

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第7期

Vol.38 No.7

2017

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

基于船载走航气溶胶质谱技术的海洋气溶胶研究	颜金培, 陈立奇, 林奇, 赵淑惠, 李磊, 朱大勇 (2629)
利用 MODIS C6 数据分析中国西北地区气溶胶光学厚度时空变化特征	赵仕伟, 高晓清 (2637)
秋冬季节华北背景地区 PM ₁ 污染特征及来源	张周祥, 张养梅, 张小曳, 王亚强, 沈小静, 孙俊英, 周怀刚 (2647)
杭州市 PM _{2.5} 中水溶性离子的污染特征及其消光贡献	吴丹, 蔺少龙, 杨焕强, 杜荣光, 夏俊荣, 齐冰, 刘刚, 李凤英, 杨孟, 盖鑫磊 (2656)
青岛不同强度霾天气溶胶中二次无机离子的生成及粒径分布	谢丹丹, 祁建华, 张瑞峰 (2667)
西安市重污染与清洁天 PM _{2.5} 组分及其活性氧物质对比	王堃, 韩永明, 何世恒, 张婷, 刘随心, 曹军骥 (2679)
黄山 PM ₁₀ 中二元羧酸类化合物的季节变化特征及其来源	孟静静, 侯战方, 张二勋, 董杰, 刘晓迪, 邢继钊, 刘加珍 (2688)
泉州市大气 PM _{2.5} 铜系元素组成特征及来源解析	张云峰, 于瑞莲, 胡恭任, 孙境蔚, 许文质, 张棕巍 (2698)
西北石化区周围毒害类空气污染物污染特征及健康风险评价	许亚宣, 李小敏, 于华通, 董林艳, 赵玉婷, 姚懿函, 邹广迅, 张新民 (2707)
G20 峰会期间宜兴市大气 VOCs 特征及来源分析	张璘, 张祥志, 秦玮, 茅晶晶, 秦艳红, 谢卫平, 史文科, 陈文泰 (2718)
四川省 2005 ~ 2014 年农业源氨排放清单及分布特征	冯小琼, 陈军辉, 姜涛, 钱骏, 叶宏 (2728)
长三角地区典型城市非道路移动机械大气污染物排放清单	鲁君, 黄成, 胡馨遥, 杨强, 井宝莉, 夏阳, 卢滨, 唐伟, 楼晨荣, 陶士康, 李莉 (2738)
我国城市饮用水中 N-亚硝基二甲胺的健康风险评估及水质标准制定	张秋秋, 潘申龄, 张昱, 杨敏, 安伟 (2747)
地下水污染风险评价中污染源荷载量化方法的对比分析	赵鹏, 何江涛, 王曼丽, 崔亚丰 (2754)
胶州湾表层海水中的正构烷烃及其来源解析	张倩, 宋金明, 彭全材, 李学刚, 袁华茂, 李宁, 段雨琴, 曲宝晓, 王启栋 (2763)
桂江流域夏季水-气界面 CO ₂ 脱气的空间变化及其影响因素	张陶, 李建鸿, 蒲俊兵, 吴飞红, 李丽, 袁道先 (2773)
都柳江水系沉积物锑等重金属空间分布特征及生态风险	宁增平, 肖青相, 蓝小龙, 刘意章, 肖唐付, 赵彦龙, 吴世良 (2784)
太湖表层水体及沉积物中双酚 A 类似物的分布特征及潜在风险	陈政宏, 郭敏, 徐怀洲, 刘丹, 程杰, 李江, 张圣虎, 石利利 (2793)
洱海沉积物水提取态有机氮特征及与其他来源溶解性有机氮的差异	李文章, 张莉, 王圣瑞, 肖尚斌, 钱伟斌, 席银, 许可宸, 史玲珑 (2801)
阿哈水库沉积物-水界面磷、铁、硫高分辨率空间分布特征	孙清清, 陈敬安, 王敬富, 杨海全, 计永雪, 兰晨, 王箫 (2810)
北京市水环境中精神活性物质污染特征	张艳, 张婷婷, 陈卫平, 郭昌胜, 花镇东, 张远, 徐建 (2819)
降雨特征及污染物赋存类型对路面径流污染排放的影响	陈莹, 王昭, 吴亚刚, 赵剑强, 杨文娟 (2828)
CaO ₂ 不同投加方式对黑臭河道底泥内源磷释放抑制作用	徐焱, 李大鹏, 韩菲尔, 宋小君, 李鑫, 周婧, 黄勇 (2836)
坡耕地薄层紫色土-岩石系统中氮磷的迁移特征	鲜青松, 唐翔宇, 朱波 (2843)
微生物强化组合浮床净化微盐碱水体的效果	陈友媛, 吴亚东, 孙萍, 吴丹 (2850)
氧化镁基生物炭高效去除水体中磷的特性	王彬斌, 林景东, 万顺利, 何锋 (2859)
Pd/Fe ⁰ 双金属复合催化纤维降解水中痕量亚硝基二甲胺	张环, 傅敏, 魏俊富, 王一冰, 安慧颖, 沈书怡 (2868)
针铁矿、磁铁矿和石膏对 2,4-二氯苯酚厌氧降解的影响	孔殿超, 周跃飞, 陈天虎, 王进, 李碧 (2875)
污水再生过程中消毒副产物前体物转化规律	韩慧慧, 缪恒峰, 张雅晶, 陆敏峰, 黄振兴, 阮文权 (2883)
微生物燃料电池改性阳极处理 PTA 废水	孙靖云, 范梦婕, 陈英文, 祝社民, 沈树宝 (2893)
水稻秸秆浸泡液对蓝藻和绿藻生长选择性抑制作用	苏文, 陈洁, 张胜鹏, 孔繁翔 (2901)
沼液 SBR 处理出水养殖螺旋藻	蔡小波, 郁强强, 刘锐, 赵远, 陈吕军 (2910)
K ⁺ 强化高盐环境下厌氧氨氧化脱氮效能	吴国栋, 于德爽, 李津, 周同, 王晓静 (2917)
包埋氨氧化细菌短程硝化的高效稳定运行	于濛雨, 刘毅, 田玉斌, 石欢, 徐富, 杨宏 (2925)
ANAMMOX 的快速启动及 EPS 在 ANAMMOX 颗粒污泥中的空间分布	李惠娟, 彭聪聪, 陈国燕, 姚倩, 卓杨, 王彬斌 (2931)
厌氧氨氧化污泥中氨氧化的潜在电子受体	李祥, 林兴, 王凡, 袁砚, 黄勇, 袁怡, 毕贞, 刘忻, 杨朋兵 (2941)
基于厌氧氨氧化的含氮废气原位处理	林兴, 王凡, 袁砚, 李祥, 黄勇, 袁澄伟 (2947)
基于污泥资源化利用的粗放型绿色屋顶生长基质的组成	沈庆然, 李田, 曹熠, 潘奥 (2953)
罗红霉素短期冲击对活性污泥中氨氧化微生物丰度和多样性的影响	高景峰, 孙丽欣, 樊晓燕, 潘凯玲, 李定昌 (2961)
不同盐度下活性污泥中微生物群落变化规律及其处理模拟染料废水	周贵忠, 许硕, 姚倩, 银钗 (2972)
CO ₂ -咸水-砂岩相互作用过程中微生物群落结构动态变化特征	王博强, 李晨阳, 卢伟, 樊昊, 张冬至, 汪治, 吕聪, 沈福东 (2978)
油菜/玉米轮作农田土壤呼吸和异养呼吸对秸秆与生物炭还田的响应	田冬, 高明, 黄容, 吕盛, 徐畅 (2988)
模拟气候升温对湿地土壤微生物群落及磷素形态的影响	腾昌运, 沈建国, 王忠, 王行, 李鸿毅, 张志剑 (3000)
秦岭红桦林土壤细菌群落剖面分布特征及其影响因素	杜璨, 许晨阳, 王强, 张帆, 马武功, 和文祥, 侯琳, 耿增超 (3010)
微生物对汞矿区农田土壤汞甲基化的影响	贾钦, 朱雪梅, 王琪, 傅海辉, 郝亚琼, 何洁, 杨子良 (3020)
施用海泡石对铅、镉在土壤-水稻系统中迁移与再分配的影响	方至萍, 廖敏, 张楠, 吕婷, 黄小斌 (3028)
BS + CTMAB 复配修饰在黄棕壤吸附苯酚上的应用	刘伟, 孟昭福, 任爽, 李文斌 (3036)
1999 年与 2014 年贡嘎山峨眉冷杉枝和叶中常见重金属的生物富集特征对比	李芬, 王训, 罗辑, 袁巍, 喻子恒, 商立海 (3045)
铅锌尾矿污染区 3 种菊科植物体内重金属的亚细胞分布和化学形态特征	朱光旭, 肖化云, 郭庆军, 张忠义, 杨曦, 孔静 (3054)
膨润土调质对污泥堆肥的脱毒及重金属钝化和雌酮消除作用	周莉娜, 蔡函臻, 李荣华, 王美净, 赵军超, 王权, 张增强 (3061)
餐厨垃圾与秸秆混合中温和高温厌氧消化对比	郭香麟, 左剑恶, 史绪川, 王凯军, 李静 (3070)
我国村镇生活垃圾可燃组分基本特征及其时空差异	晏卓逸, 岳波, 高红, 李志龙, 黄启飞, 聂小琴, 汪群慧 (3078)
甲烷催化还原 NO _x 中 Co 基/分子筛催化剂的助剂和载体优化	潘华, 建艳飞, 陈宁娜, 刘红霞, 何焱, 贺亚飞 (3085)
《环境科学》征稿简则 (2737) 《环境科学》征订启事 (2809) 信息 (2867, 2971, 3027)	

