

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第1期

Vol.36 No.1

2015

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

2013年夏季典型光化学污染过程中长三角典型城市O₃来源识别 李浩, 李莉, 黄成, 安静宇, 严茹莎, 黄海英, 王杨君, 卢清, 王倩, 楼晟荣, 王红丽, 周敏, 陶士康, 乔利平, 陈明华(1)

厦门冬春季大气VOCs的污染特征及臭氧生成潜势 徐慧, 张晗, 邢振雨, 邓君俊(11)

近10年海南岛大气NO₂的时空变化及污染物来源解析 符传博, 陈有龙, 丹利, 唐家翔(18)

稻草烟尘中有机碳/元素碳及水溶性离子的组成 洪蕾, 刘刚, 杨孟, 徐慧, 李久海, 陈惠雨, 黄柯, 杨伟宗, 吴丹(25)

气相色谱-脉冲氦离子化检测法(GC-PDHID)分析大气中分子氢(H₂)浓度 栾天, 方双喜, 周凌晔, 王红阳, 张根(34)

小浪底水库影响下的黄河花园口站和小浪底站pCO₂特征及扩散通量 张永领, 杨小林, 张东(40)

夏季中国东海生源有机硫化物的分布及其影响因素研究 李江萍, 张洪海, 杨桂朋(49)

基于Landsat 8影像估算新安江水库总悬浮物浓度 张毅博, 张运林, 查勇, 施坤, 周永强, 王明珠(56)

温瑞塘河流域水体污染时空分异特征及污染源识别 马小雪, 王腊春, 廖玲玲(64)

人类活动影响下水化学特征的影响: 以西江中上游流域为例 于爽, 孙平安, 杜文越, 何师意, 李瑞(72)

太湖梅梁湾不同形态磷周年变化规律及藻类响应研究 汪明, 武晓飞, 李大鹏, 李祥, 黄勇(80)

鄱阳湖沉积物可转化态氮分布特征及其对江湖关系变化的响应 沈洪艳, 张绵绵, 倪兆奎, 王圣瑞(87)

影响浑太河流域大型底栖动物群落结构的环境因子分析 李艳利, 李艳粉, 徐宗学(94)

水华生消过程对巢湖沉积物微生物群落结构的影响 刁晓君, 李一葳, 王曙光(107)

蓝藻水华聚集对水葫芦生理生态的影响 吴婷婷, 刘国锋, 韩士群, 周庆, 唐婉莹(114)

汞在小浪底水库的赋存形态及其时空变化 程柳, 毛宇翔, 麻冰涓, 王梅(121)

三峡库区典型农田小流域土壤汞的空间分布特征 王娅, 赵铮, 木志坚, 王定勇, 余亚伟(130)

三峡库区农林畜复合小流域水体汞的时空变化特征 赵铮, 王娅, 木志坚, 王定勇(136)

环境条件对三峡库区消落带土壤中邻苯二甲酸二丁酯向上覆水静态迁移释放的影响 宋娇艳, 木志坚, 王强, 杨志丹, 王法(143)

三峡库区消落带土壤中溶解性有机质(DOM)吸收及荧光光谱特征 高洁, 江韬, 李璐璐, 陈雪霜, 魏世强, 王定勇, 闫金龙, 赵铮(151)

舟山渔场有色溶解有机物(CDOM)的三维荧光-平行因子分析 周倩倩, 苏荣国, 白莹, 张传松, 石晓勇(163)

太原市小店污灌区地下水中多环芳烃与有机氯农药污染特征及分布规律 李佳乐, 张彩香, 王焰新, 廖小平, 姚林林, 刘敏, 徐亮(172)

厦门杏林湾水系表层沉积物中PAHs分析与风险评估 程启明, 黄青, 廖祯妮, 苏丽, 刘兴强, 唐剑锋(179)

两种不同的地下水污染风险评价体系对比分析: 以北京市平原区为例 王红娜, 何江涛, 马文洁, 许真(186)

大冶湖滨岸带重金属水-土迁移特征与风险评价 张家泉, 李秀, 张全发, 李琼, 肖文胜, 王永奎, 张建春, 盖希光(194)

铁盐絮凝法从阳宗海湖水中除砷研究与现场扩大试验 陈景, 张曙, 杨项军, 黄章杰, 王世雄, 王莞, 韦群燕, 张艮林, 肖军(202)

铋银氧化物混合物高效氧化降解四溴双酚A的研究 陈满堂, 宋洲, 王楠, 丁耀彬, 廖海星, 朱丽华(209)

一种纳米级不定形碳对水中四环素的吸附研究 吴亦潇, 李爱民, 汪的华, 张维昊(215)

磁性壳聚糖衍生物对阴离子染料的吸附行为 张聪璐, 胡筱敏, 赵研, 苏雷(221)

腐殖酸-高岭土复合体形成机制及对三氯乙烯的吸附 朱晓婧, 何江涛, 苏思慧(227)

降温过程对ANAMMOX工艺城市污水处理系统中微生物群落的影响 赵志瑞, 苗志加, 李铎, 崔丙健, 万敬敏, 马斌, 白志辉, 张洪勋(237)

FISH-NanoSIMS技术在环境微生物生态学上的应用研究 陈晨, 柏耀辉, 梁金松, 袁林江(244)

微囊藻毒素-LR对恶臭假单胞菌细胞活性和表面特性的影响 邓庭进, 叶锦韶, 彭辉, 刘芷辰, 刘则华, 尹华, 陈烁娜(252)

微生物除臭剂的筛选、复配及其除臭条件的优化 曾苏, 李南华, 盛洪产, 贺琨, 胡子全(259)

舟山青浜岛水体及海产品中有机氯农药的分布和富集特征 张泽洲, 邢新丽, 顾延生, 桂福坤, 祁士华, 黄焕芳, 瞿程凯, 张莉(266)

四川凉山藏彝青少年头发中多氯联苯污染水平的研究 周莹, 孙一鸣, 金军, 雷建容, 秦贵平, 何雪珠, 林尤静(274)

铜、毒死蜱单一与复合暴露对蚯蚓的毒性作用 徐冬梅, 王彦华, 王楠, 饶桂维(280)

外源硒对黄瓜抗性、镉积累及镉化学形态的影响 熊仕娟, 刘俊, 徐卫红, 谢文文, 陈蓉, 张进忠, 熊治庭, 王正银, 谢德体(286)

厦门市道路灰尘中铂族元素的污染特征 洪振宇, 洪有为, 尹丽倩, 陈进生, 陈衍婷, 徐玲玲(295)

洋河流域不同土地利用类型土壤硒(Se)分布及影响因素 商靖敏, 罗维, 吴光红, 徐兰, 高佳佳, 孔佩儒, 毕翔, 程志刚(301)

不同钝化剂对重金属污染土壤稳定化效应的研究 吴烈善, 曾东梅, 莫小荣, 吕宏虹, 苏翠翠, 孔德超(309)

畜禽粪便有机肥中Cu、Zn在不同农田土壤中的形态归趋和有效性动态变化 商和平, 李洋, 张涛, 苏德纯(314)

华南某市生活垃圾组成特征分析 张海龙, 李祥平, 齐剑英, 陈永亨, 方建德(325)

生物沥浸耦合类Fenton氧化调理城市污泥 刘昌庚, 张盼月, 蒋娇娇, 曾成华, 黄毅, 徐国印(333)

基于平面波导型荧光免疫传感器的双酚A检测适用性研究 徐玮琦, 张永明, 周小红, 施汉昌(338)

一种新型“Turn-on”荧光探针用于硫化氢可视化检测 刘春霞, 马兴, 魏国华, 杜宇国(343)

