

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2019

Vol.40 No.8

第40卷 第8期

目次

2016年京津冀地区红色预警时段PM _{2.5} 污染特征与浓度控制效果	张冲, 郎建奎, 程水源, 王晓琦 (3397)
北京地区秋冬季大气污染特征及成因分析	徐冉, 张恒德, 杨孝文, 程水源, 张天航, 江琪 (3405)
合肥市PM _{2.5} 和PM ₁₀ 中元素组成特征及重污染成因分析	刘可可, 张红, 刘桂建 (3415)
濮阳市秋冬季大气细颗粒物污染特征及来源解析	陈楚, 王体健, 李源昊, 马红磊, 陈璞琰, 王德羿, 张元勋, 乔琦, 李光明, 王文红 (3421)
关中地区细颗粒物碳组分特征及来源解析	康宝荣, 刘立忠, 刘煥武, 李养养, 艾双双, 曹宁, 雷颖 (3431)
长春季细颗粒物中有机气溶胶组成特征及来源	吴瑕, 曹芳, 翟晓瑶, 范美益, 张世春, 章炎麟 (3438)
中国城市扩张及空间特征变化对PM _{2.5} 污染的影响	王桂林, 张炜 (3447)
不同湿法脱硫工艺对燃煤电厂PM _{2.5} 排放的影响	邓建国, 马子珍, 李振, 段雷, 蒋靖坤 (3457)
浙江省合成革行业挥发性有机物污染特征及排放系数	徐佳琦, 王浙明, 宋爽, 徐志荣, 姚轶 (3463)
生活垃圾填埋场细菌气溶胶粒径分布及种群特征	马嘉伟, 杨凯雄, 柴风光, 王莹, 郭雪松, 李琳 (3470)
青岛近海生物气溶胶中总微生物的分布特征	官静, 祁建华, 李鸿涛 (3477)
广州饮用水水源地多环芳烃分布、来源及人体健康风险评价	宋玉梅, 王畅, 刘爽, 潘佳钊, 郭鹏然 (3489)
截污调水后滇池表层沉积物中16种PAHs的分布特征	胡昕怡, 高冰丽, 陈坦, 王洪涛, 金军, 饶竹, 朱雪芹, 王雪郡, 魏抱楷, 战楠, 刘彦廷, 戚敏 (3501)
黄河三角洲石油开采区盐渍化农田土壤多环芳烃的分布特征与源解析	邱慧, 刘月仙, 解小凡, 张萌, 王伟 (3509)
风场对太湖梅梁湾水华及营养盐空间分布的影响	余茂蕾, 洪国喜, 朱广伟, 权秋梅, 许海, 朱梦圆, 丁文浩, 李未, 吴挺峰 (3519)
向家坝水库营养盐时空分布特征及滞留效应	王耀耀, 吕林鹏, 纪道斌, 方海涛, 朱晓声, 张庆文, 霍静, 何金艳 (3530)
外源输入对底泥疏浚新生表层磷恢复及迁移的影响	李鑫, 耿雪, 王洪伟, 龚琬晴, 文帅龙, 钟继承, 李大鹏 (3539)
新疆喀什三角洲地下水SO ₄ ²⁻ 化学特征及来源	魏兴, 周金龙, 乃尉华, 曾妍妍, 范薇, 李斌 (3550)
黄土区洛川塬地下水化学特征及影响因素分析	李洲, 李晨曦, 华琨, 李志 (3559)
北京市河流秋季浮游动物群落特征分析	王海邻, 刘玉飞, 任玉芬, 贺玉晓, 王思琪, 张红星, 王效科, 李紫鑫 (3568)
三峡水库干流底栖硅藻群落组成及其与环境因子的关系	刘黎, 贺新宇, 付君珂, 杨燕君, 米文梅, 施军琼, 吴忠兴 (3577)
渭河流域水体细菌群落的环境响应及生态功能预测	万甜, 何梦夏, 任杰辉, 闫幸幸, 程文 (3588)
汾河下游水体nirS型反硝化细菌群落组成与无机氮关系	汪银龙, 冯民权, 董向前 (3596)
饮用水快速砂滤池优势微生物群落的代谢功能解析	胡万超, 赵琛, 王巧娟, 刘锐平, 柏耀辉 (3604)
基于污水厂污泥资源化利用的粗放型绿色屋顶水质控制效果	彭航宇, 李田, 齐悦, 何云鹏, 黄楚玉, 张卓然 (3612)
植被对绿色屋顶径流量和水质影响	章孙逊, 张守红, 张英, 吴思婷 (3618)