水稻秸秆浸泡液对蓝藻和绿藻生长选择性抑制作用

苏文¹, 陈洁¹, 张胜鹏¹, 孔繁翔²

(1. 国家海洋局南海规划与环境研究院, 广州 510300; 2. 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 湖泊与环境国家重点实验室, 南京 210008)

摘要: 运用流式细胞仪研究了水稻秸秆浸泡液(RSE)对藻类生长、形态学特征(细胞大小)和生理参数(叶绿素荧光强度)的影响。RSE对有毒、无毒铜绿微囊藻(*Microcystis aeruginosa*)、有毒水华鱼腥藻(*Anabaena flos-aquae*)、鱼害微囊藻(*Microcystis ichthyoblabe*)这4种蓝藻和羊角月牙藻(*Selenastrum capricornutum*)、蛋白核小球藻(*Chlorella pyrenoidosa*)、斜生栅藻(*Scenedesmus obliquus*)这3种常见绿藻生长的抑制作用具有选择性。RSE浓度为2.0~10.0 g·L⁻¹时,可以显著抑制蓝藻的生长,同时强烈影响了藻细胞的叶绿素荧光强度和细胞大小。有毒水华鱼腥藻、鱼害微囊藻、有毒和无毒铜绿微囊藻的7d EC₅₀分别为1.72、2.21、2.92和5.72 g·L⁻¹。暴露于RSE的蛋白核小球藻和斜生栅藻,细胞生长被促进了并观测到有群体形成;而对羊角月牙藻来说,当RSE浓度为1.0~4.0 g·L⁻¹时月牙藻生长和叶绿素荧光强度被抑制,但是当RSE浓度为8.0~10.0 g·L⁻¹时,月牙藻生长被显著促进。总之,RSE对蓝藻生长的抑制效果强于羊角月牙藻、蛋白核小球藻和斜生栅藻,蓝藻光合系统Ⅱ反应中心的敏感性和绿藻群体的形成可能是造成两者对水稻秸秆敏感性不同的主要原因。

关键词: 化感作用; 流式细胞仪; 水稻秸秆; 铜绿微囊藻; 抑制作用

中图分类号: X171 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)07-2901-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.201612017

Selective Inhibition of Rice Straw Extract on Growth of Cyanobacteria and Chlorophyta

SU Wen¹, CHEN Jie¹, ZHANG Sheng-peng¹, KONG Fan-xiang²

(1. South China Sea Institute of Planning and Environmental Research, State Oceanic Administration, Guangzhou 510300, China; 2. State Key Laboratory of Lake Science and Environment, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

Abstract: Rice straw is supposed to be an environment-friendly biomaterial for inhibiting the growth of harmful blooms of the cyanobacterium *Microcystis aeruginosa*. The effects of rice straw extract (RSE) on algal growth, morphologic parameters (cell size), and physiological parameters (*in vivo* Chl-a fluorescence) were investigated using flow cytometry. We examined the selective inhibitory potential of rice straw on four cyanobacterial strains (toxic and non-toxic *Microcystis aeruginosa*, toxic *Anabaena flos-aquae*, and *Microcystis ichthyoblabe*), in comparison with inhibitory effects on three common freshwater green algae (*Selenastrum capricornutum*, *Chlorella pyrenoidosa*, and *Scenedesmus obliquus*). Concentrations from 2.0 to 10.0 g·L⁻¹ of RSE were found to efficiently inhibit the growth of cyanobacteria in a dose-dependent manner, simultaneously modifying the *in vivo* Chl-a fluorescence and cell size. The 50% growth-inhibition concentration (7 d) of *A. flos-aquae*, *M. ichthyoblabe*, *M. aeruginosa* (toxic strain), *M. aeruginosa* (non-toxic strain) was 1.72, 2.21, 2.92 and 5.72 g·L⁻¹, respectively. Interestingly, the growth and cell size of *C. pyrenoidosa* and *S. obliquus* increased with the addition of RSE and colony formation was observed. In the case of *S. capricornutum*, the inhibitory effect of RSE on growth and *in vivo* Chl-a fluorescence occurred at 1.0-4.0 g·L⁻¹, while RSE induced a stimulatory effect on algal growth at 8.0-10.0 g·L⁻¹. Taken together, the sensitivity of cyanobacteria to RSE was significantly higher than that of *S. capricornutum*, *C. pyrenoidosa* and *S. obliquus*. The higher sensitivity of PSII reaction center of cyanobacteria and the ability to form colonies of green algae may have important implications for the species-specific allelopathic antialgal activity of rice straw.

Key words: allelopathy; flow cytometry; rice straw; *Microcystis aeruginosa*; inhibitory effect

近年来,有害藻类水华在湖泊和水库中频发,尤其在夏季,带来了生态危害,影响了饮水安全^[1]。藻类水华的暴发与水体富营养化是密不可分的^[2],藻类大量繁殖使得饮用水发臭^[3,4],改变了湖泊群落结构,降低生物多样性。例如,水华阻挡光线达到水底,同时消耗大量氧气,这不仅改变了大型植被的结构还降低水质^[5]。此外,很多微囊藻属释放藻毒素威胁鱼类、鸟、牲畜、人类的健康^[6,7]。水华的治理

应该首先削减湖泊营养盐,从根本上阻断蓝藻水华生长的营养物质,但这是一个长期且耗资巨大的工

收稿日期: 2016-12-02; 修订日期: 2017-02-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(41501411,31500411);海岸带地理环境监测国家测绘地理信息局重点实验室基金项目(CZ15010);海洋公益性行业科研专项(201505008);湖泊与环境国家重点实验室开放基金项目(2014SKL006);国家海洋局南海分局海洋科学技术局长基金项目(1601,1606,1502)

作者简介: 苏文(1985~),女,博士,工程师,主要研究方向为污染生态学, E-mail:569056080@qq.com

程^[8]. 化学方法抑藻,包括:铜、氯、铝、钙、高锰酸钾等^[9],已经发展多年但是这种方法容易产生二次污染并且专一性差^[10]. 与化学法相比,粘土法被认为具有环境友好型特点,但是有毒的藻细胞被粘土吸附沉积于底泥后,其发生降解时会危害底栖生物^[11].

近年来生物材料控藻广受关注, Kim 等^[12]发现玉竹水溶性提取物抑制铜绿微囊藻生长但是对小球藻(*Chlorella vulgaris*)生长影响不大. Park 等^[13]发现橡树提取物对铜绿微囊藻的抑制作用. 自 1980 年代起,现场和实验室研究发现,大麦秆在水体中的降解可以有效抑制包括蓝藻、绿藻、硅藻等多种藻类的生长^[14]. 接下来大量的研究证实,以干重计浓度范围为 $0.1 \sim 7.2 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 的西方型大麦秆可以有效抑制铜绿微囊藻生长^[15-17],稍低于西藏裸大麦秆(东方型大麦秆)的使用浓度($2.0 \sim 8.0 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$)^[10]. 尽管大麦秆抑藻物质尚未确定,但是充分发挥抑藻作用的大麦需要至少 3 个月的降解已经被证实^[18]. 近来, Park 等^[19]报告 $0.01 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的水稻秸秆甲醇粗提物可以有效地抑制铜绿微囊藻的生长,苏文等^[20]研究发现浸泡 5 d 的水稻秸秆水提液即可显著抑制铜绿微囊藻生长,稻秆抑藻的有效浓度(以干重计)范围为 $2.0 \sim 10.0 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$. 水稻秸秆,以往的农业废弃物可以成为一种具有抑制藻类水华巨大潜力的生物材料.

自然水体中藻类群落是由多种藻组成的,目前报告多是水稻秸秆对单一藻抑制效果的研究,限制了稻秆抑藻这一方法的推广应用,本文选用资源丰富、已有培育历史 20 年、江苏水稻主栽品种的武育梗为实验材料,在室内利用流式细胞仪对比了其秸秆对 4 种水华优势种或产生藻毒素的蓝藻和 3 种常见的绿藻生长的影响. 目前大量的室内和野外实验研究抑藻效果采用的方法是计数或叶绿素含量测定^[12,15,21,22],但是这种方法只能表示生物量的变化并不能监测生理和形态的改变,本文采用流式细胞仪,一方面快速监测了细胞浓度的变化^[10],同时观察了单个细胞形态和生理状况的变化^[23,24],通过对不同藻细胞形态(细胞大小)和生理指标变化(叶绿素荧光)的分析,初步探究了水稻秸秆选择性抑制不同藻类生长的机制.