典型黄土区油松树干液流变化特征分析 张涵丹, 卫伟, 陈利顶, 于洋, 杨磊, 贾福岩(349)

利用巨藻发酵联产氢气与挥发性有机酸的研究 赵晓娟, 范晓蕾, 郭荣波, 薛志欣, 杨智满, 袁宪正, 邱艳玲(357)

人工纳米颗粒在水体中的行为及其对浮游植物的影响 李曼璐, 姜玥璐(365)

《环境科学》征订启事(251) 《环境科学》征稿简则(294) 信息(236,243,273,300)

蓝藻水华聚集对水葫芦生理生态的影响

吴婷婷¹, 刘国锋^{2,3*}, 韩士群², 周庆², 唐婉莹¹

(1. 南京理工大学化工学院, 南京 210094; 2. 江苏省农业科学院资源与环境研究所, 南京 210014; 3. 中国水产科学研究院淡水渔业研究中心, 无锡 214081)

摘要: 蓝藻水华聚集后常会引起水体溶氧(DO)下降、水体环境恶化, 从而对水生植物的生长产生影响. 采用模拟实验, 研究了在不超过 25℃、5 种不同浓度蓝藻聚集后, 对水葫芦生长的影响及其生理响应变化, 以期减轻蓝藻聚集对植物不良影响和提高水体净化效果提供理论依据. 结果表明, 蓝藻聚集浓度低于 60 g·L⁻¹ 的处理中, 随着蓝藻浓度的增加, 水体的 DO、pH 下降, ORP 值降低到 100 mV 左右, TN 降低了 58%~78%、TP 降低了 43%~68%、COD 降低了 59%~73%, 植物叶片可溶性蛋白、可溶性糖、MDA 含量增加; 并且蓝藻浓度越高, MDA 含量越高. 在不同蓝藻浓度处理中, 在低于 60 g·L⁻¹ 的蓝藻聚集下, 水葫芦仍可以生长; 超过 60 g·L⁻¹ 的处理中, DO、ORP 大幅度降低, 水体出现缺氧乃至厌氧状态, 植物叶片中可溶性糖的含量随着实验的进行表现为先增加、后减小的变化趋势, 表明随着蓝藻浓度的增加, 水葫芦对水体中氮磷的吸收能力降低, 蓝藻聚集将对其产生不可逆的胁迫. 各处理中植物的根长、总长、鲜重与实验刚开始相比, 都呈现增加的趋势, 根长增加 0.29~2.44 倍, 总长增加 0.41~0.76 倍, 鲜重增加 0.9~1.43 倍, 并且随蓝藻浓度的增加, 根长、总长增加的幅度减小. 因此在利用漂浮植物水体净化中, 将避免蓝藻的严重聚集, 从而更好地发挥其水体净化功能.

关键词: 蓝藻水华; 漂浮植物; 水葫芦; 营养盐; 植物生理

中图分类号: X524 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)01-0114-07 DOI: 10.13227/j.hjks.2015.01.015

Impacts of Algal Blooms Accumulation on Physiological Ecology of Water Hyacinth

WU Ting-ting¹, LIU Guo-feng^{2,3*}, HAN Shi-qun², ZHOU Qing², TANG Wan-ying¹

(1. College of Chemical Engineering, Nanjing University of Science & Technology, Nanjing 210094, China; 2. Institute of Agricultural Resource and Environment, Jiangsu Academy of Agricultural Science, Nanjing 210014, China; 3. Freshwater Fisheries Research Center, Chinese Academy of Fishery Sciences, Wuxi 214081, China)

Abstract: Blue-green algae bloom will consume plenty of dissolved oxygen in water, which affects the growth of aquatic plants. The effects of water hyacinth growth and physiological response changes under 25℃, 5 different concentrations of cyanobacteria gathered were studied and which would provide a theoretical basis to mitigate adverse impacts and improve water purification effect. The results showed that water quality indexes including dissolved oxygen (DO), pH dropped in algae density below 60 g·L⁻¹, with the increase of algae density. And the level of oxidation-reduction potential dropped to about 100mV. The removal rates of TN, TP and COD were 58% -78%, 43% -68% and 59% -73%, leaf soluble protein, soluble sugar, MDA contents increased, respectively; and the MDA content became higher with the increase of algae density. It indicated that the water hyacinth could adapt to the adversity condition as algae density less than 60 g·L⁻¹. While algae density above 60 g·L⁻¹, water quality indexes significantly decreased, respectively and the water was in hypoxia or anoxia conditions. Plant leaves soluble sugar contents had a change trend of low-high-low. It indicated that the removal rates of TN, TP decreased with the increase of algae density and water hyacinth had irreversible stress. Plant root length, total length, fresh weight in different treatments, increased compared with the beginning of the experiment, the increase of root length, total length and fresh weight were 0.29-2.44 times, 0.41-0.76 times and 0.9-1.43 times. The increase of root length, total length and fresh weight decreased with the increase of algae density. According to the results, the cyanobacteria should avoid of excessive accumulation as using the floating plant to purify the water.

Key words: cyanobacterial blooms; floating plants; water hyacinth; nutrients; plant physiology

由于工农业的快速发展, 城镇人口的增加, 生活污水和工业废水未经充分处理而大量排放, 水体中过量累积氮磷等营养盐而导致水体富营养化^[1]. 湖泊等水体富营养化最显著的外在表现特征之一就是浮游藻类的大量繁殖和蓝绿藻水华频发. 在湖泊等水体中, 受气象条件及湖流等的作用, 蓝藻细胞易聚集在一起, 在湖湾中尤其是水生植物生长区易形成

聚集区, 蓝藻细胞在高温环境中, 水体溶氧耗尽而易出现快速死亡, 导致水体出现缺氧乃至厌氧, 造成水

收稿日期: 2014-05-26; 修订日期: 2014-07-31

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目(41101525); 江苏省自主创新基金项目(CX(12)5057); 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2012ZX07103-005)

作者简介: 吴婷婷(1990~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为湖泊水环境污染及生态治理, E-mail: 18362969910@163.com

* 通讯联系人, E-mail: gfliu@niglas.ac.cn

体出现藻源性“湖泛”现象,对水体及生态环境造成严重的水质污染问题^[2-4]。

在富营养化水体中进行以水生植物控养为主的水体生态修复,是污染水体治理的有效途径之一^[5,6]。水葫芦,又名凤眼莲,因其扩繁快^[7]、生物量大、适应性强^[8-12]等而被广泛用做水环境污染治理的待选植物^[13]。在研发了规模化控养、机械化采收和资源化利用的专用装备后,避免了水葫芦因打捞不及时而可能出现的泛滥和水体二次污染等潜在问题,在太湖、滇池等开展的大面积种养实验取得了较好的水体净化效果^[14,15]。

以太湖、巢湖、滇池等三大湖泊为代表的重要水体中每年都会出现藻华大量聚集现象,藻华生物大量聚集后,对以水体净化为主的水生植物产生何种影响?藻细胞分解后对水体水质、营养盐以及水生植物产生何种影响?目前相关研究尚不多见。因此,针对蓝藻水华大量聚集这一现象,本文主要研究了在 25℃ 下蓝藻不同堆积浓度下与水生植物的相互作用、蓝藻分解过程中其释放的营养盐是否可以作为水生植物利用以及蓝藻在何种堆积程度下会对植物造成不可逆的影响;并重点探讨了其对漂浮植物水葫芦生理生态变化的影响以及水葫芦的生理响应。以期减轻蓝藻聚集对水生植物的影响和提高水体净化效果提供理论支撑。