光催化/活性炭/纳滤组合工艺处理二级出水及对膜污染的控制	范科文, 李星, 杨艳玲, 周志伟 (3626)
多种材料对水中氨氮的吸附特性	焦巨龙, 杨苏文, 谢宇, 金位栋, 闫玉红, 徐彬 (3633)
不同氨氮浓度对4株常见藻株生长及酶活性的影响	常婷, 许智慧, 程鹏飞, 徐继林, 周成旭 (3642)
3种基质材料对高浓度养殖废水处理效果及降解过程	刘铭羽, 夏梦华, 李远航, 陈坤, 赵聪芳, 李希, 李裕元, 吴金水 (3650)
铝污泥酸化提取液改性沸石的除磷特性及机制	韩芸, 胡玉洁, 连洁, 杨思哲, 齐泽宁 (3660)
缺氧MBBR耦合部分厌氧氨氧化强化城市生活污水深度脱氮	杨岚, 彭永臻, 李健伟, 高锐涛, 王茗, 李夕耀 (3668)
连续流系统中好氧段及沉淀段对污泥及其缺氧段脱氮能力的影响	薛欢婷, 袁林江, 刘小博, 孙恒锐 (3675)
FeS自养反硝化与厌氧氨氧化的耦合脱氮机制	马景德, 潘建新, 李泽敏, 王一显, 吴海珍, 韦朝海 (3683)
ANAMMOX体系中氨与硫酸盐的同步转化条件	董石语, 毕贞, 张文静, 黄勇 (3691)
全国城市污水处理厂中微生物群落的溯源分析	张冰, 吴林蔚, 文湘华 (3699)
不同溶解氧浓度下硝化工艺中微生物种群结构对比	刘文如, 顾广发, 宋小康, 杨殿海 (3706)
异养硝化细菌Acinetobacter junii NP1的同步脱氮除磷特性及动力学分析	杨奎, 陈宁, 任勇翔, 崔坤, 汪旭晖, 肖倩, 郭淋凯 (3713)
Type 0092丝状菌污泥微膨胀在短程硝化中的实现	高春娣, 安冉, 韩徽, 张娜, 任浩, 赵楠, 焦二龙, 彭永臻 (3722)
高盐高碱环境下硝化反硝化过程及N ₂ O产生特征	代伟, 赵剑强, 丁家志, 刘双 (3730)
生物炭对盐碱土壤氨挥发的影响	王一宇, 王圣森, 戴九兰 (3738)
两种土壤增效剂对稻田氨挥发排放的影响	周玉玲, 侯朋福, 李刚华, 王绍华, 杨林章, 薛利红, 丁艳锋 (3746)
承德市滦河流域土壤重金属地球化学基线厘定及其累积特征	孙厚云, 卫晓峰, 甘凤伟, 王恒, 何泽新, 贾凤超, 张竞 (3753)
厦门某旱地土壤垂直剖面中重金属迁移规律及来源解析	张炜华, 于瑞莲, 杨玉杰, 胡恭任, 崔建勇, 颜妍, 黄华斌 (3764)
宝鸡市区土壤重金属污染影响因子探测及其源解析	张军, 董洁, 梁青芳, 杨宁宁, 耿雅妮 (3774)
铁铈氧化物对土壤As(V)和P的稳定化效果	林龙勇, 阎秀兰, 杨硕 (3785)
铁锰氧化物在不同水分条件下对土壤As的稳定化作用	周海燕, 邓一荣, 林龙勇, 曹梦华, 钟立荣 (3792)
生物质炭对双季稻水稻土微生物生物量碳、氮及可溶性有机碳氮的影响	刘杰云, 邱虎森, 汤宏, 沈健林, 吴金水 (3799)
有机物料对紫色土微生物量碳、氮及氮素供应的影响	汪月, 张名豪, 赵秀兰 (3808)
土地利用方式对土壤团聚体稳定性和有机碳含量的影响	罗晓虹, 王子芳, 陆畅, 黄容, 王富华, 高明 (3816)
宁南山区退耕还林还草对土壤氮素组成及其转化酶活的影响	高涵, 肖礼, 牛丹, 倪银霞, 黄懿梅 (3825)
不同浸提剂条件下生物炭吸附性有机物的浸出规律	何品晶, 张昊昊, 仇俊杰, 邵立明, 吕凡 (3833)
基于成组生物毒性测试的PM _{2.5} 毒性	江晓栋, 薛银刚, 魏永, 许霞, 刘菲, 薛柯, 施昕澜, 顾铭 (3840)
《环境科学》征订启事 (3587)	
《环境科学》征稿简则 (3595)	
信息 (3611, 3705, 3745)	