1 材料与方法

1.1 材料

水稻秸秆用去离子水清洗 3~5 次, 33°C 下干燥

5 d,剪成 2 cm 长的小段,粉碎,过 40 目筛. 取 20 g 粉碎的稻秆,分别浸泡于装有 400 mL 无菌水的 1 L 锥形瓶中. 密封放置于 25°C 的人工气候箱,光暗比 12 h:12 h, 5 d 后稻秆浸泡液过 GF/C 膜用于抑藻实验.

1.2 藻种及培养

蓝藻共 4 种,产毒铜绿微囊藻(*Microcystis aeruginosa*, FACHB-912)^[25]、非产毒铜绿微囊藻(*Microcystis aeruginosa*, FACHB-469)、产毒水华鱼腥藻(*Anabaena flos-aquae*, FACHB-245)^[26]和鱼害微囊藻(*Microcystis ichthyoblabe*, FACHB-1294). 绿藻 3 种,羊角月牙藻(*Selenastrum capricornutum*, FACHB-271)、蛋白核小球藻(*Chlorella pyrenoidosa*, FACHB-9)和斜生栅藻(*Scenedesmus obliquus*, FACHB-416). 藻种由中国科学院武汉水生生物研究所提供,用 BG-11 培养基^[27]于光照培养箱中培养. 培养条件为:光强 $40 \mu\text{E} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$,温度 25°C ,光暗比 12 h:12 h,每天定时摇晃 3 次.

1.3 实验方法

每种藻处理都设置 1 个对照组和 6 个质量浓度梯度组(0.5 、 1.0 、 2.0 、 4.0 、 8.0 、 $10.0 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$),在 100 mL 锥形瓶内加入 35 mL BG11 培养基,高温灭菌后接种处于对数生长期的藻,抑藻实验体系均用灭菌去离子水定容到 50 mL,对照不加浸泡液,每个浓度梯度 3 个平行样,设置 5 个空白对照,培养 3 d 后加入不同浓度的稻秆浸泡液,于实验第 7 d 取样,过 300 目滤膜后,立即使用流式细胞仪(Becton Dickinson)和显微镜(Zeiss, Germany)进行测定和观察.

1.4 仪器分析

应用 FACS Vantage SE 流式细胞仪进行样品的测定,激光器为 Coherent 水冷氩离子激光器,激发的波长为 488 nm. 在 FL3 处收集叶绿素荧光,荧光检测波长为 655~695 nm. 藻细胞体积大小和叶绿素荧光强度分别以前向光散射(FSC)和 FL3 表征. 每个样品所检测的细胞数为 10 000 个,检测到的数据在计算机上用软件 WinMDI 进行分析处理. 并通过显微镜(Zeiss, Germany)对藻类细胞生长、群体形成进行了观察,当观察到群体形成时,每个群体包含的细胞数目多少的计算参照文献^[28].

1.5 统计分析

根据藻密度计算 7 种藻的抑制率,计算公式为:

$$\text{抑制率}(\%) = (1 - N/N_0) \times 100$$

式中, N 为处理组的藻密度, N_0 为对照组的藻密度.

FSC 和叶绿素荧光强度表示为占对照组的百分数,计算公式为:

$$\text{占对照组百分比}(\%) = F_c/F_l \times 100$$

式中, F_c 为对照组的荧光强度平均值, F_l 是稻秆浸泡液处理组的荧光强度平均值. 每组 3 个平行, 数据以平均值 $\pm$ 标准方差表达, 用 SPSS 16.0 软件包进行统计分析, 组间差异利用 one-way analysis of variance (ANOVA) 分析, $P < 0.05$ 表示显著性差异.

2 结果与分析

2.1 RSE 对 7 种淡水藻生长的影响

经过 RSE 高浓度 $10.0 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 处理后, 蛋白核小球藻、羊角月牙藻和斜生栅藻的藻液颜色加深, 镜检结果显示视野中的藻个数显著增加(图 1), 铜绿微囊藻、鱼害微囊藻、水华鱼腥藻的藻液明显变澄清, 表明蓝藻的生长可能被抑制了(图 2). 这一实验结果在图 3 中得到证实.

RSE 对 3 种绿藻(蛋白核小球藻、羊角月牙藻和

斜生栅藻)和 4 种蓝藻(2 种铜绿微囊藻、鱼害微囊藻、水华鱼腥藻)的生长有促进和抑制两种作用(图 3). 低浓度时($0.5 \sim 4.0 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$) RSE 对 3 种绿藻生长的影响具有特异性, 但是高浓度($8.0 \sim 10.0 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$)的 RSE 显著促进了 3 种绿藻的生长[图 3(a)]. $0.5 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, RSE 促进了蛋白核小球藻和斜生栅藻的生长, 轻度抑制了羊角月牙藻的生长; $1.0 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 蛋白核小球藻的生长被 RSE 促进了 25%, RSE 对羊角月牙藻的抑制率为 7.9%, RSE 对斜生栅藻的生长影响不明显[图 3(a)]. $2.0 \sim 10.0 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 蛋白核小球藻和斜生栅藻的生长随着 RSE 浓度升高, 被促进的作用持续增强, RSE 对斜生栅藻的促进作用强于蛋白核小球藻; 2.0 和 $4.0 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 RSE 对羊角月牙藻的抑制率分别为 15.2% 和 8.0% [图 3(a)], 8.0 和 $10.0 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 RSE 显著促进了羊角月牙藻的生长, 但促进的程度低于另外 2 种绿藻, $10.0 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 与对照组相比, 斜生栅藻、蛋白核小球藻和羊角月牙藻的生长分别被促进了 895%、226% 和 41%.

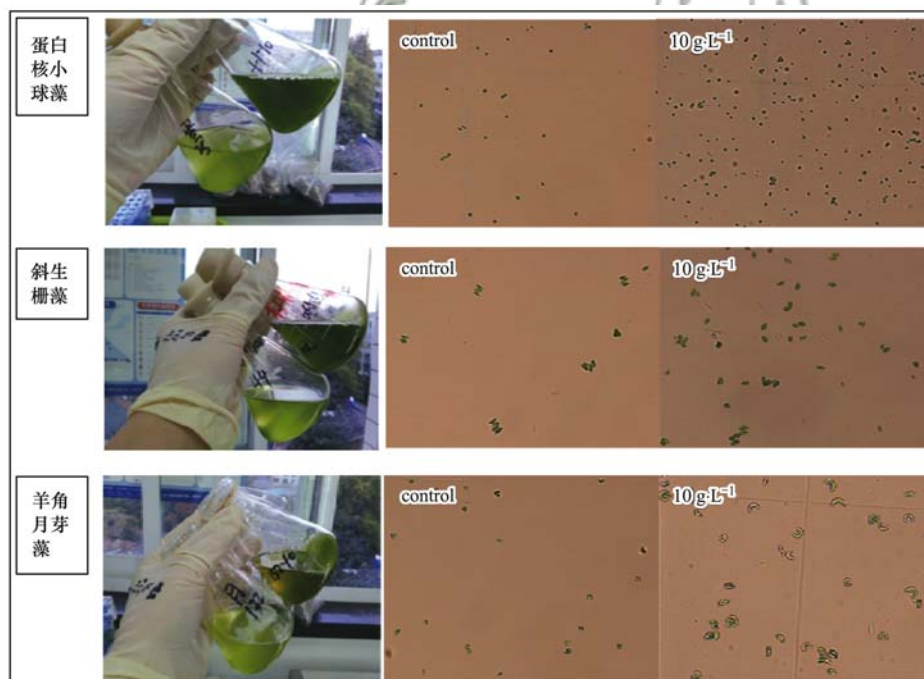


图 1 暴露于 $10.0 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 稻秆浸泡液 7 d 后对 3 种绿藻生长的影响

Fig. 1 Effect on growth of three green algae cells after a 7-d RSE exposure at $10.0 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$

RSE 显著抑制了 4 种蓝藻的生长[图 3(b)], 其发挥抑藻效果的最低有效浓度为 $2.0 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$. $0.5 \sim 2.0 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 RSE 显著促进了鱼害微囊藻和非产毒铜绿微囊藻的生长[范围为 6% ~ 26%, 图 3(b)]; $2.0 \sim 10.0 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 RSE 显著抑制了 4 种蓝藻的生长[范围为 5% ~ 98%, 图 3(b)], 并且抑制效果随暴露浓度增加而增强.

