

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第34卷 第4期

Vol.34 No.4

2013

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

唐山大气颗粒物中水溶性无机盐的观测研究 苗红妍,温天雪,王丽,李杏茹,王跃思(1225)

鼎湖山 PM_{2.5} 中水溶性离子浓度特征分析 赵亚南,王跃思,温天雪,刘全(1232)

北京夏冬季霾天气下气溶胶水溶性离子粒径分布特征 黄怡民,刘子锐,陈宏,王跃思(1236)

深圳市 PM_{2.5} 化学组成与时空分布特征 云慧,何凌燕,黄晓峰,兰紫娟,李响,曾立武(1245)

福州城市及郊区冬、夏两季大气中多环芳烃特征研究 易志刚,黄幸然,毕峻奇,郭萍萍,郑丽丽(1252)

河西走廊及兰州地区典型有机氯农药的大气残留及时空分布特征 丁中原,毛潇萱,马子龙,田慧,郭强,黄韬,高宏,李军,张干(1258)

淄博市大气污染特征模型模拟及环境容量估算 薛文博,王金南,杨金田,雷宇,燕丽,贺晋瑜,韩宝平(1264)

香溪河秋季水-气界面温室气体通量日变化观测及影响因素分析 黄文敏,朱孔贤,赵玮,余博识,袁希功,冯瑞杰,毕永红,胡征宇(1270)

变异系数法评价人类活动对地下水环境的影响 赵微,林健,王树芳,刘记来,陈忠荣,寇文杰(1277)

基于 ArcSWAT 模型的长乐江流域非点源氮素污染源识别和分析 邓欧平,孙嗣咏,吕军(1284)

西安周边河流溶解无机碳浓度及同位素组成初探 郭威,李祥忠,刘卫国(1291)

滇池流域宝象河暴雨径流初始冲刷效应 郭怀成,向男,周丰,王永华,李发荣,朱翔,毛国柱,于书霞,李娜,盛虎,杨永辉,何成杰,王翠榆(1298)

三峡库区沉积物秋冬初的磷释放通量估算 牛凤霞,肖尚斌,王雨春,刘德富,黎国育,王亮,纪道斌,杨正健(1308)

海南东部河流、河口及近岸水域颗粒态重金属的分布及污染状况 辛成林,任景玲,张桂玲,郭亚平,张国玲,刘素美(1315)

黄河口表层沉积物中重金属的环境地球化学特征 吴斌,宋金明,李学刚(1324)

扎龙湿地沉积物重金属空间分布特征及其潜在生态风险评价 叶华香,臧淑英,张丽娟,张玉红(1333)

上海市典型疏浚泥重金属生态风险评价 唐庆丽,程金平,高昊旻,姚磊,蒋真毅,吴旻,谢翠松,梁海,王鹤,皮帅帅,余朝毅(1340)

我国沿海地区城镇污水处理厂污泥重金属污染状况及其处置分析 张灿,陈虹,余忆玄,王立军,韩建波,陶平(1345)

江苏某地长江、太湖水源水及出厂水中有机物雌激素活性的比较 金涛,吕学敏,曾一凡,张冰冰,马鲲鹏,姜朴,唐非(1351)

北京市污水处理厂中邻苯二甲酸酯污染水平及其归趋 周益奇,刘云霞(1357)

降解 DMF 引起污泥毒性及其毒性空间分布特性研究 胡园园,杨娜,丁毅,徐文璐,陈秀荣,艾奇峰,陈善佳,王利鹏,黄华(1363)

渤海湾有机锡污染对野生脉红螺的生态风险 安立会,张燕强,宋双双,刘玥,高俊敏,陈浩,赵兴茹,雷坤,郑丙辉(1369)

巨牡蛎(*Crassostrea* sp.)对燃煤电厂脱硫海水中汞的生物累积 刘锡尧,袁东星,陈耀瑾(1374)

咪唑氯盐离子液体对蚯蚓急性毒性及体重影响研究 黄若男,范军杰,涂宏志,谭凌燕,刘惠君,徐冬梅(1380)

铝盐混凝除砷影响因素及机制研究 陈桂霞,胡承志,朱灵峰,童华卿(1386)

混凝和活性炭吸附去除微污染源水中 DON 的研究 刘冰,余国忠,古励,赵承美,李清飞,翟慧敏(1392)

活性炭催化臭氧氧化扑热息痛的机制研究 王佳裕,戴启洲,鱼杰,颜亦舟,陈建孟(1402)

氯酚溶液的 γ 辐照还原降解研究 彭云霞,何仕均,龚文琪,王建龙(1411)

C/N 比对反硝化过程中亚硝酸盐积累的影响分析 袁怡,黄勇,邓慧萍,盛学敏,潘杨,李祥(1416)

以甲醇为碳源生物反硝化过程释放一氧化二氮的试验研究 翟晓峰,蒋成爱,吴光学,曾运涛(1421)

固体纤维素类废物作为反硝化碳源滤料的比选 李斌,郝瑞霞(1428)

基于能源回收的城市污水厌氧氨氧化生物脱氮新工艺 卢健聪,高大文,孙学影(1435)

多模式厌氧/缺氧/好氧污水处理工艺的稳态与动态模拟 周振,吴志超,王志伟,杜兴庄,蒋玲燕,邢灿(1442)

高氨氮废水与城市生活污水短程硝化系统菌群比较 赵志瑞,马斌,张树军,李滨,白志辉,王晓辉,庄国强,张洪助(1448)

活性污泥絮体的分形结构分析 阮晓东,刘俊新(1457)

负荷交替法快速培养好氧硝化颗粒污泥的研究 沈娜,杨昌柱,濮文虹,罗应东(1464)

预加不同比例不同粒径好氧颗粒对 SBR 中好氧颗粒污泥形成的影响 熊光城,濮文虹,杨昌柱(1472)

同时回收氮磷提高碱性发酵污泥脱水性能的机制研究 张超,陈银广,顾国维(1479)

利用流式细胞仪分选技术研究湖泊真核超微藻的遗传多样性 谢薇薇,袁伊,王志伟,孔繁翔,史小丽(1485)

阿魏酸和香豆素对铜绿微囊藻的化感作用 郭亚丽,傅海燕,黄国和,高攀峰,柴天,严滨,廖欢(1492)

象山港国华电厂强增温海域浮游动物群落结构和多样性的时空特征 朱艺峰,黄简易,林霞,杨莹,邢超,严小军(1498)

环氧树脂降解嗜盐菌的筛选及其处理高盐环氧树脂废水的特性研究 王进,徐真,彭书传,夏明山,岳正波,陈天虎(1510)

铜绿假单胞菌胞内酶粗提液对十溴联苯醚的降解 史广宇,尹华,叶锦韶,彭辉,张娜,何宝燕(1517)