不同氨氮浓度对4株常见藻株生长及酶活性的影响

常婷¹, 许智慧², 程鹏飞^{1*}, 徐继林², 周成旭¹

(1. 宁波大学食品与药学学院, 宁波 315211; 2. 宁波大学海洋学院, 宁波 315211)

摘要: 高氨氮问题是影响微藻处理养猪沼液的难点. 本文以筛选获得的衣藻、葡萄藻、紫球藻和栅藻为研究对象, 液体培养下模拟现实沼液废水, 分别于培养基中设置 50、500 和 2 000 mg·L⁻¹ 的氨氮浓度, 探究不同氨氮浓度对微藻生长及藻细胞酶活性的影响. 结果表明, 不同氨氮浓度下, 衣藻和栅藻的生长受到不同程度的抑制, 生物量和生物产率均低于正常培养基; 50 mg·L⁻¹ 氨氮下紫球藻的生物量和生物产率分别为 1.78 g·L⁻¹ 和 0.16 g·(L·d)⁻¹, 高于 KOCK 培养基; 500 mg·L⁻¹ 氨氮中葡萄藻的生物量和生物产率分别为 1.95 g·L⁻¹ 和 0.18 g·(L·d)⁻¹, 高于 BG11 培养基. 各藻种的 SOD、POD 和 CAT 均表现为随着氨氮浓度的升高, 活性最终呈下降的趋势, 丙二醛(MDA)亦然. 本研究期望为微藻处理高浓度氨氮沼液提供理论基础.

关键词: 微藻; 高氨氮; 沼液废水; 生长; 酶活性

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)08-3642-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.201811224

Effects of Different Concentrations of Ammonia Nitrogen on the Growth and Enzyme Activity of Four Common Algae Strains

CHANG Ting¹, XU Zhi-hui², CHENG Peng-fei^{1*}, XU Ji-lin², ZHOU Cheng-xu¹

(1. College of Food and Pharmaceutical Sciences, Ningbo University, Ningbo 315211, China; 2. School of Marine Sciences, Ningbo University, Ningbo 315211, China)

Abstract: Treating swine wastewater with a high ammonia nitrogen content with microalgae cultures has proved difficult. In this paper, the strains *Chlamydomonas* 715, *Botryococcus braunii* 357, *Porphyridium cruentum* 806, and *Scenedesmus obliquus* 417 were tested. Ammonia nitrogen concentrations of 50 mg·L⁻¹, 500 mg·L⁻¹, and 2 000 mg·L⁻¹ applied to the media according to the concentrations of biogas slurry. This allowed the effect of different concentrations of ammonia nitrogen on the growth and cell enzyme activity of microalgae to be tested. The results showed that the growth of *Chlamydomonas* 715 and *Scenedesmus obliquus* 417 was inhibited at different concentrations of ammonia nitrogen, and the biomass and biomass productivities were lower than for the normal media. However, the biomass and biomass productivity of *Porphyridium cruentum* 806 in 50 mg·L⁻¹ ammonia nitrogen were 1.78 g·L⁻¹ and 0.16 g·(L·d)⁻¹, respectively, which were higher than the values obtained using KOCK medium. Furthermore, the biomass and biomass productivity of *Botryococcus braunii* 357 in 500 mg·L⁻¹ ammonia nitrogen were 1.95 g·L⁻¹ and 0.18 g·(L·d)⁻¹, respectively, which were higher than the values obtained using BG11 medium. The SOD, POD, and CAT of all algae species showed a decreasing tendency in response to an increase in the concentration of ammonia nitrogen, as did MDA. These results provide a theoretical basis for the treatment of swine wastewater with high ammonia nitrogen content using microalgae cultures.

Key words: microalgae; high ammonia nitrogen; swine wastewater; growth; enzymatic activity

我国是猪业生产的第一大国, 近年来, 随着国家经济的快速发展, 养猪业在技术水平、规模化程度等方面也得到了一定的进步和提高, 但经济效益增加的同时也衍生了一系列环境问题, 如养猪业沼气工程在提供清洁能源的同时, 还产生了大量的沼渣和沼液废水, 富营养化的沼液废水对水环境和人类健康产生了严重的危害^[1, 2]. 猪场废水具有有机物、悬浮物浓度高, 富含高氨氮, 处理难度大等特点^[3]. 目前我国规模化养猪场的废水一般采用厌氧-好氧组合工艺进行处理, 然而该方法处理后的沼液中难降解的有机物、氮磷浓度等仍然很高. 且当碳氮比较低时, 采用一些接触氧化法、SBR法和氧化沟法等方法处理后, 效果不太理想, 运行不稳定, 建设成本较高, 难以在工程中实际运用^[2]. 国内外对养猪沼液废水的处理已有大量研究, 研究人员也相继开发了不同的养猪沼液废水处理工艺, 但

传统的处理方式虽能在一定程度上达到除污的目的, 同时也带来了二次污染. 因此, 微藻对养猪沼液废水高效、经济地处理工艺对环境改善与资源化利用都有一定意义^[4].