2.2 RSE 对 7 种藻的细胞大小和叶绿素荧光强度的影响

RSE 显著影响了 7 种淡水藻的细胞大小和叶绿素荧光强度(图 4). 对斜生栅藻和蛋白核小球藻来说, 影响其细胞大小[图 4(a)]和叶绿素荧光强度[图 4(b)]的最低有效浸泡液的浓度为 $4.0 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$. 当 RSE 不低于 $4.0 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 与对照组相比, RSE 处

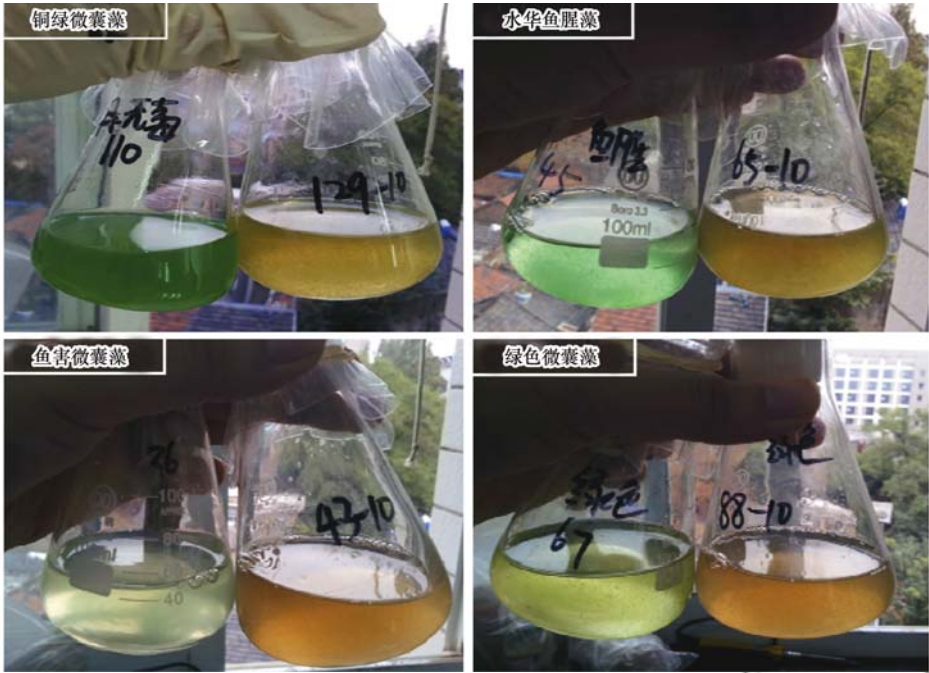
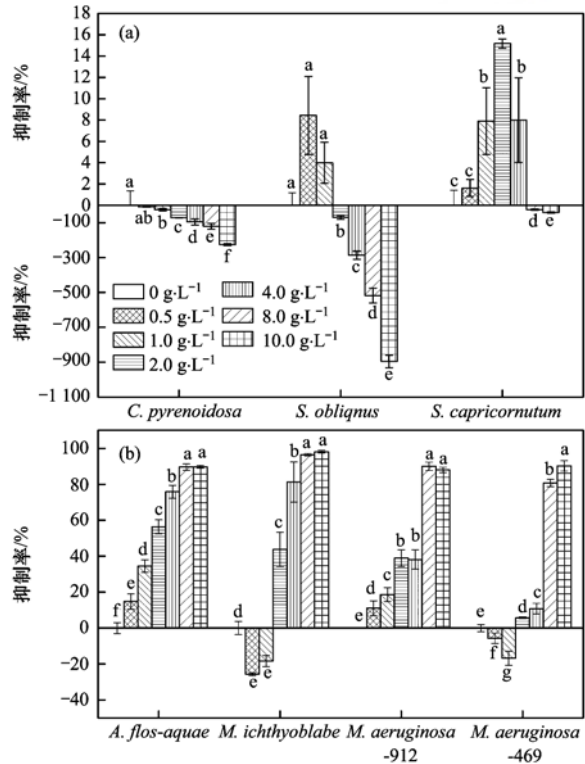


图 2 暴露于 $10.0 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 稻秆浸泡液 7 d 后对 4 种蓝藻生长的抑制作用

Fig. 2 Inhibition effect on growth of four blue algae cells after a 7-d RSE exposure at $10.0 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$



不同的字母表示两者存在显著差异, $P < 0.05$

图 3 不同浓度稻秆浸泡液对 7 种藻生长的影响

Fig. 3 Effect of RSE on the growth of seven freshwater algae at different extract concentrations

理后蛋白核小球藻的细胞大小 (ANOVA, $P < 0.05$) 和叶绿素荧光强度 (ANOVA, $P < 0.05$) 明显变大; 斜生栅藻细胞明显变大 (ANOVA, $P < 0.05$) 但是叶绿

素荧光强度却明显变小 (ANOVA, $P < 0.05$). 对羊角月牙藻来说 [图 4(a) 和 4(b)], 与对照组相比, 只有当 RSE 范围为 $1.0 \sim 4.0 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 时显著抑制了叶绿素荧光强度 (ANOVA, $P < 0.05$), 但是细胞大小没有发生明显变化.

图 4(c) 和图 4(d) 显示 RSE 显著影响了蓝藻的细胞大小和叶绿素荧光强度, 且对不同蓝藻的细胞大小和叶绿素荧光强度的影响存在很大差异. RSE 处理后, 与对照组相比, 产毒铜绿微囊藻细胞随着暴露浓度增加而增大 (ANOVA, $P < 0.05$), 非产毒的铜绿微囊藻细胞的大小在低浓度下 ($< 4.0 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$) 减小, 高浓度下比对照组显著增大 ($> 4.0 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$, $P < 0.05$), $10.0 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 时产毒铜绿微囊藻细胞增大的数量是非产毒铜绿微囊藻的 4 倍; $2.0 \sim 10.0 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 时鱼害微囊藻和水华鱼腥藻的细胞大小显著下降, $10.0 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 时鱼害微囊藻细胞大小的抑制程度是水华鱼腥藻的 6 倍. RSE 为 $0.5 \sim 1.0 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 与对照组相比, 水华鱼腥藻和 2 种铜绿微囊藻的叶绿素荧光强度被显著抑制了 (ANOVA, $P < 0.05$), 鱼害微囊藻的叶绿素荧光强度分别被促进了 27% (ANOVA, $P < 0.05$) 和 7% (ANOVA, $P > 0.05$). RSE 为 $2.0 \sim 10.0 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 图 5 显示蓝藻的荧光强度可以分为两部分: 正常荧光强度区域和被抑制的荧光强度的区域. 稻秆浸泡液对铜绿微囊藻 (*M. aeruginosa*-469, *M. aeruginosa*-912)、鱼害微囊藻和

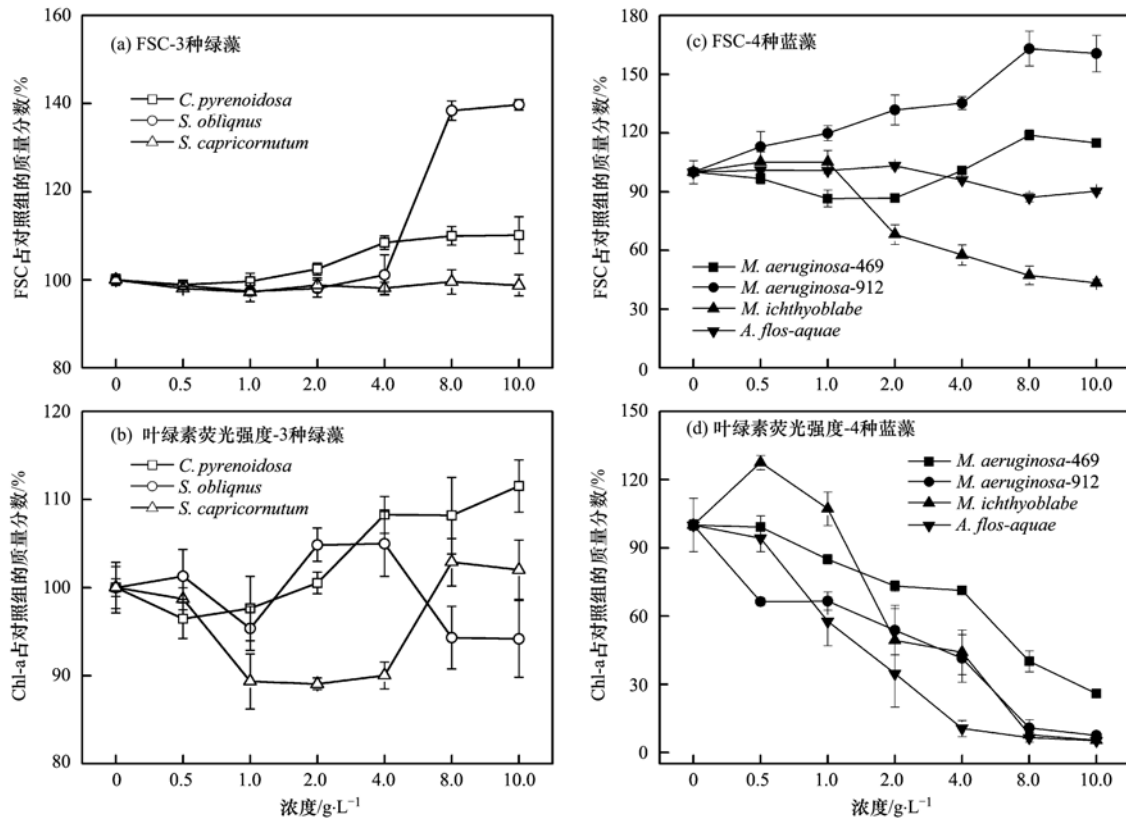


图4 FSC、叶绿素荧光强度暴露于稻秆浸泡液7 d 后的变化
Fig. 4 Variations in FSC and *in vivo* chlorophyll-*a* fluorescence after a 7-d RSE exposure