酵母提取物对葡萄糖发酵生产生物破乳菌 *Alcaligenes* sp. S-XJ-1 的影响 黄翔峰,王凯,黎明霞,王彩林,陆丽君,刘佳(1524)

玉米秸秆厌氧降解复合菌系的微生物群落结构 乔江涛,郭荣波,袁宪正,师晓爽,许晓晖,范晓蕾,邱艳玲(1531)

红霉素对产甲烷菌的抑制及其驯化 刘子旭,孙力平,李玉友,邱春生(1540)

4 种 NAPLs 污染物在二维砂箱中的指进锋面形态特征研究 杨宾,李慧颖,伍斌,杜晓明,李发生(1545)

污灌区土壤中多环芳烃的垂直分布及可能来源 姚林林,张彩香,李佳乐,廖小平,王焰新(1553)

呼和浩特市不同功能区土壤重金属污染特征及评价 郭伟,孙文惠,赵仁鑫,赵文静,付瑞英,张君(1561)

水稻光合同化碳在土壤不同粒径、密度分组中的分配特征 李苗苗,聂三安,陈晓娟,罗璐,朱捍华,石辉,葛体达,童成立,吴金水(1568)

亚热带不同稻田土壤微生物生物量碳的剖面分布特征 盛浩,周萍,袁红,廖超林,黄运湘,周清,张杨珠(1576)

施用堆腐有机肥对水稻土中六氯苯脱氯降解影响 刘翠英,蒋新(1583)

螯合剂和生物表面活性剂对 Cu、Pb 污染壤土的淋洗修复 刘霞,王建涛,张萌,王力,杨亚提(1590)

不同温度下烧制的秸秆炭对可变电荷土壤吸附 Pb(II) 的影响 蒋田雨,姜军,徐仁扣,周立祥,王世梅(1598)

绿色木霉改性玉米秸秆溢油吸附剂的制备及其性能研究 蓝舟琳,彭丹,郭楚玲,朱超飞,薛秀玲,党志(1605)

改性成型层状氢氧化镁铝对不同水体中 PO₄³⁻ 的脱除性能 邢坤,王海增(1611)

羧基化碳纳米管载铂催化剂对微生物燃料电池阴极氧还原性能的影响 涂丽杏,朱能武,吴平霄,李平,吴锦华(1617)

新型生物质活性炭烟气脱硫研究 刘洁岭,汤争光,陈杰,蒋文举,江霞(1623)

城市工业行业能源消费强度等级划分方法及应用 毛建素,马兰(1628)

厦门城市化进程中的居民食物碳消费及其环境负荷 闫祯,崔胜辉,李桂林,任引,徐礼来(1636)

《环境科学》征订启事(1283) 《环境科学》征稿简则(1332) 信息(1350,1509,1582,1644) 专辑征稿通知(1523)

阿魏酸和香豆素对铜绿微囊藻的化感作用

郭亚丽^{1,2}, 傅海燕^{2*}, 黄国和^{1,2}, 高攀峰², 柴天², 严滨², 廖欢^{1,2}

(1. 华北电力大学资源与环境研究院区域能源环境系统优化教育部重点实验室, 北京 102206; 2. 厦门理工学院环境工程系, 厦门 361024)

摘要: 通过对铜绿微囊藻(*Microcystis aeruginosa*)的藻液 D_{680} 、叶绿素 a、电导率(EC)值以及超氧阴离子自由基 $O_2^{\cdot-}$ 含量的测定,研究了不同浓度的阿魏酸和香豆素对铜绿微囊藻的生长抑制作用及其机制。结果表明,阿魏酸和香豆素对铜绿微囊藻的生长均产生“低促高抑”作用,浓度高于 $100 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的阿魏酸和香豆素对铜绿微囊藻表现出明显的抑制作用,200 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的阿魏酸和香豆素第 6 d 的平均抑藻率分别为 80.3% 和 58.0%。在高浓度阿魏酸和香豆素抑制作用下,铜绿微囊藻的叶绿素 a 含量迅速降低、EC 值和 $O_2^{\cdot-}$ 含量明显增大,说明化感物质可能通过破坏细胞膜、增加 $O_2^{\cdot-}$ 含量、降低叶绿素 a 含量等作用抑制藻细胞的生长。此外,种子发芽实验结果表明,阿魏酸较香豆素毒性小。

关键词: 阿魏酸; 香豆素; 铜绿微囊藻; 化感作用; 生物活性

中图分类号: X171; X52 **文献标识码:** A **文章编号:** 0250-3301(2013)04-1492-06

Allelopathy Effects of Ferulic Acid and Coumarin on *Microcystis aeruginosa*

GUO Ya-li^{1,2}, FU Hai-yan², HUANG Guo-he^{1,2}, GAO Pan-feng², CHAI Tian², YAN Bin², LIAO Huan^{1,2}

(1. Ministry of Education Key Laboratory of Regional Energy and Environmental Systems Optimization, Resources and Environmental Research Academy, North China Electric Power University, Beijing 102206, China; 2. Department of Environmental Engineering, Xiamen University of Technology, Xiamen 361024, China)

Abstract: The inhibitory effects and allelopathy mechanism of ferulic acid and coumarin on *Microcystis aeruginosa* were investigated by measuring the D_{680} value, the content of chlorophyll-a, the electrical conductivity (EC) and superoxide anion radical $O_2^{\cdot-}$ value. Ferulic acid and coumarin had allelopathic effects on the growth of *M. aeruginosa* and promoted the physiological metabolism at low concentrations while inhibited the metabolism at high concentrations. Obvious inhibitory effects were observed when the concentration of ferulic acid or coumarin was over $100 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. The average inhibitory rates reached 80.3% and 58.0% after six days when the concentration of ferulic acid or coumarin was $200 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. The content of chlorophyll-a was decreased while the EC value and $O_2^{\cdot-}$ concentration were promoted by higher concentrations of ferulic acid or coumarin, suggesting that the growth of algae was inhibited probably by the damage of cell membrane, increase in the content of $O_2^{\cdot-}$ and decrease in the content of chlorophyll-a. In addition, seed germination test elucidated that Ferulic acid was safer than Coumarin.