微藻是一种结构简单的光合水生植物, 它能够高效地进行光合作用, 将太阳能转化为可利用的化学能. 微藻具有分布广泛, 生长速度快, 产率高, 蛋白质、油脂和多糖等附加值含量高等优点^[5]. 大部分微藻属于光合自养型, 微藻细胞能够利用水体中 N、P 及微量元素进行光能自养生长^[6]. 微藻的

收稿日期: 2018-11-27; 修订日期: 2019-02-22

基金项目: 国家自然科学基金项目(31560724); 中国博士后科学基金项目(2017T100583, 2016M600616); 江西省自然科学基金项目(20171BAB214014); 鄱阳湖湿地与流域研究教育部重点实验室开放课题项目(PK2017001)

作者简介: 常婷(1994~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为高值藻类的筛选及其功能性产品, E-mail: ctmymelody@sina.com

* 通信作者, E-mail: chengpengfei@nbu.edu.cn

生长对废水的水质情况要求较低，可以利用光能富集水体中的氮、磷等营养物质，同时利用二氧化碳为碳源合成有机物，将无机盐以有机物的形式储存在藻细胞中^[7]。

沼液是畜禽粪污经厌氧发酵后的产物，含有氨氮浓度范围约在 17 ~ 2 050 mg·L⁻¹。国家废水排放氨氮标准浓度为 80 mg·L⁻¹，珠三角沼液废水排放氨氮标准浓度为 70 mg·L⁻¹，应用新技术处理养猪污水时，自污水净化系统开始运行后，对系统中各个单元的净化功能进行较长时间的现场观测，当到达最后一个净化系统氧化塘时氨氮平均值为 53.7 mg·L⁻¹^[8]。

微藻种类多样、适应性强，能够在多种生态环境中生长。养猪沼液中富含碳源和氮源等，可为微藻的生长提供养料。微藻净化沼液能够同时降低沼液中的营养成分和有机物。将猪粪沼液废水净化与微藻的培养相结合，有望达到排放标准，还可降低猪粪沼液废水处理成本。微藻在完成自身细胞的增殖与营养物质积累的同时，实现了沼液废水的无害化处理和微藻生物质高附加值的资源化利用^[8-10]。但实际利用沼液废水培养微藻时，过高浓度的 NH₄⁺-N 会超出微藻的耐受性，抑制藻细胞的生长，高氨氮问题是利用微藻处理沼液废水的难点^[11]。沼液废水中高浓度的氨氮对藻细胞的毒害作用主要是抑制藻细胞的光合系统，而这一过程可通过藻细胞内的抗氧化体系来反映。但是不同藻株对不同高氨氮浓度的适应性不同，而藻株的特性与应用价值也是微藻处理沼液资源化利用考虑的方面^[12, 13]。

基于上述背景，本文以前期筛选获得的衣藻、葡萄藻、紫球藻和栅藻为研究对象，通过液体培

养，模拟沼液废水浓度于培养基中设置不同氨氮浓度，探讨各藻株在不同氨氮浓度下的生长状况，寻找近似沼液废水氨氮浓度下的优势藻种，并讨论在高氨氮沼液废水中各藻种 SOD、POD、CAT、GR 酶活性及 MDA 含量的变化，以期微藻处理沼液废水提供理论基础。

1 材料与方法

1.1 藻株来源与培养

本实验所用藻种购于湖北武汉中国科学院水生生物研究所，藻种培养过程所用培养基为 BG11、SE + TAP 和 KOCK，其中衣藻的培养基为 SE + TAP；紫球藻的培养基为 KOCK；其他藻种为 BG11^[14-16]。

实验液体培养所用反应器为玻璃柱式反应器，内直径 0.05 m，柱高 0.55 m，反应体积 0.9 L。反应器内部布置直径 5 mm 的玻璃通气管，通入混合有 1.5% CO₂ (体积分数) 的压缩空气 (0.1 MPa)，以 1 mL·s⁻¹ 的速率通过通气管从反应器底部曝气，使藻液搅动并补充碳源。经过前期研究证实，在光照强度 80 ~ 100 μmol·(m²·s)⁻¹ 下，微藻的藻细胞生长较好。为了考察藻细胞生长的最高效率，微藻培养过程中连续光照，培养柱表面光强 100 μmol·(m²·s)⁻¹，培养温度 (25 ± 1) °C。

1.2 沼液废水

本文藻种培养所用沼液废水取自江西省九江市境内某养殖场经厌氧发酵后的典型沼液废水，取水时间为 2018 年 4 月 12 日 10:00。废水经自然沉降 2 d 后，取上清液测定其初始氨氮 (NH₄⁺-N)、Cu²⁺、总磷 (TP) 和 COD 等各指标 (表 1)。

表 1 沼液废水的参数指标

Table 1 Features of the raw piggery wastewater								
项目	Fe ²⁺	Cu ²⁺	Zn ²⁺	TP	NH ₄ ⁺ -N	SS	COD	BOD
参数值/mg·L ⁻¹	0.56	0.96	0.44	42.40	506.00	486.00	663.00	342.00