水华鱼腥藻荧光强度均值的抑制率由浸泡液浓度为 $2.0 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 时的 27%、46%、51%、65% 升为 $10.0 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 时的 74%、93%、95% 和 95% [图 4(d)], 这可能是因为荧光强度正常区域的细胞大多迁移至荧光强度被抑制的区域造成的(图 5)。

3 讨论

3.1 对比 RSE 对 7 种淡水藻生长的影响作用

表 1 列出了 RSE 处理后 7 种淡水藻的 7 d EC_{50} 值, 表明 7 种藻对水稻秸秆的敏感性由大到小顺序为产毒水华鱼腥藻 > 鱼害微囊藻 > 产毒铜绿微囊藻 > 不产毒铜绿微囊藻 > 羊角月牙藻、蛋白核小球藻、斜生栅藻。RSE 对 7 种淡水藻生长的影响包括促进和抑制作用, 以前已有研究报道水生和陆生植物对藻生长的抑制或促进作用与其浓度有关^[9,13,15,29]。本文发现浸泡液低浓度时 ($0.5 \sim 1.0 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$), 鱼害微囊藻和非产毒铜绿微囊藻的生长被促进了, 但是当浸泡液浓度提高 ($2.0 \sim 10.0 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$) 后, 水稻秸秆抑制了两种藻的生长(图 3)。稻秆对藻生长的促进作用可能是由于稻秆释放的一些未知的有机态营养成分或化合物^[15], 抑制作用可能是水稻秸秆释放了一些化感组分, 目前酚类化合物一直

被认为是稻秆释放的具有化感作用或植物性毒素的化合物^[19]。除此之外, 很多生物材料(大麦秆、芦苇、玉竹、水稻秸秆、橡树、稻壳)在大量室内和野外实验中被报告具有特异性抑制多种淡水藻尤其是蓝藻和绿藻生长的作用, 可以克服控藻不具选择性的缺点^[9,13,15,19,30,31]。虽然很多前人关于植物化感作用控藻生长的报告与本文吻合^[11,15,21,22,32], 但是本文考虑到自然水体多种藻类同时存在的客观情况, 较为系统地研究了 RSE 对多种野外常见藻类生长的影响作用, 可以为水稻秸秆的野外应用提供理论依据。

3.2 群体形成可能是绿藻对 RSE 不敏感的重要原因之一

本文通过对 7 种淡水藻细胞形态和生理指标的分析, 进一步探讨了 RSE 选择性抑制蓝藻和绿藻的机制。图 3(a) 和 4(a) 显示, 蛋白核小球藻和斜生栅藻的细胞生长被促进时, 细胞变大。通过统计镜检结果, 本文认为细胞的变大与群体形成成分不开(图 6), 群体形成是藻细胞对抗不利生物因素和非生物因素的一种策略, 例如捕食, 温度或盐度变化等^[22]。浸泡液高浓度时 ($4.0 \sim 8.0 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$), 蛋白核小球藻和斜生栅藻群体的平均细胞个数分别多于 2 个和

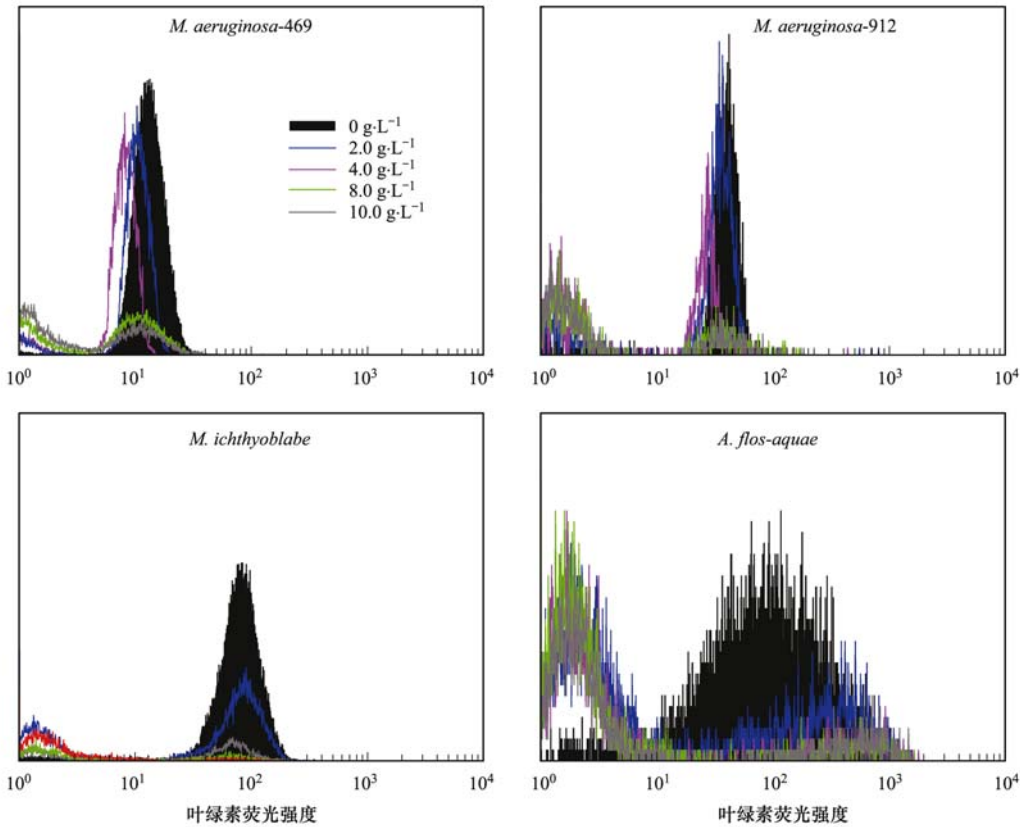


图5 暴露于浓度为2.0~10.0 g·L⁻¹的稻秆浸泡液的铜绿微囊藻(*M. aeruginosa*-469, *M. aeruginosa*-912),鱼害微囊藻(*M. ichthyoblabe*)和水华鱼腥藻(*A. flos-aquae*)叶绿素荧光强度的迁移

Fig. 5 Histogram overlay showing shift in *in vivo* chlorophyll-*a* fluorescence of *M. aeruginosa*-469, *M. aeruginosa*-912, *M. ichthyoblabe* and *A. flos-aquae* exposed to a dose range of 2.0-10.0 g·L⁻¹ of RSE

表1 水稻秸秆对7种淡水藻生长和叶绿素荧光强度的影响¹⁾(以干重计)/g·L⁻¹

Table 1 Effect of RSE on the growth and *in vivo* chlorophyll-*a* fluorescence of selected freshwater algae(DW)/g·L⁻¹

藻种	细胞生长		叶绿素荧光强度	
	抑制效果	7 d EC ₅₀ ²⁾	抑制效果	7 d EC ₅₀
<i>A. flos-aquae</i>	-	1.72	-	1.48
<i>M. ichthyoblabe</i>	+ (<2.0)	2.21	+ (<2.0)	2.64
	-(2.0~10.0)		-(2.0~10.0)	
<i>M. aeruginosa</i> (912)	-	2.95	-	1.66
<i>M. aeruginosa</i> (469)	+ (<2.0)	5.72	-	5.41
	-(2.0~10.0)			
<i>S. capricornutum</i>	-(1.0~4.0)	ND	-(1.0~4.0)	ND
	+(8.0~10.0)		+(8.0~10.0)	
<i>C. pyrenoidosa</i>	+	ND	+	ND
<i>S. obliquus</i>	+	ND	-	ND

1) +:促进作用; -:抑制作用; ND:无法测到;2)表示50%细胞被抑制时需要的稻秆浸泡液的浓度

10个,而对照组的细胞个数分别为1.2和4.3(图6)。Men等^[32]报告由芦苇提取的甲基乙酰乙酸乙酯(ethyl 2-methylacetoacetate)加入斜生栅藻后,细胞个数为2~8个的群体增加了。Park等^[22]同样报告稻壳甲醇提取物使得四尾栅藻(*Scenedesmus quadricauda*)群体增加,而对铜绿微囊藻群体形成没有明显作用。图6中蛋白核小球藻群体的形成可能