Key words: ferulic acid; coumarin; *Microcystis aeruginosa*; allelopathy; bioactivity

近年来,湖泊富营养化及水华问题日益加剧,造成了大范围的水质恶化,导致水体景观和生态功能受到影响^[1],加剧了水资源危机,成为水环境治理方面亟待解决的严重问题^[2]。水生植物化感作用对藻类抑制作用的发现,为治理富营养化水体的治理提供了新的方法和思路^[3],水生植物分泌的化感物质大多为次生代谢物质,能在自然条件下降解,不会在生态系统中积累,生态安全性好^[4]。Nakai 等^[5]从穗花狐微藻中鉴定出 4 种酚酸类物质,并证明其对铜绿微囊藻均有抑制作用。有研究证明,大部分酚酸类物质具有化感作用^[6]。阿魏酸化学名称为 4-羟基-3-甲氧基肉桂酸,是桂皮酸(又称肉桂酸,3-苯基-2-丙烯酸)的衍生物之一,属于酚酸类物质。香豆素又称双呋喃环和氧杂萘邻酮,是目前发现的化感物质的一种^[7],阿魏酸和香豆素作为植物中广泛存在的重要的次生代谢物质,易合成且用途广泛,但其对

铜绿微囊藻的生长的影响及其机制研究均未见报道^[8,9]。阿魏酸和香豆素具有不同的结构和化学性质,本研究选取这两种不同类型的物质对铜绿微囊藻的抑制作用进行比较分析,并对其生态安全性进行考察,以期抑制水华藻时筛选高效化感物质抑藻剂提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 实验材料

阿魏酸(ferulic acid),由 Aladdin Chemistry Co. Ltd. 提供,香豆素(coumarin)购自国药集团化学试

收稿日期: 2012-07-07; 修订日期: 2012-08-16

基金项目: 国家自然科学基金项目(51109181); 福建省教育厅 A 类科技项目(JA11236); 福建省高校杰出青年科研人才培育计划项目(JA12243)

作者简介: 郭亚丽(1988~),女,硕士,主要研究方向为富营养化水体综合治理, E-mail: yali007@yahoo.cn

* 通讯联系人, E-mail: fuhly@xmut.edu.cn

剂有限公司. 铜绿微囊藻 (*Microcystis aeruginosa*, 编号 FACHB-978) 由中国科学院武汉水生生物研究所淡水藻种库提供.

1.2 实验方法

1.2.1 藻类培养

铜绿微囊藻 (*Microcystis aeruginosa*) 采用灭菌的 BG11 培养基^[10] 培养, 培养温度 (25 ± 0.8) °C, 光照强度 3 000 lx, 光暗周期比为 14 h: 10 h, 培养至对数生长期备用.

1.2.2 阿魏酸和香豆素对铜绿微囊藻的化感抑制作用

将阿魏酸和香豆素经少量乙醇 (储备液中乙醇浓度 $\leq 10 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$) 助溶后, 用灭菌的 BG11 培养基稀释, 配制成 $40 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 的储备液于 4 °C 下储存备用.

取处于生长对数期的藻液适量放入灭菌的 500 mL 的锥形瓶内, 加入一定量的阿魏酸和香豆素储备液, 添加灭菌的 BG11 培养基至 200 mL, 使阿魏酸和香豆素的最终浓度分别为 5、10、20、40、100、200 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 初始藻浓度 D_{680} 为 0.650, 经血球计数板计数, 藻细胞个数约为 10^7 个 $\cdot \text{mL}^{-1}$, 相当于以铜绿微囊藻为优势水华藻暴发高峰期时平均藻细胞个数^[11], 对照组不添加任何化感物质, 每组 3 个平行样, 放入光照培养箱中, 设置温度为 (25 ± 0.8) °C, 光照强度 3 200 lx, 光暗周期 14 h: 10 h, 每天振荡 2 次并转换光照位置. 每 24 h 测定藻液的 D_{680} 、叶绿素 a 浓度、电导率 EC 值、超氧阴离子自由基 O_2^- .

1.2.3 阿魏酸和香豆素的生物活性测定

种子发芽实验参考 OECD 的有毒化学品的毒性测试指南^[12], 水稻种子购于厦门市种子公司. 所用种子经 0.1% 次氯酸钠溶液消毒 20 min, 去离子水浸泡 10 min 后, 用蒸馏水冲洗干净, 自然晾干. 选择 10 颗成熟、饱满、无损伤的种子均匀地摊布在培养皿底部的滤纸表面上. 每个培养皿内加入 5 mL 蒸馏水, (25 ± 0.8) °C 下避光培养 48 h, 每隔 12 h 更换一次蒸馏水. 根长定义为根尖到胚根之间的长度, 根长超过 5 mm 视为发芽. 实验设 3 个平行, 测定平均发芽率, 作为空白对照.

测试化合物设置 5、10、20、40、100、200 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 共 6 个浓度梯度, 每个浓度设 3 个重复, 每个培养皿加入 5 mL 不同浓度的测试溶液. 在 (25 ± 0.8) °C 下避光培养, 每 12 h 更换一次测试液. 48 h 后测定并计算每组测试液中的发芽率.

1.3 测定方法

1.3.1 藻细胞数的测定

紫外可见分光光度计于 680 nm 波长处的吸光度 (D_{680}) 表示. 藻细胞数与光密度呈正相关关系. 计算同一浓度下铜绿微囊藻的生长抑制率:

$$\text{IR} = (1 - N_t/M_t) \times 100\%$$

式中, IR 代表抑制率, N_t 代表处理组第 t 天藻细胞光密度值, M_t 代表对照组第 t 天藻细胞光密度值.

1.3.2 叶绿素 a 的测定

叶绿素 a 的测定采用反复冻融法^[13]: 取 5 mL 藻液放入 10 mL 灭菌离心管中, 加入适量的碳酸镁粉末, 离心, 弃去上清液, 于 -20 °C 下以冷冻 20 min/融解 5 min 的比例进行冻融, 重复 3~4 次, 向离心管中加入 10 mL 90% 丙酮, 于 -4 °C 下浸提 20 h 后, 离心, 取上清液测定 630、645、663、750 nm 波长下的吸光度, 所有操作过程都严格避光. 按下式计算叶绿素 a 含量 m ($\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$):

$$m = [11.64 \times (D_{663} - D_{750}) - 2.16 \times (D_{645} - D_{750}) + 0.1 \times (D_{630} - D_{750})] \times \frac{V_1}{V_0}$$

式中, V_0 为水样体积 (L), V_1 为提取液定容后的体积 (mL), D 为吸光度.

1.3.3 电导率的测定

采用测定培养液的电导率 (EC) 法, 取 5 mL 的藻液经 0.45 μm 的微孔滤膜抽滤, 所得滤液在室温下用电导仪测定其电导率.

1.3.4 超氧阴离子自由基 (O_2^-) 的测定 (以 D_{530} 值来表示 O_2^- 的相对含量)

取 5 mL 藻液加至灭菌的离心管中, 4 000 $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$ 离心 15 min 收集藻细胞, 放入冰浴的研钵中, 加入 65 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 磷酸缓冲液 (pH 7.8) 6 mL, 研磨成匀浆, 于 5 000 $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$, 4 °C 下离心 10 min, 取 1 mL 上清液于试管中, 对照管用蒸馏水代替, 加入磷酸缓冲液 0.9 mL, 盐酸羟胺 0.1 mL, 混匀, 置于 25 °C 水浴中反应 20 min 后, 再加入 17 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 对氨基苯磺酸和 7 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 α -萘胺各 0.5 mL, 于 25 °C 水浴中反应 20 min, 以对照管为空白, 在 530 nm 波长处测定吸光度^[14].