1.3 氨氮浓度的设置

本实验使用 NH₄Cl 作为 N 源，沼液是畜禽粪污经厌氧发酵后的产物，含有氨氮浓度范围为 17 ~ 2 050 mg·L⁻¹。国家废水排放氨氮标准浓度为 80 mg·L⁻¹，珠三角沼液废水排放氨氮标准浓度为 70 mg·L⁻¹，应用新技术处理养猪污水时，自污水净化系统开始运行后，对系统中各个单元的净化功能进行较长时间的现场观测，当到达最后一个净化系统氧化塘时氨氮平均值为 53.7 mg·L⁻¹^[17]。

以此为基准，分别添加不同的 NH₄Cl 浓度，使得本实验所用培养基中氨氮终浓度分别为：低浓度

50 mg·L⁻¹、近似沼液废水浓度 500 mg·L⁻¹ 和高浓度 2 000 mg·L⁻¹。

1.4 藻细胞的生物量测定与生物产率计算

将 0.45 μm，直径 50 mm，面积为 0.001 m² 的醋酸纤维滤膜煮沸 3 次后，在 105 °C 烘箱中烘至恒重 (W₁)，将待测藻细胞 (DW, mg) 用移液器取 15 mL 藻样到抽滤装置内，抽滤至已称重的滤膜上，将附着藻的滤膜放入 105 °C 烘箱中烘至恒重 (W₂)，用分析天平称量，并计算藻细胞的生物量 (g·L⁻¹)。

DW = (W₂ - W₁)/15

基于本研究培养时间为 10 d，待测藻生物产率

[BP, $\text{g} \cdot (\text{L} \cdot \text{d})^{-1}$] 计算公式如下:

$$\text{BP} = \text{DW}/10$$

1.5 NH_4^+ -N、TP 和 COD 的测定方法

TP 测定采用钼酸铵分光光度法 (GB 11893-1989); NH_4^+ -N 的测定采用纳氏试剂分光光度法 (GB 7479-1987); COD 的测定采用重铬酸钾氧化处理法 (GB 11914-1989).

1.6 酶活性的测定方法

本次实验所用测定酶活性的方法, 试剂盒均购置于南京建成生物工程研究所.

采用黄嘌呤氧化酶法 (羧胺法) 测定 SOD: 超氧化物歧化酶活力通过黄嘌呤及黄嘌呤氧化酶反应系统产生超氧阴离子 ($\text{O}_2^{\cdot -}$), $\text{O}_2^{\cdot -}$ 可还原氮蓝四唑生成蓝色甲臍, 后者在 560 nm 处有吸收; SOD 可清除 $\text{O}_2^{\cdot -}$, 从而抑制了甲臍的形成;

采用愈创木酚法测定过氧化物酶 (POD) 活性: 该方法可催化过氧化氢氧化酚类和胺类化合物, 具有消除化氢和酚类、胺类毒性的双重作用. POD 催化 H_2O_2 氧化特定底物, 在 470 nm 有特征光吸收.

过氧化氢酶 (CAT) 的原理在于 H_2O_2 在 240 nm 下有特征吸收峰, CAT 能够分解 H_2O_2 , 使反应溶液 240 nm 下的吸光度随反应时间而下降, 根据吸光度的变化率可计算出 CAT 活性.

谷胱甘肽还原酶 (GR) 的原理在于 GR 能催化 NADPH 还原 GSSG 再生 GSH, 同时不断消耗 NADPH 生成 NADP⁺; NADPH 在 340 nm 有特征吸收峰; 通过测定 340 nm 吸光度下降速率; 来测定 NADPH 脱氢速率, 从而计算 GR 活性.

丙二醛 (MDA) 的测定采用可见分光光度法, MDA 与硫代巴比妥酸缩合, 生成红色产物, 在 532 nm 有最大吸收峰; 同时测定 600 nm 下的吸光度, 利用 532 nm 与 600 nm 下的吸光度的差值计算 MDA 的含量.