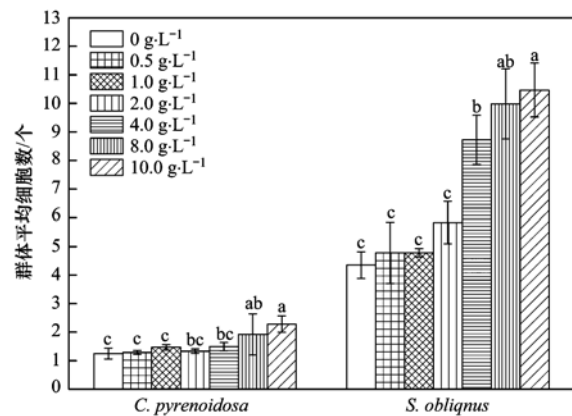
是由于水稻秸秆释放的某些化学物质诱发的,类似于浮游动物的捕食作用对其群体形成的诱发^[33,34]。由此看来,群体形成可能是绿藻蛋白核小球藻和斜生栅藻对RSE不敏感的一个重要原因。尽管RSE对蓝藻细胞大小既有使其增大也有使其减小的作用,但是实验过程中并没有观察到明显的群体形成。与对照组相比,水华鱼腥藻和鱼害微囊藻变小,并随

着浸泡液浓度增大变得更小[图 4(c)]. 当面临逆境时,例如黑暗,有报道铜绿微囊藻会通过消耗本身储存的资源,使得细胞变小^[35],化感物质使得细胞变小也已被透射电镜结果证实过^[36]. 观察非产毒铜绿微囊藻细胞大小变化发现,其大小在浸泡液低浓度时[图 4(c)]变小,在高浓度时候细胞变大,说明暴露于浸泡液引起了藻细胞的自我调整^[10]. 细胞增大在产毒铜绿微囊藻的处理组同样可观察到,这也可能是由于细胞渗透性改变引起的^[37]. 还有可能的原因是细胞无法完成正常的分裂或者氧化自由基大量形成造成细胞调整细胞体积功能失效,就像在衣滴虫(*Chlamydomonas eugametos*)中发现的一样^[38].

3.3 光合系统Ⅱ反应中心的敏感性可能是蓝藻被 RSE 强烈抑制的原因

群体形成被认为是一个细胞再生而非细胞聚集的过程,所以这一过程中细胞生长和光合作用都是活跃的^[28]. 叶绿素荧光强度是一个灵敏表征光合作用状态,生理状态或细胞色素浓度大小的指标^[39]. 蛋白核小球藻叶绿素荧光强度的增加可能是光合作用增强的标志,但是相对的,斜生栅藻在浸泡液低于 $8.0 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,荧光强度有少量增加,高浓度 [$8.0 \sim 10.0 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$, 图 4(b)] 时荧光强度反而显著下降. 可能的解释是荧光强度可能被群体形成的遮挡作用被低估,这一现象需要进一步的研究(图 6). 对羊角月牙藻来讲,较长的平稳期和生命周期是它比其它 2 种绿藻对浸泡液更敏感的原因^[32],因此导致月牙藻在浸泡液低浓度时细胞生长被抑制,叶绿素荧光强度下降[图 3(a)和图 4(b)]. 浸泡液浓度高于 $4.0 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,月牙藻生理和形态受 RSE 影响不大,这也许是它生长被促进程度低于蛋白核小球藻和斜生栅藻的一个原因.

不同于绿藻,蓝藻在生长被抑制时,对 RSE 的生理响应方式比较一致[图 3(b)和图 4(d)],都表现出叶绿素荧光强度下降,光合作用被抑制. 大部分叶绿素荧光强度是在光合系统Ⅱ反应中心处于 Q_A 态下测定的^[40],光合强度的下降说明是因为电子传递的供体被阻碍,很多报告说明光合作用被抑制是化感作用抑藻的机制之一^[10,41]. 对比 4 种蓝藻生长和叶绿素荧光强度对浸泡液的敏感性可以发现,除了鱼害微囊藻,其它 3 种蓝藻叶绿素荧光度比生长更敏感(表 1),这可能是由于浸泡液低浓度时鱼害微囊藻的叶绿素荧光强度被增强,造成 EC_{50} 变大.



不同的字母表示两者存在显著差异, $P < 0.05$

图 6 水稻浸泡液处理 7 d 后蛋白核小球藻(*C. pyrenoidosa*)和斜生栅藻(*S. obliquus*)形成的群体细胞平均个数

Fig. 6 Mean number of cells per colony of *C. pyrenoidosa* and *S. obliquus* populations grown for 7d in the presence of RSE at different concentrations

4 结论

(1) 水稻秸秆对 4 种蓝藻(有毒和无毒铜绿微囊藻、有毒水华鱼腥藻、鱼害微囊藻)和 3 种常见绿藻(羊角月牙藻、蛋白核小球藻和斜生栅藻)生长的抑制作用具有选择性,不同淡水藻对水稻秸秆敏感性不同,敏感性大小为:产毒蓝藻 > 非产毒蓝藻 > 绿藻.

(2) 水稻秸秆处理后,绿藻细胞变大,并观察到群体形成,蓝藻细胞大小也有变化,但是没有群体形成,推断群体的形成可能是绿藻生长对水稻秸秆不敏感的一个重要原因.

(3) 水稻秸秆引起蓝藻的叶绿素荧光强度下降,强烈抑制了 4 种蓝藻的光合作用,然而水稻秸秆对绿藻的光合作用的影响较小,光合系统Ⅱ反应中心的敏感性可能是蓝藻生长被强烈抑制的原因.

致谢:在实验过程中得到了龚伊、阳振、卢亚萍、史小丽、刘凌光、吴松涛、段晓尘、钱梦雨、赵旭辉等人的帮助,并且在论文的书写和修改中得到了姜广甲同学的帮助,在此一并感谢!

参考文献:

- [1] Grover J P, Baker J W, Ureña-Boeck F, et al. Laboratory tests of ammonium and barley straw extract as agents to suppress abundance of the harmful alga *Prymnesium parvum* and its toxicity to fish[J]. Water Research, 2007, 41(12): 2503-2512.
- [2] Nan C R, Zhang H Z, Lin S Z, et al. Allelopathic effects of *Ulva lactuca* on selected species of harmful bloom-forming microalgae in laboratory cultures[J]. Aquatic Botany, 2008, 89(1): 9-15.
- [3] Kodani S, Imoto A, Mitsutani A, et al. Isolation and identification of the antialgal compound, harmaline (1-methyl-β-