1 材料与方 法

1.1 材料与装置

实验在江苏省农业科学院室外大棚内进行,实验时间自 2013 年 9 月开始,共持续 22 d。实验装置为 120 个高 30 cm、直径 20 cm 的塑料桶,每个桶内预先放置厚为 5 cm、混合均匀的底泥;每桶装有采自江苏省农科院 2 号塘的水(该池塘上游来水主要为城市生活污水)7.85 L,水深为 25 cm。

水葫芦采自江苏省农科院的种苗基地,实验开始前挑选大小一致、生长健壮、具 5 片叶子的幼苗,按照每桶 5 株放入桶中,待其适应两天后,按设计的浓度加入采自太湖十八湾处堆积的新鲜蓝藻于塑料桶中。

蓝藻添加浓度是根据 2007 年太湖蓝藻暴发、产生“黑水团”时的浓度^[16]。实验设计了 5 种不同的蓝藻添加浓度:1~5 蓝藻添加浓度分别为 0、30、60、90、120 g·L⁻¹,每个处理 3 个重复。

1.2 样品的采集与分析方法

实验开始后,每天用便携式水质测定仪 YSI 测

定水体的基本理化指标,包括水温(WT)、溶氧(DO)、氧化还原电位(ORP)、pH,为了探讨水葫芦根部在厌氧或缺氧状态下的基本理化指标,测定时把探头放在水葫芦的根部,等读数稳定后开始计数。每次采集水样和植物样品,带回实验室测定水样的总氮(TN)、总磷(TP)、COD、叶绿素含量(Chl-a)。植物样品洗净后测量根长、总长、鲜重、根系活力;根据实验过程中植株体的外表变化,抽取实验早中晚期的水葫芦,取顶叶放在液氮中冷冻,测叶片中的可溶性蛋白、可溶性糖、丙二醛的含量。

水体 TN 含量采用碱性过硫酸钾氧化-紫外分光光度法测定^[17];TP 含量采用过硫酸钾消解-钼锑抗比色法测定^[17];COD 的含量采用重铬酸钾法;藻细胞叶绿素的含量采用热乙醇法^[18]。水葫芦的根长、总长和鲜重采用直尺和天平测量。根系活力采用 α -萘胺氧化法,结果用 α -萘胺氧化值表示;叶片可溶性蛋白含量采用考马斯亮蓝 G-250 法测定^[19];丙二醛采用硫代巴比妥酸法^[19];叶片可溶性糖采用蒽酮比色法测定^[19]。

1.3 数据分析

采用 Excel 2007 和 Spss 17.0 统计软件进行数据处理及统计分析,用 one-way ANOVA 检验差异的显著水平(P),设显著水平为 $P < 0.05$,用 Origin 8.5 软件绘图。

2 结果与分析

2.1 蓝藻堆积后水体基本性质的变化

添加不同浓度的蓝藻后,水体 WT、DO、pH、ORP 呈现不同的变化特征(见图 1)。实验第 1 d,加入蓝藻后,水体 DO 快速下降,处理 2 的 DO 由 2.2 mg·L⁻¹ 降到 0.9 mg·L⁻¹,处理 3~5 的 DO 降到 0.1 mg·L⁻¹,都处于缺氧状态,表明蓝藻大量聚集后会很快耗尽水体溶氧含量,这与刘丽贞等^[20]的研究结果一致。

加入蓝藻的处理与对照(处理 1)相比,水体 pH 显著降低,并且随着蓝藻浓度的增加 pH 降低。实验第 1 d,处理 1 的 pH 为 7.2,其他处理的 pH 依次为 7.08、7.06、6.91、6.85。这可能因为在有蓝藻的水体中,溶解氧很低,微生物进行的厌氧发酵会产生大量的有机酸,蓝藻越多,有机酸的量相对越多,pH 越低^[20]。

加入蓝藻的处理与对照(处理 1)相比,水体 ORP 也显著降低。实验第 1 d,处理 1 的 ORP 为 89.8 mV,其他处理的 ORP 依次为 78.3、49.1、

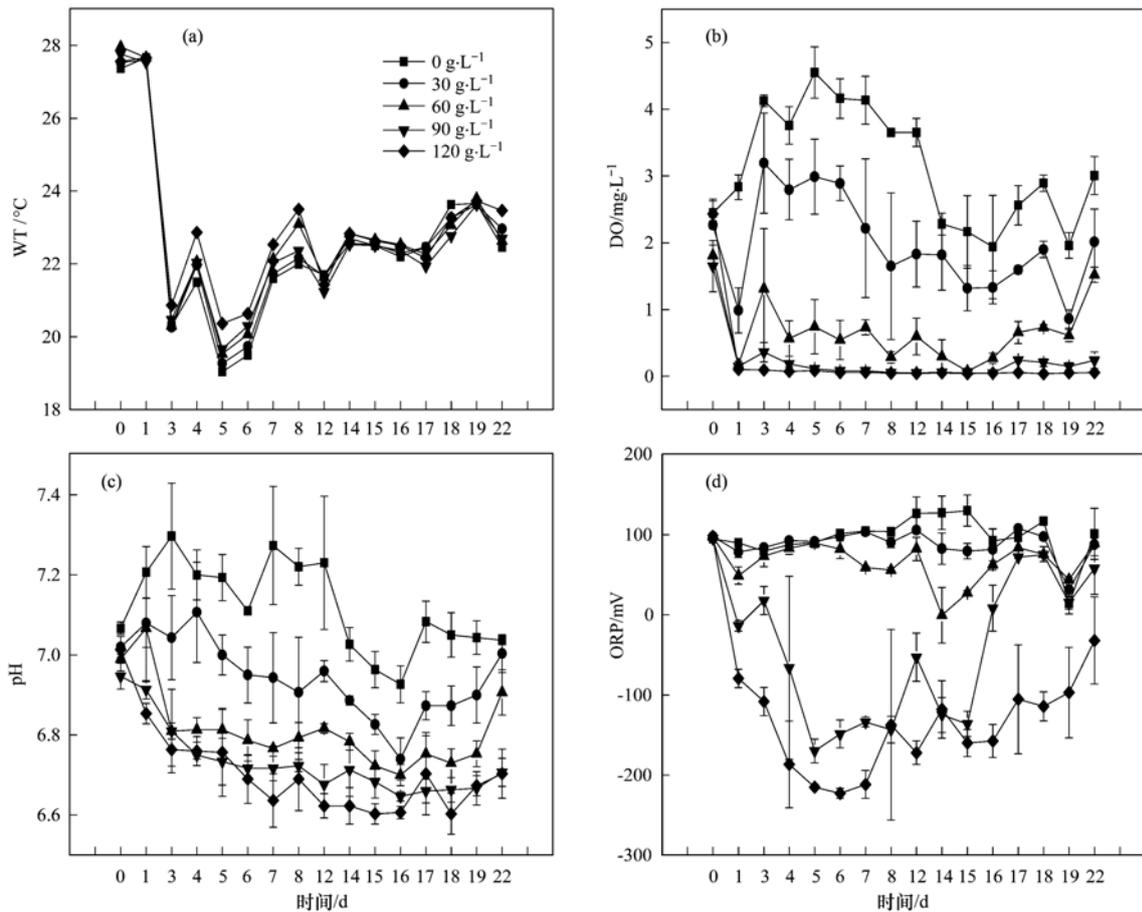


图1 不同蓝藻浓度水体的 WT、DO、pH 及 ORP 的变化

Fig. 1 Changes of WT, DO, pH, ORP in water in different concentrations of cyanobacteria

-13.7、-79.3 mV. 处理1~3的ORP随着实验的进行变化不大. 但处理4与处理5的ORP大幅度波动, 表现为先减小后增加的趋势. 这可能是蓝藻聚集后, 水体DO含量快速下降导致水体缺氧、藻细胞死亡降解产生了大量还原性物质^[20]. 差异性分析显示, 实验前8 d, 处理1~3的ORP, 差异不显著 ($P > 0.05$); 从实验第9~18 d, 差异显著 ($P < 0.05$). 处理3与处理5显著差异 ($P < 0.05$), 说明刚开始低浓度的蓝藻对水体的ORP影响小, 但高浓度的蓝藻聚集后水体很快出现缺氧乃至厌氧状态, 水体的ORP就快速下降并呈现强还原状态.