1.4 数据分析

数据均采用 3 个平行样的平均值, 并用 Excel 2007 软件对数据进行处理, 误差分析采用软件自带的标准差分析.

2 结果与讨论

2.1 阿魏酸和香豆素对铜绿微囊藻的生长抑制作用

采用不同浓度的阿魏酸和香豆素对铜绿微囊藻

的生长影响进行研究,从图 1 中可以看出阿魏酸和香豆素对铜绿微囊藻的生长均表现出“低促高抑”现象,这和已有的研究报道^[8,15]一致.藻密度为 10^7 个 \cdot mL⁻¹ 时,在低浓度阿魏酸和香豆素 (≤ 40 mg \cdot L⁻¹) 胁迫作用下,铜绿微囊藻生长速率明显增大,说明低浓度的阿魏酸和香豆素对铜绿微囊藻的生长均有促进作用,其原因可能为低浓度的化感物质能够改变细胞膜的通透性,使藻体更易吸收溶液中营养成分^[16].在较高浓度 (≥ 100 mg \cdot L⁻¹) 阿魏酸和香豆素作用下,藻密度逐渐降低,化感物质表现出明显的抑制效果.200 mg \cdot L⁻¹ 的阿魏酸和香豆素在第 6 d 时对铜绿微囊藻的抑制率分别达到 80.3% 和 58.0%,表明铜绿微囊藻细胞生长受到限制,而当化感物质浓度超过某一阈值时,细胞膜可能遭到

破坏,藻体死亡^[16].

高浓度的阿魏酸抑藻效果明显好于香豆素,其抑藻程度的差别可能与两者的化学结构不同有关,也可能因为两者对铜绿微囊藻的作用靶点不同而表现出不同的抑藻效果.高云霓等^[17]研究了苦草释放的酚酸类物质对铜绿微囊藻的抑制效应,证实酚酸的抑藻活性与其本身的结构相关.Zhu 等^[18]研究了穗花狐微藻分泌的 4 种酚酸类物质焦性没食子酸 (PA)、没食子酸 (GA)、鞣花酸 (EA) 和 (+) 儿茶素 (CA) 对铜绿微囊藻的生长抑制作用及其对光合系统 II (PS II) 的影响,结果表明 PA 和 GA 的抑藻效果较好于 EA 和 CA,而 PA 和 GA 显著抑制铜绿微囊藻的 PS II 电子传递系统,但后两者对 PS II 电子传递系统没有影响.

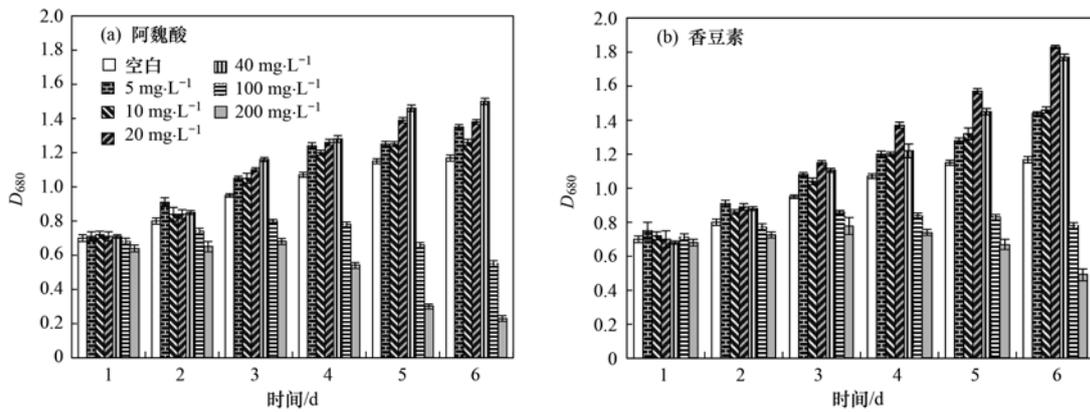


图 1 不同浓度的阿魏酸和香豆素对铜绿微囊藻生长影响 ($n = 3$)

Fig. 1 Effects of different concentrations of ferulic acid and coumarin on the growth of *Microcystis aeruginosa* ($n = 3$)

2.2 阿魏酸和香豆素对铜绿微囊藻电导率的影响

细胞膜通透性与细胞膜受损有关,当细胞膜受损时,细胞膜透性增大,细胞内电解质外渗,使得细胞外液电导率增大^[19,20].因此,电导率 EC 值变化可反映细胞膜通透性的变化.图 2 为阿魏酸和香豆

素对铜绿微囊藻电导率的影响,从中可知,对照组藻液电导率与藻细胞生物量保持一致,藻生物量增加时,电导率值下降,说明细胞生长繁殖过程中吸收了培养液中的营养元素,导致细胞外离子减少,电导率下降.在低浓度阿魏酸和香豆素 (≤ 40 mg \cdot L⁻¹) 胁

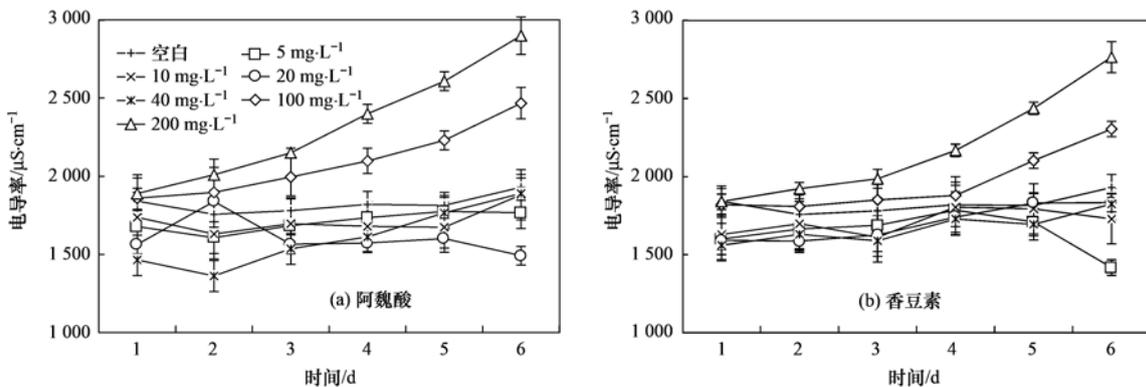


图 2 不同浓度的阿魏酸和香豆素对电导率的影响 ($n = 3$)

Fig. 2 Effects of different concentrations of ferulic acid and coumarin on the conductance of *Microcystis aeruginosa* ($n = 3$)

迫作用下,铜绿微囊藻藻液电导率基本和对照组保持一致,说明在低浓度的化感物质胁迫作用下,细胞膜通透性并未遭到破坏.高浓度的阿魏酸和香豆素($\geq 100 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)使电导率值明显增加,200 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 阿魏酸和香豆素实验组第6 d的EC值分别为对照组的1.5倍和1.4倍,说明在高浓度的化感物质作用下细胞膜结构受损,可能导致细胞内某些离子泄露出,使得EC值变大. Li等^[21]研究芦苇化感物质能引起铜绿微囊藻细胞内 K^+ 、 Ca^{2+} 等外泄.高浓度阿魏酸实验组电导率变化较香豆素实验组更明显,这与阿魏酸对铜绿微囊藻生长抑制作用效果一致.