- carboline), produced by the algicidal bacterium, *Pseudomonas* sp. K44-1[J]. Journal of Applied Phycology, 2002, **14**(2): 109-114.
- [4] Zhang X, Hu H Y, Men Y J, *et al.* The effect of *Poteroochromonas* abundance on production of intra- and extracellular microcystin-LR concentration[J]. Hydrobiologia, 2010, **652**(1): 237-246.
- [5] Sinclair J L, Hall S, Berkman J A, *et al.* Occurrence of Cyanobacterial harmful algal blooms workgroup report [J]. Advances in Experimental Medicine and Biology, 2008, **619**: 45-103.
- [6] Choi H J, Kim B H, Kim J D, *et al.* *Streptomyces neyagawaensis* as a control for the hazardous biomass of *Microcystis aeruginosa* (Cyanobacteria) in eutrophic freshwaters [J]. Biological Control, 2005, **33**(3): 335-343.
- [7] Yang Z, Kong F X, Cao H S, *et al.* Observation on colony formation of *Microcystis aeruginosa* induced by filtered lake water under laboratory conditions [J]. Annales de Limnologie-International Journal of Limnology, 2005, **41**(3): 169-173.
- [8] Paerl H W, Valdes L M, Piehler M F, *et al.* Assessing the effects of nutrient management in an estuary experiencing climatic change: the Neuse River Estuary, North Carolina [J]. Environmental Management, 2006, **37**(3): 422-436.
- [9] Park M H, Chung I M, Ahmad A, *et al.* Growth inhibition of unicellular and colonial *Microcystis* strains (Cyanophyceae) by compounds isolated from rice (*Oryza sativa*) hulls[J]. Aquatic Botany, 2009, **90**(4): 309-314.
- [10] Xiao X, Chen Y X, Liang X Q, *et al.* Effects of Tibetan hullless barley on bloom-forming cyanobacterium (*Microcystis aeruginosa*) measured by different physiological and morphologic parameters [J]. Chemosphere, 2010, **81**(9): 1118-1123.
- [11] Terlizzi D E, Ferrier M D, Ambrester E A, *et al.* Inhibition of dinoflagellate growth by extracts of barley straw (*Hordeum vulgare*) [J]. Journal of Applied Phycology, 2002, **14**(4): 275-280.
- [12] Kim J S, Kim J C, Lee S, *et al.* Biological activity of L-2-azetidinecarboxylic acid, isolated from *Polygonatum odoratum* var. *pluriflorum*, against several algae [J]. Aquatic Botany, 2006, **85**(1): 1-6.
- [13] Park M H, Hwang S J, Ahn C Y, *et al.* Screening of seventeen oak extracts for the growth inhibition of the cyanobacterium *Microcystis aeruginosa* Kütz em. Elenkin [J]. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology, 2006, **77**(1): 9-14.
- [14] Welch I M, Barrett P R F, Gibson M T, *et al.* Barley straw as an inhibitor of algal growth I: studies in the chesterfield canal [J]. Journal of Applied Phycology, 1990, **2**(3): 231-239.
- [15] Martin D, Ridge I. The relative sensitivity of algae to decomposing barley straw [J]. Journal of Applied Phycology, 1999, **11**(3): 285-291.
- [16] Ferrier M D, Butler B R Sr, Terlizzi D E, *et al.* The effects of barley straw (*Hordeum vulgare*) on the growth of freshwater algae [J]. Bioresource Technology, 2005, **96**(16): 1788-1795.
- [17] Ball A S, Williams M, Vincent D, *et al.* Algal growth control by a barley straw extract [J]. Bioresource Technology, 2001, **77**(2): 177-181.
- [18] Gibson M T, Welch I M, Barrett P R F, *et al.* Barley straw as an inhibitor of algal growth II: laboratory studies [J]. Journal of Applied Phycology, 1990, **2**(3): 241-248.
- [19] Park M H, Han M S, Ahn C Y, *et al.* Growth inhibition of bloom-forming cyanobacterium *Microcystis aeruginosa* by rice straw extract [J]. Letters in Applied Microbiology, 2006, **43**(3): 307-312.
- [20] 苏文, 孔繁翔, 于洋, 等. 水稻秸秆浸泡液对铜绿微囊藻生理特性的影响[J]. 环境科学, 2013, **34**(1): 150-155.
- Su W, Kong F X, Yu Y, *et al.* Effects of the rice straw on *Microcystis aeruginosa* analyzed by different physiological parameters [J]. Environmental Science, 2013, **34**(1): 150-155.
- [21] Brownlee E F, Sellner S G, Sellner K G. Effects of barley straw (*Hordeum vulgare*) on freshwater and brackish phytoplankton and cyanobacteria [J]. Journal of Applied Phycology, 2003, **15**(6): 525-531.
- [22] Park M H, Kim B H, Chung I M, *et al.* Selective bactericidal potential of rice (*Oryza sativa* L. var. japonica) hull extract on *Microcystis* Strains in comparison with green algae and zooplankton [J]. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology, 2009, **83**(1): 97-101.
- [23] Stauber J L, Franklin N M, Adams M S. Applications of flow cytometry to ecotoxicity testing using microalgae [J]. Trends in Biotechnology, 2002, **20**(4): 141-143.
- [24] Rioboo C, O'Connor J E, Prado R, *et al.* Cell proliferation alterations in *Chlorella* cells under stress conditions [J]. Aquatic Toxicology, 2009, **94**(3): 229-237.
- [25] Ou H, Gao N Y, Deng Y, *et al.* Immediate and long-term impacts of UV-C irradiation on photosynthetic capacity, survival and microcystin-LR release risk of *Microcystis aeruginosa* [J]. Water Research, 2012, **46**(4): 1241-1250.
- [26] 吕赞, 王应军, 冷雪, 等. 稀土钨对水华鱼腥藻生理特性及藻毒素释放的影响 [J]. 农业环境科学学报, 2012, **31**(9): 1677-1683.
- Lü Y, Wang Y J, Leng X, *et al.* Effects of cerium on physiological characteristics and microcystins release of *Anabaena flos-aquae* [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2012, **31**(9): 1677-1683.
- [27] Rippka R, Deruelles J, Waterbury J B, *et al.* Generic assignments, strain histories and properties of pure cultures of cyanobacteria [J]. Microbiology, 1979, **111**(1): 1-61.
- [28] Lürding M. Metribuzin impairs the unicell-colony transformation in the green alga *Scenedesmus obliquus* [J]. Chemosphere, 2011, **82**(3): 411-417.
- [29] Choe S, Jung I. Growth inhibition of freshwater algae by ester compounds released from rotted plants [J]. Journal of Industrial and Engineering Chemistry, 2002, **8**(4): 297-304.
- [30] Li F M, Hu H Y. Isolation and characterization of a novel antifungal allelochemical from *Phragmites communis* [J]. Applied and Environmental Microbiology, 2005, **71**(11): 6545-6553.
- [31] Alamsjah M A, Hirao S, Ishibashi F, *et al.* Isolation and structure determination of algicidal compounds from *Ulva fasciata* [J]. Bioscience, Biotechnology, and Biochemistry, 2005, **69**(11): 2186-2192.
- [32] Men Y J, Hu H Y, Li F M. Effects of the novel allelochemical ethyl 2-methylacetoacetate from the reed (*Phragmites australis* Trin) on the growth of several common species of green algae

- [J]. Journal of Applied Phycology, 2007, **19**(5): 521-527.
- [33] DeLorenzo M E, Leatherbury M, Weiner J A, *et al.* Physiological factors contributing to the species-specific sensitivity of four estuarine microalgal species exposed to the herbicide atrazine[J]. Aquatic Ecosystem Health & Management, 2004, **7**(1): 137-146.
- [34] Boraas M E, Seale D B, Boxhorn J E. Phagotrophy by a flagellate selects for colonial prey: a possible origin of multicellularity[J]. Evolutionary Ecology, 1998, **12**(2): 153-164.
- [35] Zhang M, Kong F X, Shi X L, *et al.* Differences in responses to darkness between *Microcystis aeruginosa* and *Chlorella pyrenoidosa*[J]. Journal of Freshwater Ecology, 2007, **22**(1): 93-99.
- [36] Hong Y, Hu H Y, Li F M. Growth and physiological responses of freshwater green alga *Selenastrum capricornutum* to allelochemical ethyl 2-methyl acetoacetate(EMA) under different initial algal densities[J]. Pesticide Biochemistry and Physiology, 2008, **90**(3): 203-212.
- [37] Franklin N M, Adams M S, Stauber J L, *et al.* Development of an improved rapid enzyme inhibition bioassay with marine and freshwater microalgae using flow cytometry [J]. Archives of Environmental Contamination and Toxicology, 2001, **40**(4): 469-480.
- [38] Franqueira D, Orosa M, Torres E, *et al.* Potential use of flow cytometry in toxicity studies with microalgae[J]. Science of the Total Environment, 2000, **247**(2-3): 119-126.
- [39] Yu Y, Kong F X, Wang M L, *et al.* Determination of short-term copper toxicity in a multispecies microalgal population using flow cytometry[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2007, **66**(1): 49-56.
- [40] Suggett D J, Borowitzka M A, Prášil O. Chlorophyll a fluorescence in aquatic sciences: methods and applications[M]. Netherlands: Springer, 2010. 33-35.
- [41] Prince E K, Myers T L, Kubanek J. Effects of harmful algal blooms on competitors: allelopathic mechanisms of the red tide dinoflagellate *Karenia brevis*[J]. Limnology and Oceanography, 2008, **53**(2): 531-541.