2 结果与讨论

2.1 氨氮浓度对不同藻株生长的影响

一般而言, 氨氮易于被藻细胞吸收利用, 对氨氮的利用优于硝态氮和亚硝氮^[18, 19]. 利用正常培养基和不同氨氮浓度 50、500 和 2 000 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 培养衣藻 10 d 后 [图 1(a) 与图 2], 生物量由初始的 0.17 $\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 分别增加至 1.31、0.8、0.73 和 0.71 $\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$. 不同浓度下, 各组生物量的变化随着时间的延长而增加. 但是, 相比正常培养基, 不同浓度的氨氮处理都不同程度地抑制了衣藻的生长, 且随着氨氮浓度的增大和培养时间的延长, 它对衣藻的抑制作用也越来越大. 在培养的前 4 d, 衣藻在不

同浓度氨氮和 SE + TAP 培养基中生长状况相近, 但在第 6 ~ 10 d, 在 SE + TAP 培养基中衣藻的生长状况相比其他处理组生长较好. 在添加不同浓度 NH_4Cl 的培养基中, 微藻以较为缓慢趋势生长, 尤其在 500 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 2 000 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的氨氮浓度下藻细胞生长最为缓慢. 相对而言, 50 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 下衣藻的生长相对较好. 一定的氨氮浓度条件下微藻能较好地生长, 过低的氨氮浓度导致营养不足, 无法满足微藻的生长代谢^[20], 而过高的氨氮浓度则会产生较多铵离子, 从而无法迅速转移到氨基酸的合成中, 影响微藻的生长甚至死亡^[21]. 或许 50 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的浓度含量较低, 而其他的氨氮浓度超出了衣藻的耐受范围, 影响了藻细胞的生长.

从图 1(b) 中可以看出, 正常培养基和不同氨氮浓度条件中 (50、500 和 2 000 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$), 葡萄藻由初始生物量 0.16 $\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 分别增加至 1.88、1.63、1.95 和 1.18 $\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$, 其生物产率分别为 0.17、0.15、0.18 和 0.10 $\text{g} \cdot (\text{L} \cdot \text{d})^{-1}$ (图 2). 在培养前期 (0 ~ 2 d), 各处理组保持良好生长, 但 2 000 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 氨氮处理后的生物量明显低于其他组. 在 2 000 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 氨氮下, 葡萄藻一直保持较低增长速率, 可能是过高的氨氮浓度对葡萄藻的生长产生了一定的抑制作用^[21]. 而 50 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 500 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 氨氮中葡萄藻的生物量较高, 并且 500 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 氨氮中葡萄藻的生物量超出了 BG11 正常培养基的值. Maldonado 等^[22] 的研究发现, 氨氮浓度超过 100 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的培养液会影响葡萄藻的生长代谢, 但本实验研究中当培养基中氨氮浓度为 500 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 藻细胞的生长仍较好, 这或许与不同藻株的葡萄藻有关.

由图 1(c) 可知, 正常培养基和不同氨氮浓度条件下 (50、500 和 2 000 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$), 紫球藻由初始生物量 0.18 $\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 分别增长至 1.62、1.78、1.02 和 0.86 $\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$, 相应的生物产率分别为 0.14、0.16、0.08 和 0.07 $\text{g} \cdot (\text{L} \cdot \text{d})^{-1}$ (图 2). 培养前期, 各组均保持良好增长趋势, 在第 4 d, 500 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 2 000 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 氨氮中紫球藻的生物量明显低于正常培养基和 50 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的氨氮处理. 第 4 d 后, KOCK 培养基和 50 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 氨氮中紫球藻的生物量较高, 且生长速率较快; 而 500 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 2 000 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的氨氮浓度下紫球藻的生物量虽然保持增长状态, 但生长速率较为缓慢. 因此, 紫球藻对氨氮浓度更加敏感, 过高的氨氮浓度影响了紫球藻的生长, 导致紫球藻对铵态氮的吸收能力弱^[21]. 而 50 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的氨氮浓度较低, 为紫球藻的生长提供了一定的营养盐, 促进了紫球藻的生物量积累.

从图 1(d) 中可得知, 正常培养基和不同氨氮浓度条件中 (50 、 500 和 $2\,000\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$), 栅藻由初始生物量 $0.16\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 分别增长至 2.38 、 2.26 、 2.18 和 $1.46\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$, 其生物产率分别是 0.22 、 0.21 、 0.20 和 $0.13\text{ g}\cdot(\text{L}\cdot\text{d})^{-1}$ (图 2). 在培养前 6 d 内, BG11、 $50\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $500\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 氨氮中栅藻的生物量无明显差异, 而 $2\,000\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的氨氮对栅藻产生了一定的抑制作用. 第 6 d 后, BG11 生物量持续增长, $50\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $500\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 氨氮中栅藻的生物量略有下降, 之后增长速率与 BG11 基本一致. $2\,000\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 氨氮中栅藻的生物量增长较为缓慢, 可能因为 $2\,000\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的氨氮浓度超出了栅藻的承受范围, 对藻细胞生长产生了抑制作用^[21], 而低浓度的氨氮为栅藻的生长补充了一定的营养盐, 更有利于栅藻的生长^[20].

