Plants ························· QIN Wen-tao, ZHANG Bing, SUN Chen-xiang, *et al.* (2368)
Effects of Wetland Reclamation on Soil Microbial Community Structure in the Sanjiang Plain ··· WANG Na, GAO Jie, WEI Jing, *et al.* (2375)
Distribution Pattern and Diversity Maintenance Mechanisms of Fungal Community in Subalpine Lakes ·· LIU Jin-xian, LI Cui, LUO Zheng-ming, *et al.* (2382)
Influence of Biochar Amendment on Soil Denitrifying Microorganisms in Double Rice Cropping System ·· LIU Jie-yun, QIU Hu-sen, WANG Cong, *et al.* (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, *et al.* (2404)
Effects of Water Deficit on Greenhouse Gas Emission in Wheat Field in Different Periods ··· WANG Xiao-yun, CAI Huan-jie, LI Liang, *et al.* (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, *et al.* (2426)
Effects of Cyclical Temperature Fluctuations on Organic Carbon Mineralization in Purple Soil ··· ZENG Man-man, CI En, FAN Jing-jing, *et al.* (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, *et al.* (2443)
Remediation Potential of *Ageratum conyzoides* L. on Cadmium Contaminated Farmland ··· ZHANG Yun-xia, SONG Bo, BIN Juan, *et al.* (2453)
Evaluation of the Potential Agricultural Risks of Polycyclic Aromatic Hydrocarbon Contaminated Soil by Planting *Lactuca sativa* L. ······ JIAO Hai-hua, GUO Jia-jia, ZHANG Jing-min, *et al.* (2460)
Impacts of Land Use and Landscape Patterns on Heavy Metal Accumulation in Soil ··· SHU Xin, LI Yan, LI Feng, *et al.* (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, *et al.* (2483)