CONTENTS

Marine Aerosol Using On-board Aerosol Mass Spectrometry	YAN Jin-pei, CHEN Li-qi, LIN Qi, <i>et al.</i> (2629)
Analysis of Spatio-temporal Distribution and Variation Characteristics of Aerosol Optical Depth over the Northwest of China by MODIS C6 Product	ZHAO Shi-wei, GAO Xiao-qing (2637)
Sources and Characteristics of Regional Background PM ₁ in North China During the Autumn and Winter Polluted Period ...	ZHANG Zhou-xiang, ZHANG Yang-mei, ZHANG Xiao-ye, <i>et al.</i> (2647)
Pollution Characteristics and Light Extinction Contribution of Water-soluble Ions of PM _{2.5} in Hangzhou	WU Dan, LIN Shao-long, YANG Huan-qiang, <i>et al.</i> (2656)
Formation and Size Distribution of the Secondary Aerosol Inorganic Ions in Different Intensity of Haze in Qingdao, China	XIE Dan-dan, QI Jian-hua, ZHANG Rui-feng (2667)
Comparison of Characteristics and Reactive Oxidative Species of PM _{2.5} in Xi'an, China During Haze and Clean Days	WANG Kun, HAN Yong-ming, Ho Steven Sai Hang, <i>et al.</i> (2679)
Seasonal Variation and Sources of Dicarboxylic Acids and Related Compounds in PM ₁₀ from Mt. Huangshan	MENG Jing-jing, HOU Zhan-fang, ZHANG Er-xun, <i>et al.</i> (2688)
Composition Characteristics and Sources Apportionment of Lanthanoid in PM _{2.5} of Quanzhou	ZHANG Yun-feng, YU Rui-lian, HU Gong-ren, <i>et al.</i> (2698)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Hazardous Air Pollutants in the Surroundings of Three Petrochemical Industries in Northwest China	XU Ya-xuan, LI Xiao-min, YU Hua-tong, <i>et al.</i> (2707)
VOCs Characteristics and Sources Apportionment in Yixing City During the G20 Summit	ZHANG Lin, ZHANG Xiang-zhi, QIN Wei, <i>et al.</i> (2718)
Agricultural Ammonia Emission Inventory and Its Spatial Distribution in Sichuan Province from 2005 to 2014	FENG Xiao-qiong, CHEN Jun-hui, JIANG Tao, <i>et al.</i> (2728)
Air Pollutant Emission Inventory of Non-road Machineries in Typical Cities in Eastern China	LU Jun, HUANG Cheng, HU Qing-yao, <i>et al.</i> (2738)
Estimation of Health Risk and Enaction of Safety Standards of <i>N</i> -nitrosodimethylamine (NDMA) in Drinking Waters in China	ZHANG Qiu-qiu, PAN Shen-ling, ZHANG Yu, <i>et al.</i> (2747)
Comparison and Analysis of the Quantitative Methods for Pollutant Sources Load in Groundwater Contamination Risk Assessment	ZHAO Peng, HE Jiang-tao, WANG Man-li, <i>et al.</i> (2754)
Distribution and Sources of <i>n</i> -alkanes in Surface Seawater of Jiaozhou Bay	ZHANG Qian, SONG Jin-ming, PENG Quan-cai, <i>et al.</i> (2763)
Spatial Variations of CO ₂ Degassing Across Water-air Interface and Its Impact Factors in Summer in Guijiang River, China	ZHANG Tao, LI Jian-hong, PU Jun-bing, <i>et al.</i> (2773)
Spatial Distribution Characteristics and Potential Ecological Risk of Antimony and Selected Heavy Metals in Sediments of Duliujiang River	NING Zeng-ping, XIAO Qing-xiang, LAN Xiao-long, <i>et al.</i> (2784)
Distribution Characteristics and Potential Risk of Bisphenol Analogues in Surface Water and Sediments of Lake Taihu	CHEN Mei-hong, GUO Min, XU Huai-zhou, <i>et al.</i> (2793)
Characteristics of Water Extractable Organic Nitrogen from Erhai Lake Sediment and Its Differences with Other Sources	LI Wen-zhang, ZHANG Li, WANG Sheng-rui, <i>et al.</i> (2801)
High-resolution Distribution Characteristics of Phosphorous, Iron and Sulfur Across the Sediment-Water Interface of Aha Reservoir ...	SUN Qing-qing, CHEN Jing-an, WANG Jing-fu, <i>et al.</i> (2810)
Distribution Characteristics of Drugs of Abuse and Their Metabolites in Aqueous Environment of Beijing, China	ZHANG Yan, ZHANG Ting-ting, CHEN Wei-ping, <i>et al.</i> (2819)
Impacts of Rainfall Characteristics and Occurrence of Pollutant on Effluent Characteristics of Road Runoff Pollution	CHEN Ying, WANG Zhao, WU Ya-gang, <i>et al.</i> (2828)
Inhibition of Internal Phosphorus Release in the Black-Odor Channel Under Different Adding Methods of CaO ₂	XU Yao, LI Da-peng, HAN Fei-er, <i>et al.</i> (2836)
Transport of Nitrogen and Phosphorus from Sloping Farmland with Thin Purple Soil Overlying Rocks	XIAN Qing-song, TANG Xiang-yu, ZHU Bo (2843)
Purification of Slightly Salt-alkaline Water Bodies by Microorganism Enhanced Combined Floating Bed	CHEN You-yuan, WU Ya-dong, SUN Ping, <i>et al.</i> (2850)
MgO-Biochar for the Adsorption of Phosphate in Water	WANG Bin-bin, LIN Jing-dong, WAN Shun-li, <i>et al.</i> (2859)
Degradation of <i>N</i> -nitrosodimethylamine by Palladium/ Iron Bimetallic Composite Catalytic Fiber	ZHANG Huan, FU Min, WEI Jun-fu, <i>et al.</i> (2868)
Effects of Goethite, Magnetite and Gypsum on the Anaerobic Degradation of 2,4-Dichlorophenol	KONG Dian-chao, ZHOU Yue-fei, CHEN Tian-hu, <i>et al.</i> (2875)
Transformation of Disinfection Byproduct Precursors During the Wastewater Regeneration Processes	HAN Hui-hui, MIAO Heng-feng, ZHANG Ya-jing, <i>et al.</i> (2883)
Treatment of PTA Wastewater by Modified Anode Microbial Fuel Cell	SUN Jing-yun, FAN Meng-jie, CHEN Ying-wen, <i>et al.</i> (2893)
Selective Inhibition of Rice Straw Extract on Growth of Cyanobacteria and Chlorophyta	SU Wen, CHEN Jie, ZHANG Sheng-peng, <i>et al.</i> (2901)
Cultivation of <i>Spirulina platensis</i> in Digested Piggery Wastewater Pretreated by SBR with Operating Conditions Optimization	CAI Xiao-bo, YU Qiang-qiang, LIU Rui, <i>et al.</i> (2910)
Nitrogen Removal Performance of ANAMMOX Process with K ⁺ Addition in Saline Surroundings	WU Guo-dong, YU De-shuang, LI Jin, <i>et al.</i> (2917)
Efficient and Stable Operation of Shortcut Nitrification by Entrapping Ammonia Oxidizing Bacteria	YU Meng-yu, LIU Yi, TIAN Yu-bin, <i>et al.</i> (2925)
Fast Start-up of ANAMMOX and the Spatial Distribution of EPS in ANAMMOX Granules	LI Hui-juan, PENG Dang-cong, CHEN Guo-yan, <i>et al.</i> (2931)
Ammonia Oxidation with Potential Electron Acceptor in ANAMMOX Sludge	LI Xiang, LIN Xing, WANG Fan, <i>et al.</i> (2941)
Ammoniac Waste Gas in-situ Treatment Based on ANAMMOX Process	LIN Xing, WANG Fan, YUAN Yan, <i>et al.</i> (2947)
Extensive Green Roof Substrate Composition Based on Sludge Recycling	SHEN Qing-ran, LI Tian, CAO Yi, <i>et al.</i> (2953)
Short-term Effect of Roxithromycin on Abundance and Diversity of Ammonia-Oxidizing Microorganisms in Activated Sludge	GAO Jing-feng, SUN Li-xin, FAN Xiao-yan, <i>et al.</i> (2961)
Influence of Salinity on Microbial Community in Activated Sludge and Its Application in Simulated Dye Wastewater Treatment	ZHOU Gui-zhong, XU Shuo, YAO Qian, <i>et al.</i> (2972)
Shift of Microbial Communities During the CO ₂ -Brine-Sandstone Interaction Process	WANG Bo-qiang, LI Chen-yang, LU Wei, <i>et al.</i> (2978)
Response of Soil Respiration and Heterotrophic Respiration to Returning of Straw and Biochar in Rape-Maize Rotation Systems	TIAN Dong, GAO Ming, HUANG Rong, <i>et al.</i> (2988)
Effect of Simulated Climate Warming on Microbial Community and Phosphorus Forms in Wetland Soils	TENG Chang-yun, SHEN Jian-guo, WANG Zhong, <i>et al.</i> (3000)
Patterns of Bacterial Community Through Soil Depth Profiles and Its Influencing Factors Under <i>Betula albosinensis</i> Burkill in the Xinjiashan Forest Region of Qinling Mountains	DU Can, XU Chen-yang, WANG Qiang, <i>et al.</i> (3010)
Effects of Microbial Activities on Mercury Methylation in Farmland near Mercury Mining Area	JIA Qin, ZHU Xue-mei, WANG Qi, <i>et al.</i> (3020)
Effect of Sepiolite Application on the Migration and Redistribution of Pb and Cd in Soil Rice System in Soil with Pb and Cd Combined Contamination	FANG Zhi-ping, LIAO Min, ZHANG Nan, <i>et al.</i> (3028)
Application of Amphoteric-Cationic Combined Modification on Phenol Adsorption of Yellow Brown Soil	LIU Wei, MENG Zhao-fu, REN Shuang, <i>et al.</i> (3036)
Bioaccumulation of Heavy Metals in Twigs and Leaves of <i>Abies fabri</i> at Mount Gongga in China; A Comparison Study Between 1999 and 2014	LI Fen, WANG Xun, LUO Ji, <i>et al.</i> (3045)
Subcellular Distribution and Chemical Forms of Heavy Metals in Three Types of Compositae Plants from Lead-Zinc Tailings Area	ZHU Guang-xu, XIAO Hua-yun, GUO Qing-jun, <i>et al.</i> (3054)
Effects of Bentonite Amendment on Detoxification, Heavy Metal Passivation and Estrone Elimination of Sewage Sludge Compost	ZHOU Li-na, CAI Han-zhen, LI Rong-hua, <i>et al.</i> (3061)
Mesophilic and Thermophilic Anaerobic Co-Digestion of Food Waste and Straw	GUO Xiang-lin, ZUO Jian-e, SHI Xu-chuan, <i>et al.</i> (3070)
Basic Features of Combustible Rural Garbage Component and Its Spatial-temporal Difference in China	YAN Zhuo-yi, YUE Bo, GAO Hong, <i>et al.</i> (3078)
Optimization of Promoter and Support for Co-based/zeolites Catalysts in Catalytic Reduction of NO _x by CH ₄	PAN Hua, JIAN Yan-fei, CHEN Ning-na, <i>et al.</i> (3085)