2.3 阿魏酸和香豆素对铜绿微囊藻超氧阴离子自由基 O_2^- 的影响

图3为阿魏酸和香豆素对超氧阴离子自由基 O_2^- 的影响,对照组的 O_2^- 含量变化不大,在低浓度阿魏酸和香豆素浓度($\leq 40 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)胁迫作用下,4个低浓度实验组 O_2^- 含量稍略有升高但随即下降并与对照组基本保持一致.而高浓度实验组(≥ 100

$\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)时,随着胁迫作用时间的增加, O_2^- 的含量急剧增加,200 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 阿魏酸和香豆素实验组第6 d D_{530} 平均值分别为对照组的3.7倍和3.1倍.高浓度的阿魏酸对铜绿微囊藻的 O_2^- 含量的影响较香豆素明显,这可能因为阿魏酸是酚酸的一种,有较强的还原性,容易发生自氧化作用^[22],阿魏酸易被氧化为邻醌或半醌自由基,香豆素不易被氧化,而且可能伴随阿魏酸氧化过程中产生超氧阴离子自由基 O_2^- . O_2^- 在其它活性氧化合物(包括过氧化氢、氢氧自由基、单线态氧)的形成过程中起到重要作用,同时这些化合物能够引起脂质、蛋白质、DNA的破坏,破坏细胞正常功能^[23~25],细胞内清除 O_2^- 自由基的抗氧化酶由于 O_2^- 自由基含量上升到一定浓度时,抗氧化酶活性降低^[25],进而导致 O_2^- 自由基含量的急剧上升.图4的 O_2^- 含量变化趋势与图3中电导率EC值变化相对应,可能由于超氧阴离子自由基 O_2^- 的累积使细胞膜脂质过氧化损坏而使其含量急剧上升,同时细胞膜的破坏可能导致细胞内离子外泄最终使得电导率值增大.

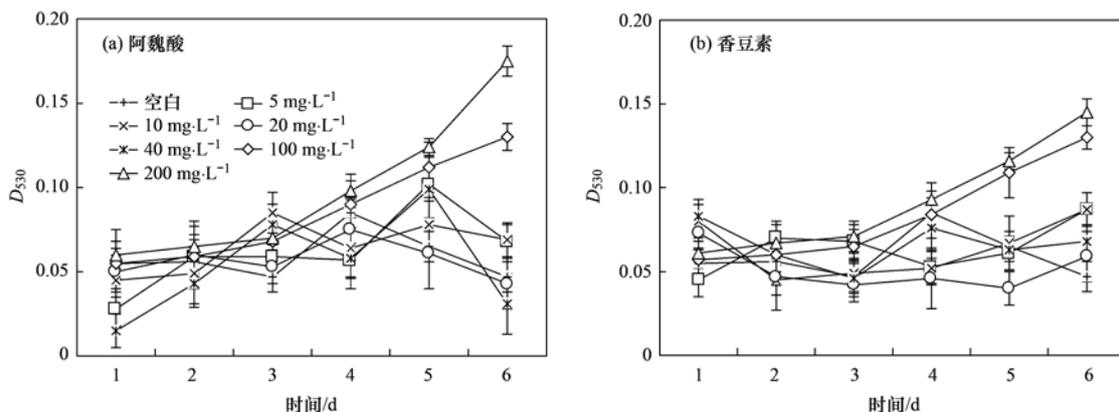


图3 不同浓度的阿魏酸和香豆素对超氧阴离子自由基 O_2^- 含量的影响($n=3$)

Fig. 3 Effects of different concentrations of ferulic acid and coumarin on the superoxide anion radical O_2^- value of *Microcystis aeruginosa* ($n=3$)

2.4 阿魏酸和香豆素对铜绿微囊藻光合作用的影响

图4为阿魏酸和香豆素对铜绿微囊藻叶绿素a含量的影响,其变化规律与藻密度变化趋势基本一致.从中可知,对照组叶绿素a浓度呈S型曲线,低浓度阿魏酸和香豆素($\leq 40 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)实验组,随着胁迫作用时间的增加,叶绿素a浓度不断升高,与低浓度时铜绿微囊藻密度快速增大一致,40 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 阿魏酸和香豆素实验组第6 d叶绿素a平均含量分别为对照组的1.76倍和2.34倍,在高浓度阿魏酸和香豆素($\geq 100 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)胁迫作用下,叶绿素a含量不断降低,200 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 阿魏酸和香豆素实验组第6 d

叶绿素a平均含量分别降低至 $0.25 \times 10^3 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $0.56 \times 10^3 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$,藻细胞的光合作用能力明显降低,表明藻的生长状况受到严重影响,这与实验过程中藻液颜色逐渐变黄的现象一致.

由图4可知,在低浓度阿魏酸和香豆素胁迫作用下,叶绿素a含量急剧上升,香豆素实验组叶绿素a含量增加较阿魏酸实验组明显,而高浓度的香豆素对叶绿素a含量抑制作用弱于阿魏酸,叶绿素a含量变化与铜绿微囊藻生长状况基本对应,而其含量的降低可能与藻细胞数量减少或者化感物质抑制叶绿素a合成或导致叶绿素a分解有关^[16,26].

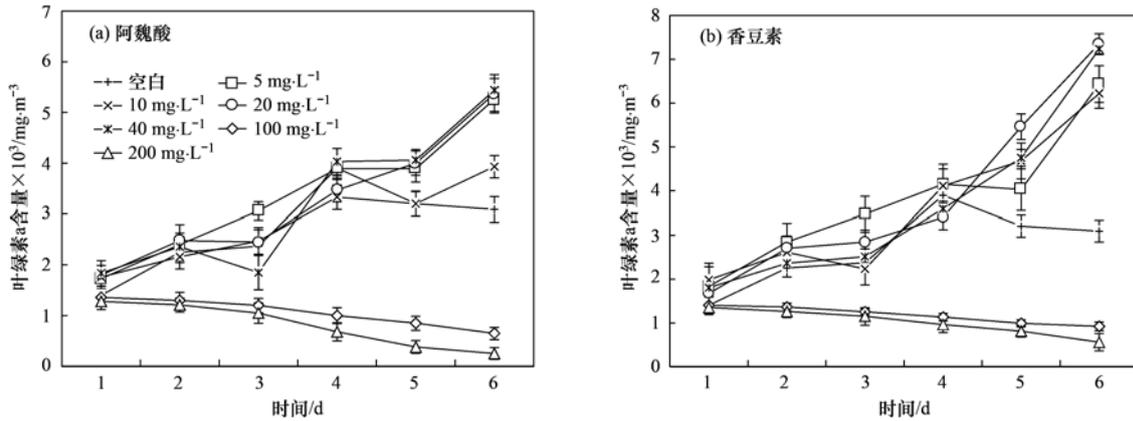


图 4 不同浓度的阿魏酸和香豆素对叶绿素 a 含量的影响 ($n=3$)