2.2 蓝藻堆积后水体营养盐的变化

不同浓度蓝藻聚集后, 水体TN、TP、COD、叶绿素的变化情况如图2所示. 加入蓝藻后, 水体TN、TP含量显著增加, 并且蓝藻浓度越高, 水体TN、TP含量越高, 这是因为蓝藻细胞中含有丰富的氮磷营养物质^[21]. 对照(处理1)的TN随着实验的进行呈下降趋势. 这是因为水葫芦通过直接吸收和间接去除作用, 水葫芦对水体氮的去除不仅体现在直接生物吸收上, 而且能加速水体的硝化反硝化脱

氮作用^[22]. 处理2~5的TN总体呈下降趋势, 水体氮素的增减受水葫芦和蓝藻的影响. 蓝藻浓度低于 $60 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 的处理, 水体TN含量波动不大, 但大于 $60 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 的处理, 水体TN含量变化幅度很大.

对照(处理1)的TP浓度在实验结束的时候有所提高. 这与蒋小欣等^[23]的研究结果相符, 也证实低浓度营养盐的上覆水有利于底泥营养盐的释放. 处理2~5的TP变化趋势同TN, 原因也同TN.

加入蓝藻处理的水体COD浓度是对照(处理1)的2.1~60.5倍, 处理1的COD呈下降趋势, 这是因为水葫芦不断的净化水体, 致使水体中有机质等含量不断下降, 与谢心义等^[24]的结果几乎一致. 处理2~4的COD浓度也呈下降趋势. 这可能是因为随着蓝藻的消亡, 向水体中释放有机物, 而水葫芦和水体本身有一定的降解有机物的能力, 当降解速率大于藻细胞分解释放速率时, 有机物减少. 但处理5的COD最终却有所增加, 这可能是由于溶解氧的急剧下降及水体还原性增强, 死亡藻类被快速分解, 之后大量有机物释放到水体中, 降解却受到限制, 释放速率大于降解速率, 因此COD质量浓度有所升高.

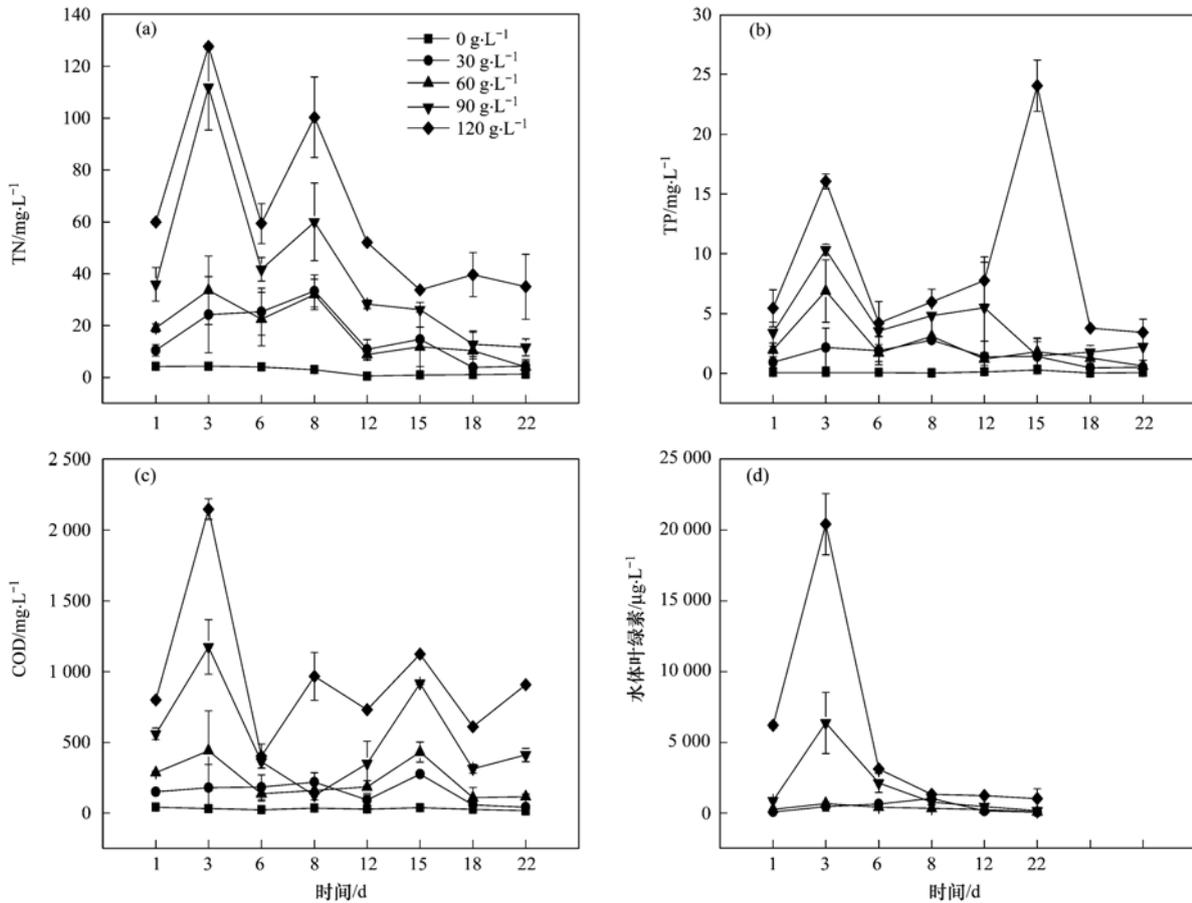


图2 不同蓝藻浓度水体的 TN、TP、COD 及叶绿素含量的变化

Fig. 2 Changes of TN, TP, COD, chlorophyll in water in different concentrations of cyanobacteria

水体叶绿素含量的变化客观上表征了藻类的死亡过程^[21]. 随着实验的进行, 水体叶绿素含量呈下降的趋势, 表观现象为水体变得清澈. 处理 5 的水体叶绿素的含量最高. 这可能是由于高浓度的蓝藻降解缓慢.

2.3 蓝藻堆积对水生植物生理生态变化的影响

2.3.1 叶常规生理指标的变化

图 3 是添加不同质量蓝藻后, 水葫芦生理指标的变化情况. 可溶性蛋白是植物体内重要的渗透调节物, 可以反映外界环境变化时蛋白质方面所作的应答反应. 在逆境条件下, 表现出正常蛋白合成受阻. 前 8 d, 与不加蓝藻的处理 1 相比, 加入蓝藻的处理, 随着蓝藻浓度的增加, 可溶性蛋白增加.

MDA 含量是反映膜质过氧化强弱的重要指标, 其含量可以反映植物遭受逆境伤害的程度^[25]. 细胞内 MDA 含量的增加是膜系统受伤害的标志之一. 每个处理的 MDA 随着实验的进行呈增加的趋势, 并且蓝藻浓度越高, MDA 含量越高.