在本实验中, 各处理组藻种的生长情况存在较大差异, 对不同氨氮浓度表现出了不同的耐受性. 其中不同浓度氨氮下衣藻和栅藻的生物量均低于正常培养基的值, 受到了不同程度的抑制, 且在 $50\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $500\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 氨氮中栅藻的生物量比 BG11 培养基略低, 仅在 $2\,000\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 氨氮中抑制作用显著; 但相对 SE + TAP 培养基, 所有浓度的氨氮均对衣藻的生长产生了明显的抑制作用, 表明衣藻对氨氮耐受能力较差. 葡萄藻在 $500\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 氨氮中所得生物量高于 BG11 培养基, 紫球藻在 $50\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 氨氮中所得生物量高于 KOCK 培养基, $500\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 氨氮近似沼液废水浓度, 似乎葡萄藻更适合处理沼液废水, 但反观 4 种藻类在 $500\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 氨氮中的生物产率, 栅藻的生物产率为 $0.20\text{ g}\cdot(\text{L}\cdot\text{d})^{-1}$, 高于葡萄藻的 $0.18\text{ g}\cdot(\text{L}\cdot\text{d})^{-1}$.

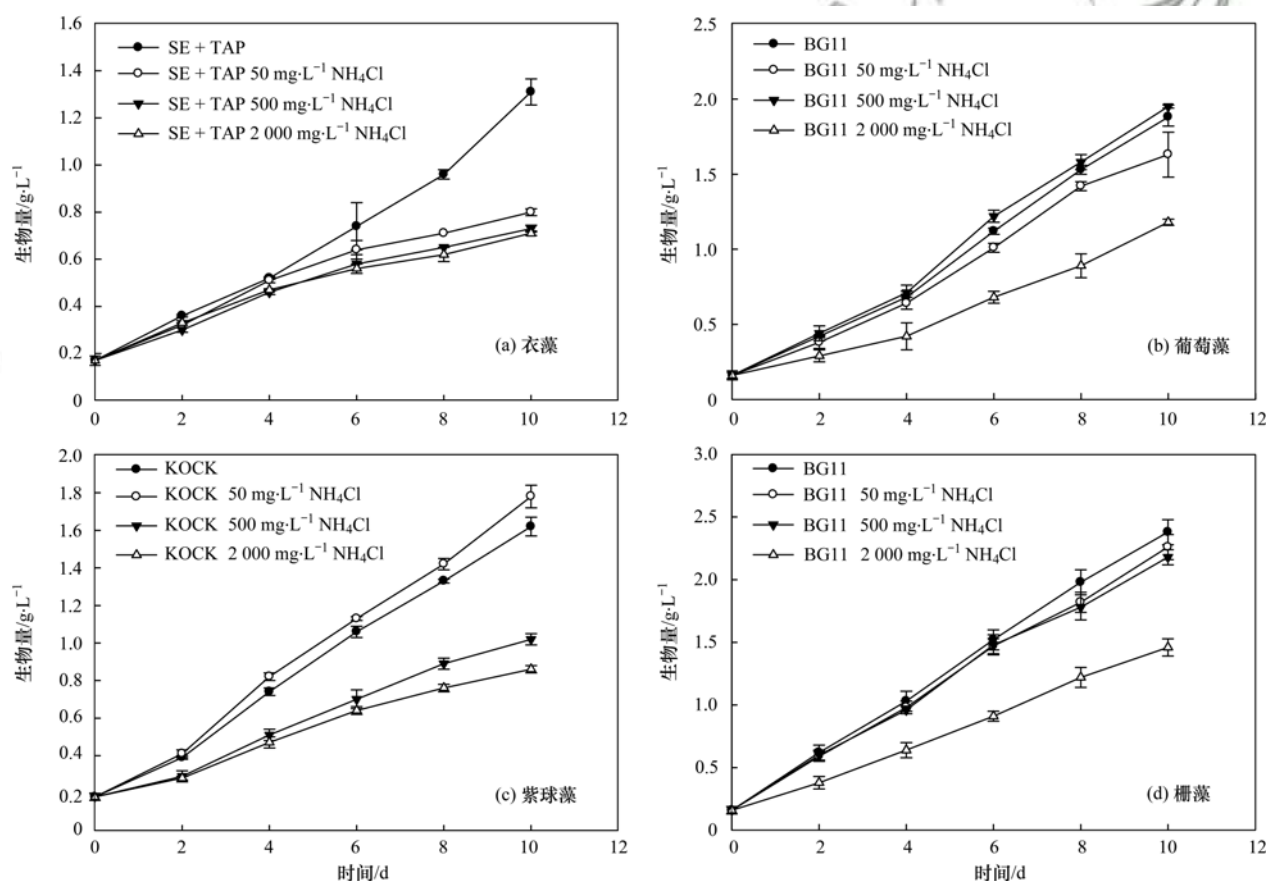


图 1 不同浓度氨氮下不同藻株的生物量

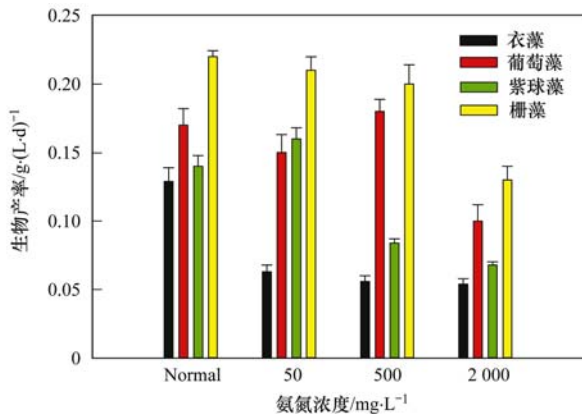
Fig. 1 Biomass of different algae under different concentrations of ammonia nitrogen

2.2 氨氮浓度对不同藻株酶活性的影响

植物在生命过程中不断产生活性氧, 同时又形成一个清除活性氧的防御系统, 即酶促系统和非酶促系统, 使植物体内活性氧的产生与清除之间维持在一个动态平衡状态^[23]. 活性氧酶促系统主要有超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)和过氧化氢酶(CAT)等. 这些酶活性在不同程度上反映了

植物抗性的强弱. 丙二醛(MAD)是膜脂质过氧化物的次级产物, 其含量变化可反映细胞脂质过氧化程度和损伤程度^[24].

不同氨氮浓度对各藻种藻细胞 POD 活性的影响如图 3(a) 所示. 正常培养基及 50 、 500 和 $2\,000\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 浓度的氨氮中葡萄藻 POD 活性分别为 1.80 、 0.12 、 3.10 和 $2.00\text{ U}\cdot\text{mg}^{-1}$; 紫球藻的 POD



“Normal”指正常培养基,下同

图2 不同浓度氨氮下不同藻株的生物产率