Fig. 4 Effects of different concentrations of ferulic acid and coumarin on the chlorophyll-a content of *Microcystis aeruginosa* ($n=3$)

2.5 阿魏酸和香豆素种子发芽实验

由表 1 可以看出,6 种浓度的阿魏酸对种子萌发无任何影响,而 $100 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 及 $200 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的香豆素对种子发芽有抑制作用,经过这两种高浓度香豆素作用的种子发芽率均为 50%,随后观察 96 h 发芽种子生长情况, $100 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $200 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 香豆素实验组发芽种子全部死亡,而 6 种浓度的阿魏酸实验组发芽种子生长良好,说明阿魏酸较香豆素的毒性小。

表 1 不同浓度阿魏酸和香豆素 48 h 水稻种子发芽率

Table 1 48 h germination rate of rice seeds at different concentrations of ferulic acid and coumarin

| 阿魏酸浓度 $/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ | 48 h 种子平均 发芽率/% | 香豆素浓度 $/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ | 48 h 种子平均 发芽率/% |
|---|--------------------|---|--------------------|
| 0 | 100 | 0 | 100 |
| 5 | 100 | 5 | 100 |
| 10 | 100 | 10 | 100 |
| 20 | 100 | 20 | 100 |
| 40 | 100 | 40 | 100 |
| 100 | 100 | 100 | 50 |
| 200 | 100 | 200 | 50 |

3 结论

阿魏酸和香豆素抑藻机制相似,通过改变细胞膜通透性,增加 O_2^- 含量、降低叶绿素 a 含量等作用抑制铜绿微囊藻的生长,阿魏酸抑藻效果好于香豆素,其原因可能为两者的化学结构不同,阿魏酸易氧化,并伴随其氧化过程中产生 O_2^- ,因而更易干扰藻细胞代谢功能从而抑制藻细胞生长。阿魏酸和香豆素的抑藻效果及对种子发芽的影响可为选取高效安全的抑藻剂提供一定的参考。

参考文献:

- [1] 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.

- [2] Ni L X, Acharya K, Hao X Y, et al. Isolation and identification of an anti-algal compound from *Artemisia annua* and mechanisms of inhibitory effect on algae[J]. Chemosphere, 2012, 88(9): 1051-1057.
- [3] Wang J, Zhu J Y, Liu S P, et al. Generation of reactive oxygen species in cyanobacteria and green algae induced by allelochemicals of submerged macrophytes[J]. Chemosphere, 2011, 85(6): 977-982.
- [4] 李锋民, 胡洪营. 植物化感作用控制天然水体中有害藻类的机理与应用[J]. 给水排水, 2004, 30(2): 1-4.
- [5] Nakai S, Inoue Y, Hosomi M, et al. *Myriophyllum spicatum*-released allelopathic polyphenols inhibiting growth of blue-green algae *Microcystis aeruginosa* [J]. Water Research, 2000, 34(11): 3026-3032.
- [6] 李霞. 酚类化合物对植物的化感作用[J]. 长春师范学院学报(自然科学版), 2006, 25(2): 40-42.
- [7] Aliotta G, Cafeoro G, Fiorentino A, et al. Inhibition of radish germination and root growth by Coumarin and Phenylpropanoids [J]. Journal of Chemical Ecology, 1993, 19(2): 175-183.
- [8] 张庭廷, 吴安平, 何梅, 等. 酚酸类物质对水华藻类的化感作用及其机理[J]. 中国环境科学, 2007, 27(4): 472-476.
- [9] 王化. 香豆素对水稻化感作用机制的研究[D]. 长春: 东北师范大学, 2006. 5-6.
- [10] 钱芸, 戴树桂, 刘广良, 等. 硝酸镧对铜绿微囊藻生长特性的影响[J]. 中国环境科学, 2003, 23(1): 7-11.
- [11] 王蕾, 石利利, 蔡道基. 蓝藻水华优势藻高效防控铜制剂的筛选[J]. 生态与农村环境学报, 2011, 27(1): 60-64.
- [12] 黄宏, 王晓栋, 郁亚娟, 等. 部分苯衍生物对黄瓜种子发芽率的抑制毒性及 QSAR 研究[J]. 环境化学, 2004, 23(1): 75-79.
- [13] 林少君, 贺立静, 黄沛生, 等. 浮游植物中叶绿素 a 提取方法的比较与改进[J]. 生态科学, 2005, 24(1): 9-11.
- [14] 陈建勋, 王晓峰. 植物生理学实验指导[M]. 广州: 华南理工大学出版社, 2002. 119-129.
- [15] 耿小娟, 范勇, 王晓青, 等. 水葫芦化感物质 N-苯基-2-萘胺对铜绿微囊藻生长的影响[J]. 四川大学学报(自然科学版), 2009, 46(5): 1493-1496.

- [16] 傅海燕, 柴天, 赵坤, 等. 水网藻种植水对铜绿微囊藻生长的抑制作用研究[J]. 环境科学, 2012, **33**(5): 1564-1569.
- [17] 高云霓, 刘碧云, 王静, 等. 苦草(*Vallisneria spiralis*)释放的酚酸类物质对铜绿微囊藻(*Microcystis aeruginosa*)的化感作用[J]. 湖泊科学, 2011, **23**(5): 761-766.
- [18] 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.
- [19] Allen R D. Dissection of oxidative stress tolerance using transgenic plants[J]. *Plant Physiology*, 1995, **107**(4): 1049-1054.
- [20] Zhang T T, Zheng C Y, Hu W, *et al.* The allelopathy and allelopathic mechanism of phenolic acids on toxic *Microcystis aeruginosa*[J]. *Journal of Applied Phycology*, 2010, **22**(1): 71-77.
- [21] Li F M, Hu H Y. Isolation and characterization of a novel antialgal allelochemical from *Phragmites communis*[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2005, **71**(11): 6545-6553.
- [22] 胡益勇, 徐晓玉. 阿魏酸的化学和药理研究进展[J]. 中成药, 2006, **28**(2): 253-255.
- [23] Vardi A, Schatz D, Beeri K, *et al.* Dinoflagellate-cyanobacterium communication may determine the composition of phytoplankton assemblage in a mesotrophic lake [J]. *Current Biology*, 2002, **12**(20): 1767-1772.
- [24] Landberg T, Greger M. Differences in oxidative stress in heavy metal resistant and sensitive clones of *Salix viminalis*[J]. *Journal of Plant Physiology*, 2002, **159**(1): 69-75.
- [25] 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.
- [26] 陈卫民, 张清敏, 戴树桂. 苦草与铜绿微囊藻的相互化感作用[J]. 中国环境科学, 2009, **29**(2): 147-151.