可溶性糖是主要的渗透调节物质, 它的含量可

以反映植物的生理状况. 在逆境条件下, 植物体内可溶性糖含量均有一定程度的增加, 这是植物为适应环境的一种保护性反应^[26]. 处理 1 的植物叶片可溶性糖含量随着实验进行是增加的, 这可能是由于处理 1 的营养盐含量显著减低. 处理 2、处理 3 的植物叶片中可溶性糖的含量随着实验的进行呈增加的趋势, 处理 4、处理 5 的植物叶片中可溶性糖的含量表现为先增加、后减小的变化趋势.

2.3.2 植物根系活力的变化

根系活力泛指根系整个代谢的强弱, 包括吸收、合成、呼吸作用和氧化力等, 反映了根系生命活动, 根系活力的大小与整个植株生命活动的强度紧密相关. 每个处理其根系活力随着实验的进行呈下降趋势(图 3), 正常的根系功能衰退有利于地上部分生育后期成熟, 是植物整体发育过程中的一种自身调控^[27]. 不加蓝藻的处理 1, 实验刚开始和结束其根系活力高于其他各处理. 各处理的根系活力变化趋势一致, 随着实验的进行, 减小增加再减小. 减小是为了地上部分生育后期成熟, 增加是因为水葫

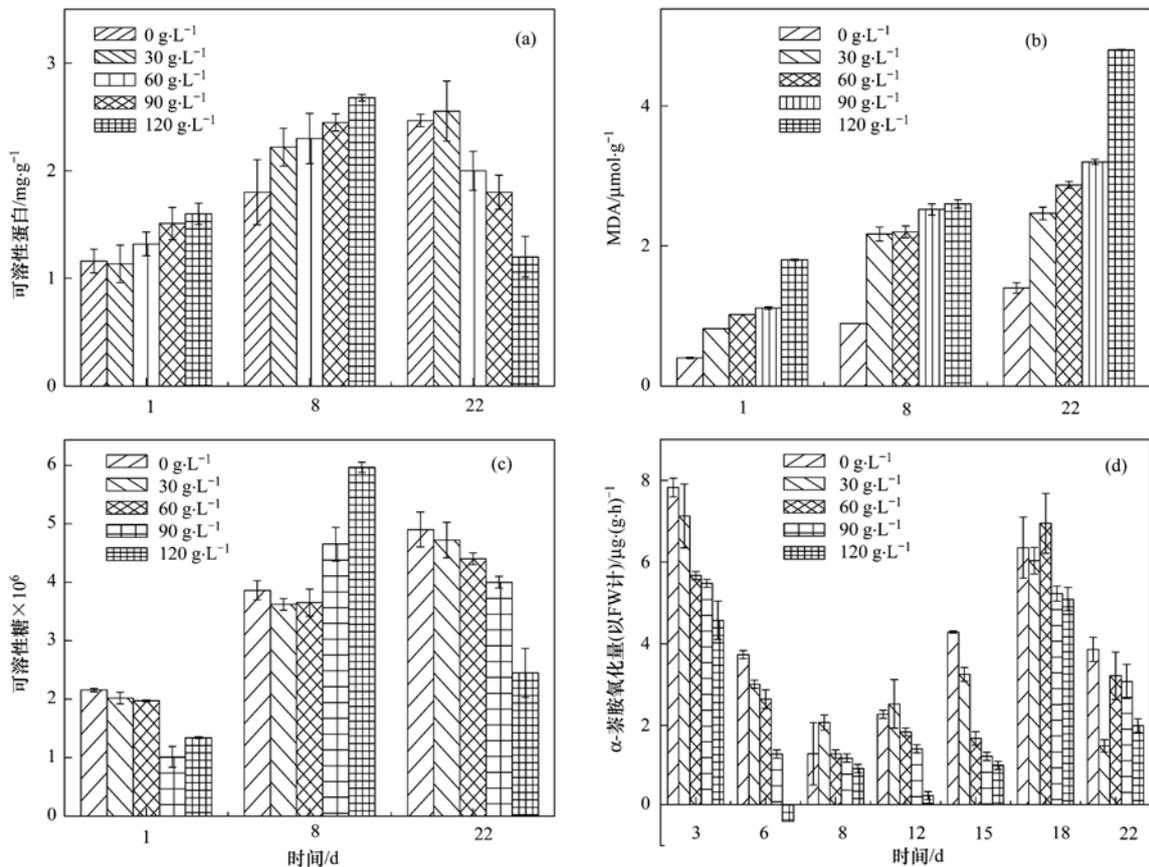


图3 不同蓝藻浓度水葫芦生理指标的变化

Fig. 3 Changes of physiological indexes of water hyacinth in different concentrations of cyanobacteria

芦对蓝藻胁迫有一定的应激能力,水葫芦根系能够保持较高的根系活力,保持较高的吸收与运输功能,再减小是因为随着实验的进行,根系受到损伤,活力下降。

2.3.3 植物生态指标的变化

根长是根系生长发育的重要指标之一,植物根系对于植物获取养分和水分具有重要作用。在本实验的各处理中水葫芦的根长、总长、鲜重与实验开始相比都呈增加的趋势,根长增加0.29~2.44倍,总长增加0.41~0.76倍,鲜重增加0.9~1.43倍,并且随蓝藻浓度的增加,根长、总长增加的幅度减小(图4)。实验结束时,蓝藻浓度越高的水体,其根长越短、总长越短。有研究表明主根和高级侧根的长度在高氮浓度下趋于下降^[28]。

3 讨论

蓝藻堆积后,显著改变了水体的理化性质。水体DO、pH、ORP降低,TN、TP、COD升高。水体处于厌氧、强还原性、高营养盐含量的状态。根据实验结果,发现蓝藻聚集浓度低于 $60\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 的处理中,水体TN含量降低58%~78%、TP降低43%~

68%;超过 $60\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 的处理中,水葫芦对氮、磷营养盐的吸收能力降低。这一现象可能与以下原因有关:第一,蓝藻浓度过度增加,水体营养盐含量升高,由于风眼莲对水中N、P等营养物的净化效率与水中N、P营养的浓度负荷有很大相关性。随着N、P浓度负荷的增加,风眼莲对N、P的去除亦增加,但若N、P浓度负荷太高,超过风眼莲的吸收速度,则净化效率反而下降^[29];第二,蓝藻浓度过度增加,对水葫芦的胁迫增加,根系活力降低(图3),致使其对氮、磷营养盐的吸收效率降低;第三,抑或两者的共同作用。

可溶性蛋白作为植物对极端环境的反应测定指标,在干旱胁迫、盐胁迫、高温、寒冷对植物的影响时,都以可溶性蛋白的含量高低作为指标,并且胁迫诱导植物产生新的蛋白质,是产生抗性基因最直观的鉴定指标。蓝藻胁迫后,叶片可溶性蛋白含量增加,原因可能是蓝藻胁迫或增加了某些抗逆性酶的含量和活性^[30]。

郑世英等^[31]研究发现,在正常条件下,植物能有效清除体内活性氧自由基,使细胞免受伤害,但在逆境条件下,活性氧自由基产生速度超过清除能力,

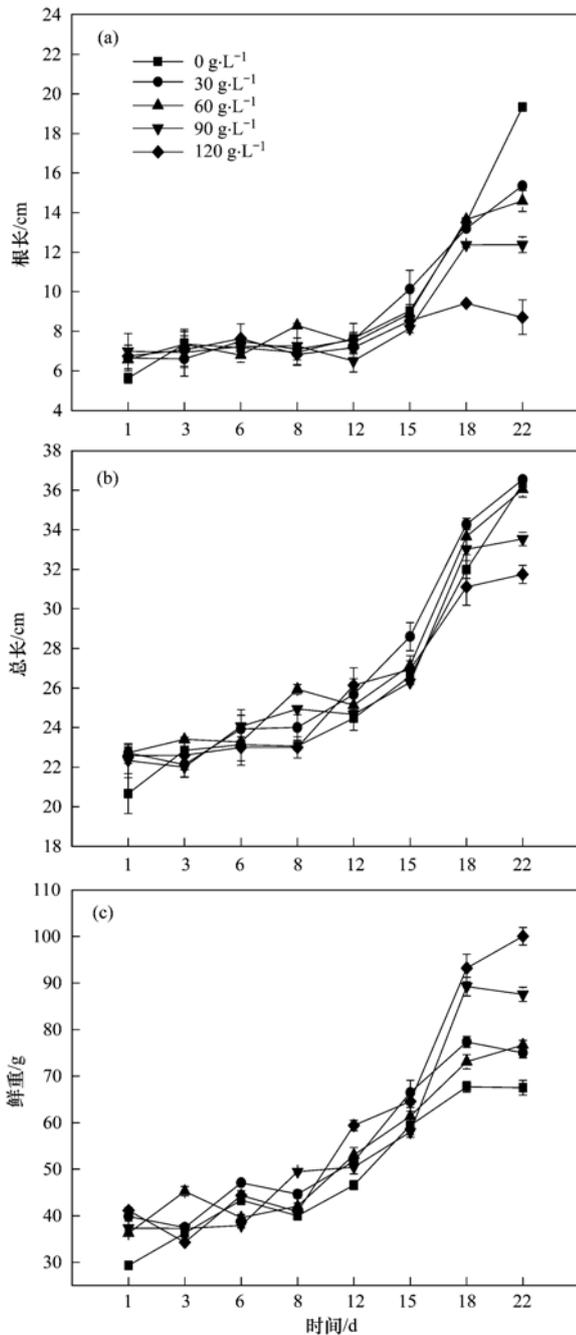


图4 不同蓝藻浓度水葫芦的根长、总长、鲜重的变化

Fig. 4 Changes of water hyacinth root length, total length, fresh weight in different concentrations of cyanobacteria

植物就会受到伤害,产生MDA,且随着环境Cd浓度的提高,MDA含量呈现逐渐上升的趋势.本实验中,蓝藻的聚集对水葫芦叶片的MDA含量产生影响,且蓝藻浓度越高,MDA含量越高.具体而言,水葫芦随着蓝藻胁迫浓度和时间的增加,MDA含量呈现逐渐上升的趋势,说明高浓度的蓝藻处理比低浓度的处理更易使水葫芦受到伤害.原因可能是,随着蓝藻浓度的增加和实验的推进,水葫芦叶片质膜

的组成和完整性遭到破坏,细胞内产生大量自由基,但由于清除自由基的能力下降,引起质膜发生过氧化,MDA含量增加.

植物体内可溶性糖含量的变化是植物体内碳水化合物代谢的重要标志,它既可反映碳水化合物的合成情况,也可说明碳水化合物在植物体内的运输情况,同时碳水化合物的含量变化也可反映出环境对植物生长发育造成的影响.陈朝明等^[32]研究表明,植物受Cd胁迫后,植物体内可溶性糖含量的变化依赖于Cd的处理浓度,即低浓度处理使植物体内可溶性糖含量增加,而高浓度条件下,植物体内可溶性糖降低,因为植物主要通过消耗大量能量,来抵御Cd的毒害,可溶性糖是植物的主要能量储存形式,据认为这是耐重金属植物消耗能量来运作耐性机制,是对重金属耐性的代价.本实验结果表明,低浓度的蓝藻处理,可溶性糖含量增加,而高浓度的蓝藻处理,可溶性糖含量,先增加后减小.这可能也是由于水葫芦受蓝藻胁迫后,水葫芦叶片内可溶性糖含量的变化依赖于蓝藻的处理浓度,即低浓度处理使水葫芦叶片内可溶性糖含量增加,而高浓度条件下,水葫芦叶片内可溶性糖含量先升高后降低.出现研究结果不一致,可能是由于植物体内可溶性糖含量的变化依赖于处理物质和植物的种类.

丙二醛含量的多少可以直接反映植物在逆境胁迫下受伤害的程度,含量越高,受伤害的程度就越大.可溶性糖含量在细胞质中大量增加,可以提高植物细胞的渗透调节能力,减低质膜受伤害的程度,对植物抵抗逆境胁迫具有重要作用.低浓度的蓝藻处理,MDA含量升高、可溶性糖含量增加,减小水葫芦质膜受伤害的程度,表明水葫芦可以适应;而高浓度的蓝藻处理,MDA含量升高、可溶性糖含量先增加后减小,表明高浓度的蓝藻对其产生了不可逆的伤害.

此外,本实验是在较小的封闭环境条件下完成的,封闭的水体与湖泊中开阔的水体可能存在一定的差异.水葫芦对蓝藻浓度有耐受的范围,可能由于本实验的蓝藻浓度取的不够大,所以没有找出使水葫芦死亡的浓度,又或者由于本实验的温度一直不高,蓝藻自身已经开始死亡.

4 结论

(1) 蓝藻聚集浓度低于60 g·L⁻¹的处理中,TN降低了58%~78%、TP降低了43%~68%;超过60 g·L⁻¹的处理中,水葫芦对水体中氮磷的吸收能

力降低。

(2)不同蓝藻浓度处理中,在低于 $60 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 的蓝藻聚集下,植物叶片可溶性蛋白、可溶性糖、MDA 含量增加;并且蓝藻浓度越高,MDA 含量越高;超过 $60 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 的蓝藻聚集下,植物叶片中可溶性糖的含量,随着实验的进行表现为先增加、后减小的变化趋势。

(3)各处理中植物的根长、总长、鲜重与实验刚开始相比,都呈增加的趋势,根长增加了 $0.29 \sim 2.44$ 倍,总长增加了 $0.41 \sim 0.76$ 倍,湿重增加了 $0.9 \sim 1.43$ 倍,并且随蓝藻浓度的增加,根长、总长增加的幅度减小。

参考文献:

- [1] Hu W P, Jørgensen S E, Zhang F B. A vertical-compressed three-dimensional ecological model in Lake Taihu, China [J]. Ecological Modelling, 2006, **190**(3-4): 367-398.
- [2] Yang M, Yu J W, Li Z L, et al. Taihu Lake not to blame for Wuxi's woes [J]. Science, 2008, **319**(5860): 158.
- [3] 太湖流域水资源保护局. 太湖湖区“黑水团”成因及危害分析[EB/OL]. 健康太湖, 2009; http://www.tbh.gov.cn:89/news/news_show.jsp?fileId=196805.
- [4] 刘国锋, 钟继承, 何俊, 等. 太湖竺山湾藻华黑水团区沉积物中 Fe、S、P 的含量及其形态变化 [J]. 环境科学, 2009, **30**(9): 2520-2526.
- [5] Gumbrecht T. Nutrient removal Processes in freshwater submersed macrophyte systems [J]. Ecological Engineering, 1993, **2**(1): 1-30.
- [6] 王国祥, 濮培民. 若干人工调控措施对富营养化湖泊藻类种群的影响 [J]. 环境科学, 1999, **20**(2): 71-74.
- [7] Gunnarsson C C, Petersen C M. Water hyacinths as a resource in agriculture and energy production: A literature review [J]. Waste Management, 2007, **27**(1): 117-129.
- [8] Yi Q T, Kim Y, Tateda M. Evaluation of nitrogen reduction in water hyacinth ponds integrated with waste stabilization ponds [J]. Desalination, 2009, **249**(2): 528-534.
- [9] Zimmels Y, Kirzhner F, Malkovskaja A. Application of *Eichhornia crassipes* and *Pistia stratiotes* for treatment of urban sewage in Israel [J]. Journal of Environmental Management, 2006, **81**(4): 420-428.
- [10] Agunbiade F O, Olu-Owolabi B I, Adebawale K O. Phytoremediation potential of *Eichhornia crassipes* in metalcontaminated coastal water [J]. Bioresource Technology, 2009, **100**(19): 4521-4526.
- [11] Mishra V K, Tripathi B D. Concurrent removal and accumulation of heavy metals by the three aquatic macrophytes [J]. Bioresource Technology, 2008, **99**(15): 7091-7097.
- [12] Chen Z L, Yang W D, Liu J S, et al. Allelopathic effects of *Eichhornia crassipes* roots on *Alexandrium tamarense* [J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2005, **29**(3): 313-317.
- [13] Ajayi T O, Ogunbayo A O. Achieving environmental sustainability in wastewater treatment by phytoremediation with water hyacinth (*Eichhornia crassipes*) [J]. Journal of Sustainable and Development, 2012, **5**(7): 80-90.
- [14] 刘国锋, 刘海琴, 张志勇, 等. 大水面放养凤眼莲对底栖动物群落结构及其生物量的影响 [J]. 环境科学, 2010, **31**(12): 2925-2931.
- [15] 张霞, 蔡宗寿, 陈丽红, 等. 滇池水葫芦规模化控养生态环境效应分析 [J]. 环境工程, 2013, **31**(S1): 288-291.
- [16] 何浪, 商兆堂, 秦铭荣, 等. 太湖蓝藻密度消长的规律分析 [J]. 江苏农业科学, 2012, **40**(6): 333-335.
- [17] 国家环境保护总局. 水和废水检测分析方法 [M]. (第四版). 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [18] 张丽彬, 王启山, 徐新惠, 等. 乙醇法测定浮游植物叶绿素 a 含量的讨论 [J]. 中国环境监测, 2008, **24**(6): 9-10.
- [19] 李合生. 植物生理生化实验原理和技术 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2000.
- [20] 刘丽贞, 秦伯强, 朱广伟, 等. 太湖蓝藻死亡腐烂产物对狐尾藻和水质的影响 [J]. 生态学报, 2012, **32**(10): 3154-3159.
- [21] 孙小静, 秦伯强, 朱广伟. 蓝藻死亡分解过程中胶体态磷、氮、有机碳的释放 [J]. 中国环境科学, 2007, **27**(3): 341-345.
- [22] 高岩, 易能, 张志勇, 等. 凤眼莲对富营养化水体硝化、反硝化脱氮释放 N_2O 的影响 [J]. 环境科学学报, 2012, **32**(2): 349-359.
- [23] 蒋小欣, 阮晓红, 邢雅因, 等. 城市重污染河道上覆水氮营养盐浓度及 DO 水平对底质氮释放的影响 [J]. 环境科学, 2007, **28**(1): 87-91.
- [24] 谢心义, 张艳茹, 郎业广, 等. 凤眼莲净化污水试验研究 [J]. 环境科学, 1984, **5**(3): 15-19.
- [25] Kanazawa S, Sano S, Koshiba T, et al. Changes in antioxidative enzymes in cucumber cotyledons during natural senescence: comparison with those during dark-induced senescence [J]. Physiologia Plantarum, 2000, **109**(2): 211-216.
- [26] 姚远, 闵义, 胡新文, 等. 低温胁迫对木薯幼苗叶片转化酶及可溶性糖含量的影响 [J]. 热带作物学报, 2010, **31**(4): 556-560.
- [27] 魏道智, 宁书菊, 林文雄. 小麦根系活力变化与叶片衰老的研究 [J]. 应用生态学报, 2004, **15**(9): 1565-1569.
- [28] 赵垦田. 国外针叶树种根系生态学研究综述 [J]. 世界林业研究, 2000, **13**(5): 7-12.
- [29] 严国安, 任南, 李益健. 环境因素对凤眼莲生长及净化作用的影响 [J]. 环境科学与技术, 1994, (1): 2-5.
- [30] 徐燕. CO_2 浓度和温度升高对红桦可溶性蛋白含量和分配的影响 [D]. 成都: 中国科学院成都生物研究所, 2007. 1-53.
- [31] 郑世英, 王丽燕, 商学芳, 等. Cd^{2+} 胁迫对玉米抗氧化酶活性及丙二醛含量的影响 [J]. 江苏农业科学, 2007, (1): 36-38.
- [32] 陈朝明, 龚慧群, 王凯荣. Cd 对桑叶品质、生理生化特性的影响及其机理研究 [J]. 应用生态学报, 1996, **7**(4): 417-423.