CONTENTS

| | |
|--|--|
| Water-soluble Inorganic Salts in Ambient Aerosol Particles in Tangshan | MIAO Hong-yan, WEN Tian-xue, WANG Li, <i>et al.</i> (1225) |
| Characterization of Water-soluble ions in PM _{2.5} at Dinghu Mount | ZHAO Ya-nan, WANG Yue-si, WEN Tian-xue, <i>et al.</i> (1232) |
| Characteristics of Mass Size Distributions of Water-Soluble Inorganic Ions During Summer and Winter Haze Days of Beijing | HUANG Yi-min, LIU Zi-ru, CHEN Hong, <i>et al.</i> (1236) |
| Characterising Seasonal Variation and Spatial Distribution of PM _{2.5} Species in Shenzhen | YUN Hui, HE Ling-yan, HUANG Xiao-feng, <i>et al.</i> (1245) |
| Characteristics of PAHs in the Atmosphere in Winter and Summer in the Urban and Suburban of Fuzhou | YI Zhi-gang, HUANG Xing-ran, BI Jun-qi, <i>et al.</i> (1252) |
| Seasonal Variation and Spatial Distribution of Typical Organochlorine Pesticides in the Atmosphere of Hexi Corridor and Lanzhou, Northwest China | DING Zhong-yuan, MAO Xiao-xuan, MA Zi-long, <i>et al.</i> (1258) |
| Simulation of Air Pollution Characteristics and Estimates of Environmental Capacity in Zibo City | XUE Wen-bo, WANG Jin-nan, YANG Jin-tian, <i>et al.</i> (1264) |
| Diurnal Changes in Greenhouse Gases at Water-Air Interface of Xiangxi River in Autumn and Their Influencing Factors | HUANG Wen-min, ZHU Kong-xian, ZHAO Wei, <i>et al.</i> (1270) |
| Influence of Human Activities on Groundwater Environment Based on Coefficient Variation Method | ZHAO Wei, LIN Jian, WANG Shu-fang, <i>et al.</i> (1277) |
| Nitrogen Non-Point Source Pollution Identification Based on ArcSWAT in Changde River | DENG Ou-ping, SUN Si-yang, LÜ Jun (1284) |
| Study on the Content and Carbon Isotopic Composition of Water Dissolved Inorganic Carbon from Rivers Around Xi'an City | GUO Wei, LI Xiang-zhong, LIU Wei-guo (1291) |
| First Flush Effects of Storm Events of Baoxiang River in Lake Dianchi Watershed | GUO Huai-cheng, XIANG Nan, ZHOU Feng, <i>et al.</i> (1298) |
| Estimation of Releasing Fluxes of Sediment Phosphorus in the Three Gorges Reservoir During Late Autumn and Early Winter | NIU Feng-xia, XIAO Shang-bin, WANG Yu-chun, <i>et al.</i> (1308) |
| Distributions and Pollution Status of Heavy Metals in the Suspended Particles of the Estuaries and Coastal Area of Eastern Hainan | XIN Cheng-lin, REN Jing-ling, ZHANG Gui-ling, <i>et al.</i> (1315) |
| Environmental Characteristics of Heavy Metals in Surface Sediments from the Huanghe Estuary | WU Bin, SONG Jin-ming, LI Xue-gang (1324) |
| Distribution and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Sediments of Zhalong Wetland | YE Hua-xiang, ZANG Shu-ying, ZHANG Li-juan, <i>et al.</i> (1333) |
| Ecological Risk Evaluation of Heavy Metals of the Typical Dredged Mud in Shanghai | TANG Qing-li, CHENG Jin-ping, GAO Hao-min, <i>et al.</i> (1340) |
| Pollution Characteristics of Heavy Metals in Sludge from Wastewater Treatment Plants and Sludge Disposal in Chinese Coastal Areas | ZHANG Can, CHEN Hong, YU Yi-xuan, <i>et al.</i> (1345) |
| Comparison of the Estrogenic Activity of Organic Compounds in Source Water and Finished Water from the Yangtze River and Taihu Lake in Certain Areas of Jiangsu Province | JIN Tao, LÜ Xue-min, ZENG Yi-fan, <i>et al.</i> (1351) |
| Occurrence and Fate of Phthalates in Wastewater Treatment Plants in Beijing, China | ZHOU Yi-qi, LIU Yun-xia (1357) |
| Research on Sludge Toxicity Caused by DMF Biodegradation and Toxicity Spatial Distribution in Sludge Floes | HU Yuan-yuan, YANG Na, DING Yi, <i>et al.</i> (1363) |
| Study on the Ecological Risk of Wild Veined Rapa Whelk (<i>Rapana venosa</i>) Exposed to Organotin Compounds in Bohai Bay, China | AN Li-hui, ZHANG Yan-qiang, SONG Shuang-shuang, <i>et al.</i> (1369) |
| Bioaccumulation of Mercury in <i>Crassostrea</i> sp. Exposed to Waste Seawater Discharged from a Coal-fired Power Plant Equipped with a Seawater Flue-gas Desulfurization System | LIU Xi-yao, YUAN Dong-xing, CHEN Yao-jin (1374) |
| Effects of Imidazolium Chloride Ionic Liquids on the Acute Toxicity and Weight of Earthworm | HUANG Ruo-nan, FAN Jun-jie, TU Hong-zhi, <i>et al.</i> (1380) |
| Influencing Factors and Mechanism of Arsenic Removal During the Aluminum Coagulation Process | CHEN Gui-xia, HU Cheng-zhi, ZHU Ling-feng, <i>et al.</i> (1386) |
| Removal of DON in Micro-polluted Raw Water by Coagulation and Adsorption Using Activated Carbon | LIU Bing, YU Guo-zhong, GU Li, <i>et al.</i> (1392) |
| Mechanism of Catalytic Ozonation for the Degradation of Paracetamol by Activated Carbon | WANG Jia-yu, DAI Qi-zhou, YU Jie, <i>et al.</i> (1402) |
| Reductive Degradation of Chlorophenols in Aqueous Solution by Gamma Irradiation | PENG Yun-xia, HE Shi-jun, GONG Wen-qi, <i>et al.</i> (1411) |
| Effect of C/N Ratio on Nitrite Accumulation During Denitrification Process | YUAN Yi, HUANG Yong, DENG Hui-ping, <i>et al.</i> (1416) |
| Nitrous Oxide Emission During Denitrification for Activated Sludge Acclimated with Methanol as the Organic Carbon | ZHAI Xiao-feng, JIANG Cheng-ai, WU Guang-xue, <i>et al.</i> (1421) |
| Comparison and Optimization of Cellulose Carbon Source for Denitrification Filter | LI Bin, HAO Rui-xia (1428) |
| A Novel Municipal Wastewater Treating Process for Energy Production and Autotrophic Nitrogen Removal Based on ANAMMOX | LU Jian-cong, GAO Da-wen, SUN Xue-ying (1435) |
| Modeling and Dynamic Simulation of the Multimode Anaerobic/Anoxic/Aerobic Wastewater Treatment Process | ZHOU Zhen, WU Zhi-chao, WANG Zhi-wei, <i>et al.</i> (1442) |
| Comparing Microbial Community of High Ammonia Wastewater and Municipal Sewage in a Partial Nitrification System | ZHAO Zhi-rui, MA Bin, ZHANG Shu-jun, <i>et al.</i> (1448) |
| Analysis of the Fractal Structure of Activated Sludge Floes | RUAN Xiao-dong, LIU Jun-xin (1457) |
| Rapid Cultivation of Aerobic Nitrifying Granular Sludge with Alternate Loading Method | SHEN Na, YANG Chang-zhu, PU Wen-hong, <i>et al.</i> (1464) |
| Acceleration of the Formation of Aerobic Granules in SBR by Inoculating Different Proportions and Different Diameters of Mature Aerobic Granules | XIONG Guang-cheng, PU Wen-hong, YANG Chang-zhu (1472) |
| Mechanisms of the Improvement in Dewaterability of Alkaline Fermented Sludge by Simultaneous Ammonium and Phosphate Recovery | ZHANG Chao, CHEN Yin-guang, GU Guo-wei (1479) |
| Use of Flow Cytometric Sorting to Assess the Diversity of Eukaryotic Picophytoplankton of Lakes | XIE Wei-wei, GONG Yi, WANG Zhi-wei, <i>et al.</i> (1485) |
| Allelopathy Effects of Ferulic Acid and Coumarin on <i>Microcystis aeruginosa</i> | GUO Ya-li, FU Hai-yan, HUANG Guo-he, <i>et al.</i> (1492) |
| Spatiotemporal Characteristics of Zooplankton Community Structure and Diversity in the Strong Temperature Increment Seawaters near Guohua Power Plant in Xiangshan Bay | ZHU Yi-feng, HUANG Jian-yi, LIN Xia, <i>et al.</i> (1498) |
| Screening of Epoxy-degrading Halophiles and Their Application in High-salt Wastewater Treatment | WANG Jin, XU Zhen, PENG Shu-chuan, <i>et al.</i> (1510) |
| Biodegradation of Decabromodiphenyl Ether by Intracellular Enzyme Obtained from <i>Pseudomonas aeruginosa</i> | SHI Guang-yu, YIN Hua, YE Jin-shao, <i>et al.</i> (1517) |
| Influence of Yeast Extract on the Fermentation of Glucose by the Demulsifying Strain <i>Alcaligenes</i> sp. S-XJ-1 | HUANG Xiang-feng, WANG Kai, LI Ming-xia, <i>et al.</i> (1524) |
| Phylogenetic Analysis of Methanogenic Corn Stalk Degrading Microbial Communities | QIAO Jiang-tao, GUO Rong-bo, YUAN Xian-zheng, <i>et al.</i> (1531) |
| Inhibition of Methanogenium by Erythromycin and Its Domestation | LIU Zi-xu, SUN Li-ping, LI Yu-you, <i>et al.</i> (1540) |
| Sand Box Study on Fingering Front Morphology for NAPLs Infiltrated in Homogeneous Porous Media | YANG Bin, LI Hui-ying, WU Bin, <i>et al.</i> (1545) |
| Vertical Distribution and Possible Sources of Polycyclic Aromatic Hydrocarbon in Sewage Area Soil | YAO Lin-lin, ZHANG Cai-xiang, LI Jia-le, <i>et al.</i> (1553) |
| Characteristic and Evaluation of Soil Pollution by Heavy Metal in Different Functional Zones of Hohhot | GUO Wei, SUN Wen-hui, ZHAO Ren-xin, <i>et al.</i> (1561) |
| Distribution Characteristics of Rice Photosynthesized Carbon in Soil Aggregates of Different Size and Density | LI Miao-miao, NIE San-an, CHEN Xiao-juan, <i>et al.</i> (1568) |
| Profile of Soil Microbial Biomass Carbon in Different Types of Subtropical Paddy Soils | SHENG Hao, ZHOU Ping, YUAN Hong, <i>et al.</i> (1576) |
| Effect of Composting Organic Fertilizer Supplies on Hexachlorobenzene Dechlorination in Paddy Soils | LIU Cui-ying, JIANG Xin (1583) |
| Remediation of Cu-Pb-Contaminated Loess Soil by Leaching with Chelating Agent and Biosurfactant | LIU Xia, WANG Jian-tao, ZHANG Meng, <i>et al.</i> (1590) |
| Effects of Different Temperatures Biochar on Adsorption of Pb(II) on Variable Charge Soils | JIANG Tian-yu, JIANG Jun, XU Ren-kou, <i>et al.</i> (1598) |
| Preparation and Performance Investigation of <i>Trichoderma viride</i> -Modified Corn Stalk as Sorbent Materials for Oil Spills | LAN Zhou-lin, PENG Dan, GUO Chu-ling, <i>et al.</i> (1605) |
| Removal of PO ₄ ³⁻ from Solution, Wastewater and Seawater by Modification and Granulation Magnesium and Aluminium Layered Double Hydroxide | XING Kun, WANG Hai-zeng (1611) |
| Influence of Carboxylic Carbon Nanotube Supported Platinum Catalyst on Cathode Oxygen Reduction Performance of MFC | TU Li-xing, ZHU Neng-wu, WU Ping-xiao, <i>et al.</i> (1617) |
| Flue Gas Desulfurization by a Novel Biomass Activated Carbon | LIU Jie-ling, TANG Zheng-guang, CHEN Jie, <i>et al.</i> (1623) |
| Method for Grading Industrial Sectors in Energy Consumption and Its Application | MAO Jian-su, MA Lan (1628) |
| Dynamics and Environmental Load of Food Carbon Consumption During Urbanization: A Case Study of Xiamen City, China | YAN Zhen, CUI Sheng-hui, LI Gui-lin, <i>et al.</i> (1636) |

《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)

2013年4月15日 34卷 第4期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 34 No. 4 Apr. 15, 2013

| | | | | |
|---------|---|------------------|----|--|
| 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. sciencep. com | Distributed | by | Science Press Tel: 010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. 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: 90.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行