CONTENTS

Ozone Source Apportionment at Urban Area during a Typical Photochemical Pollution Episode in the Summer of 2013 in the Yangtze River Delta	LI Hao, LI Li, HUANG Cheng, <i>et al.</i> (1)
Pollution Characteristics and Ozone Formation Potential of Ambient VOCs in Winter and Spring in Xiamen	XU Hui, ZHANG Han, XING Zhen-yu, <i>et al.</i> (11)
Temporal and Spatial Characteristics of Atmospheric NO ₂ over Hainan Island and the Pollutant Sources in Recent 10 Years	FU Chuan-bo, CHEN You-long, DAN Li, <i>et al.</i> (18)
Composition of Organic Carbon/Elemental Carbon and Water-soluble Ions in Rice Straw Burning	HONG Lei, LIU Gang, YANG Meng, <i>et al.</i> (25)
Gas Chromatography with a Pulsed Discharge Helium Ionization Detector for Measurement of Molecular Hydrogen(H ₂) in the Atmosphere	LUAN Tian, FANG Shuang-xi, ZHOU Ling-xi, <i>et al.</i> (34)
Partial Pressure of CO ₂ and CO ₂ Degassing Fluxes of Huayankou and Xiaolangdi Station Affected by Xiaolangdi Reservoir	ZHANG Yong-ling, YANG Xiao-lin, ZHANG Dong (40)
Distribution of Biogenic Organic Dimethylated Sulfur Compounds and Its Influencing Factors in the East China Sea in Summer	LI Jiang-ping, ZHANG Hong-hai, YANG Gui-peng (49)
Remote Sensing Estimation of Total Suspended Matter Concentration in Xin'anjiang Reservoir Using Landsat 8 Data	ZHANG Yi-bo, ZHANG Yun-lin, ZHA Yong, <i>et al.</i> (56)
Spatio-temporal Characteristics and Source Identification of Water Pollutants in Wenritang River Watershed	MA Xiao-xue, WANG La-chun, LIAO Ling-ling (64)
Effect of Hydrochemistry Characteristics Under Impact of Human Activity: A Case Study in the upper Reaches of the Xijiang River Basin	YU Shi, SUN Ping-an, DU Wen-yue, <i>et al.</i> (72)
Annual Variation of Different Phosphorus Forms and Response of Algae Growth in Meiliang Bay of Taihu Lake	WANG Ming, WU Xiao-fei, LI Da-peng, <i>et al.</i> (80)
Distribution of Transferable Nitrogen in Poyang Lake Sediments and Its Response to the Variation of River-Lake Relationship	SHEN Hong-yan, ZHANG Mian-mian, NI Zhao-kui, <i>et al.</i> (87)
Effect of Environmental Factors on Macroinvertebrate Community Structure in the Huntai River Basin in the Huntai River Basin	LI Yan-li, LI Yan-fen, XU Zong-xue (94)
Effects of Outbreak and Extinction of Algal Blooms on the Microbial Community Structure in Sediments of Chaohu Lake	DIAO Xiao-jun, LI Yi-wei, WANG Shu-guang (107)
Impacts of Algal Blooms Accumulation on Physiological Ecology of Water Hyacinth	WU Ting-ting, LIU Guo-feng, HAN Shi-qun, <i>et al.</i> (114)
Speciation and Spatial-temporal Variation of Mercury in the Xiaolangdi Reservoir	CHENG Liu, MAO Yu-xiang, MA Bing-juan, <i>et al.</i> (121)
Spatial Distribution of Mercury in Soils of a Typical Small Agricultural Watershed in the Three Gorges Reservoir Region	WANG Ya, ZHAO Zheng, MU Zhi-jian, <i>et al.</i> (130)
Temporal and Spatial Variation of Mercury in Water of Agro-forestry and Livestock Compound Watershed in the Three Gorges Reservoir Area	ZHAO Zheng, WANG Ya, MU Zhi-jian, <i>et al.</i> (136)
Effect of External Condition on the Static Migration and Release of Dibutyl-phthalate in the Soil of the Fluctuating Zone of the Three Gorges Reservoir to the Overlying Water	SONG Jiao-yan, MU Zhi-jian, WANG Qiang, <i>et al.</i> (143)
Ultraviolet-Visible(UV-Vis) and Fluorescence Spectral Characteristics of Dissolved Organic Matter(DOM) in Soils of Water-Level Fluctuation Zones of the Three Gorges Reservoir Region	GAO Jie, JIANG Tao, LI Lu-lu, <i>et al.</i> (151)
Characterization of Chromophoric Dissolved Organic Matter(CDOM) in Zhoushan Fishery Using Excitation-Emission Matrix Spectroscopy(EEMs) and Parallel Factor Analysis(PARAFAC)	ZHOU Qian-qian, SU Rong-guo, BAI Ying, <i>et al.</i> (163)
Pollution Characteristics and Distribution of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Organochlorine Pesticides in Groundwater at Xiaodian Sewage Irrigation Area, Taiyuan City	LI Jia-le, ZHANG Cai-xiang, WANG Yan-xin, <i>et al.</i> (172)
Risk Assessment and Analysis of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Surface Sediments of Xinglin Bay Suburb Rivers of Xiamen	CHENG Qi-ming, HUANG Qing, LIAO Zhen-ni, <i>et al.</i> (179)
Comparative Analysis of Two Different Methods for Risk Assessment of Groundwater Pollution: A Case Study in Beijing Plain	WANG Hong-na, HE Jiang-tao, MA Wen-jie, <i>et al.</i> (186)
Transportation and Risk Assessment of Heavy Metal Pollution in Water-Soil from the Riparian Zone of Daye Lake, China	ZHANG Jia-quan, LI Xiu, ZHANG Quan-fa, <i>et al.</i> (194)
Arsenic Removal by Coagulation Process and the Field Expanding Experiments for Yangzonghai Lake	CHEN Jing, ZHANG Shu, YANG Xiang-jun, <i>et al.</i> (202)
Efficient Oxidative Degradation of Tetrabromobisphenol A by Silver Bismuth Oxide	CHEN Man-tang, SONG Zhou, WANG Nan, <i>et al.</i> (209)
Removal of Tetracycline by a Kind of Nano-Sized Amorphous Carbon	WU Yi-xiao, LI Ai-min, WANG Di-hua, <i>et al.</i> (215)
Adsorption Behavior of Anionic Dyes onto Magnetic Chitosan Derivatives	ZHANG Cong-lu, HU Xiao-min, ZHAO Yan, <i>et al.</i> (221)
Forming Mechanism of Humic Acid-Kaolin Complexes and the Adsorption of Trichloroethylene	ZHU Xiao-jing, HE Jiang-tao, SU Si-hui (227)
Impact on the Microbial Community of Municipal Sewage in the ANAMMOX System During the Cooling Process	ZHAO Zhi-rui, MIAO Zhi-jia, LI Duo, <i>et al.</i> (237)
Application of FISH-NanoSIMS Technique in Environmental Microbial Ecology Study	CHEN Chen, BAI Yao-hui, LIANG Jin-song, <i>et al.</i> (244)
Influence of Microcystin-LR on Cell Viability and Surface Characteristics of <i>Pseudomonas putida</i>	DENG Ting-jin, YE Jin-shao, PENG Hui, <i>et al.</i> (252)
Screening, Combination of Microbial Deodorizer and the Optimization of Its Deodorizing Conditions	ZENG Su, LI Nan-hua, SHENG Hong-chan, <i>et al.</i> (259)
Distribution and Enrichment Characteristics of Organochlorine Pesticides in Water and Halobios from Qingbang Island in Zhoushan, China	ZHANG Ze-zhou, XING Xin-li, GU Yan-sheng, <i>et al.</i> (266)
Levels of Polychlorinated Biphenyls in Tibetan and Yi Adolescents' Hair from Liangshan Prefecture, Sichuan Province	ZHOU Ying, SUN Yi-ming, JIN Jun, <i>et al.</i> (274)
Effects of Single and Co-Exposure of Cu and Chlorpyrifos on the Toxicity of Earthworm	XU Dong-mei, WANG Yan-hua, WANG Nan, <i>et al.</i> (280)
Effect of Exogenous Selenium on Accumulation and Chemical Forms of Cadmium in Cucumber(<i>Cucumis sativus</i> L.)	XIONG Shi-juan, LIU Jun, XU Wei-hong, <i>et al.</i> (286)
Pollution Characteristics of Platinum Group Elements in Road Rust in Xiamen	HONG Zhen-yu, HONG You-wei, YIN Li-qian, <i>et al.</i> (295)
Spatial Distribution of Se in Soils from Different Land Use Types and Its Influencing Factors Within the Yanghe Watershed, China	SHANG Jing-min, LUO Wei, WU Guang-hong, <i>et al.</i> (301)
Immobilization Impact of Different Fixatives on Heavy Metals Contaminated Soil	WU Lie-shan, ZENG Dong-mei, MO Xiao-rong, <i>et al.</i> (309)
Form Tendency and Bio-availability Dynamics of Cu and Zn in Different Farm Soils After Application of Organic Fertilizer of Livestock and Poultry Manures	SHANG He-ping, LI Yang, ZHANG Tao, <i>et al.</i> (314)
Analysis of Composition Characteristics of Municipal Solid Waste in South China	ZHANG Hai-long, LI Xiang-ping, QI Jian-ying, <i>et al.</i> (325)
Sewage Sludge Conditioning by Bioleaching Combined with Fenton-like Oxidation	LIU Chang-geng, ZHANG Pan-yue, JIANG Jiao-jiao, <i>et al.</i> (333)
Applicability of Bisphenol A Detection by a Planar Waveguide Fluorescent Biosensor	XU Wei-qi, ZHANG Yong-ming, ZHOU Xiao-hong, <i>et al.</i> (338)
A New "Turn-on" Fluorescent Probe for Visual Detection of Hydrogen Sulfide	LIU Chun-xia, MA Xing, WEI Guo-hua, <i>et al.</i> (343)
Analysis of Sap Flow Characteristics of the Chinese Pine in Typical Loess Plateau Region of China	ZHANG Han-dan, WEI Wei, CHEN Li-ding, <i>et al.</i> (349)
Simultaneous Production of Hydrogen and Volatile Fatty Acid from <i>Macrocystis pyrifera</i>	ZHAO Xiao-xian, FAN Xiao-lei, GUO Rong-bo, <i>et al.</i> (357)
Behaviors of Engineered Nanoparticles in Aquatic Environments and Impacts on Marine Phytoplankton	LI Man-lu, JIANG Yue-lu (365)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 汤鸿霄 陈吉宁 孟 伟 周宗灿 林金明
欧阳自远 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2015年1月15日 第36卷 第1期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 1 Jan. 15, 2015

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	欧阳自远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencecp. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencecp. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行