Fig. 2 Biomass productivities of different algae under different concentrations of ammonia nitrogen

活性分别为 0.28、1.02、0.22 和 0.18 $\text{U}\cdot\text{mg}^{-1}$, 随着氨氮浓度的升高, 活性呈下降的趋势, 且均低于正常培养基的值; 衣藻的 POD 活性分别为 0.61、4.03、0.12 和 0.10 $\text{U}\cdot\text{mg}^{-1}$, 活性亦呈下降的趋势; 栅藻的 POD 活性分别为 1.60、0.19、3.28 和 3.14 $\text{U}\cdot\text{mg}^{-1}$, 同葡萄藻的 POD 活性变化相近. 综上, 本实验的藻种中紫球藻、衣藻的 POD 活性随着氨氮浓度的升高而降低, 而葡萄藻、栅藻的 POD 活性呈现先升高后降低的趋势, 可能是因为抗氧化酶的活性因藻种的不同而存在一定的差异^[25].

超氧化物歧化酶(SOD)能消除生物体在新陈代谢过程中产生的自由基. 就图3(b)而言, 正常培养基及 50、500 和 2000 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 浓度的氨氮中葡萄藻的 SOD 活性分别为 1.55、2.66、2.00 和 0.88 $\text{U}\cdot\text{mg}^{-1}$; 紫球藻的 SOD 活性分别为 8.21、9.37、5.97 和 4.89 $\text{U}\cdot\text{mg}^{-1}$; 衣藻的 SOD 活性分别为 5.34、2.46、0.89 和 0.62 $\text{U}\cdot\text{mg}^{-1}$; 栅藻的 SOD 活性分别为 7.21、7.34、8.43 和 12.12 $\text{U}\cdot\text{mg}^{-1}$. 比较而言, 栅藻的 SOD 活性较高, 且活性随氨氮浓度的升高而升高, 但其它几种藻株的 SOD 活性均随着氨氮浓度的升高而降低, 这可能是因为氨氮降低了细胞代谢中去除活性氧的需求^[26].

不同藻株的 CAT 活性如图 3(c) 所示, 正常培养基及 50、500 和 2000 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 浓度的氨氮中葡萄藻的 CAT 活性分别为 627.35、242.72、102.46 和 40.36 $\text{U}\cdot\text{mg}^{-1}$; 紫球藻的 CAT 活性分别为 928.70、612.32、473.40 和 344.70 $\text{U}\cdot\text{mg}^{-1}$, 具有较高的 CAT 活性; 衣藻的 CAT 活性分别为 366.06、148.74、6.15 和 2.32 $\text{U}\cdot\text{mg}^{-1}$; 栅藻的 CAT 活性分别为 86.54、114.87、300.10 和 128.14 $\text{U}\cdot\text{mg}^{-1}$. 栅藻的 CAT 活性随氨氮浓度升高先升高后降低, 500 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 氨氮下活性最高, 而其他藻株则表现为随着

氨氮浓度的升高, CAT 的活性逐渐降低.

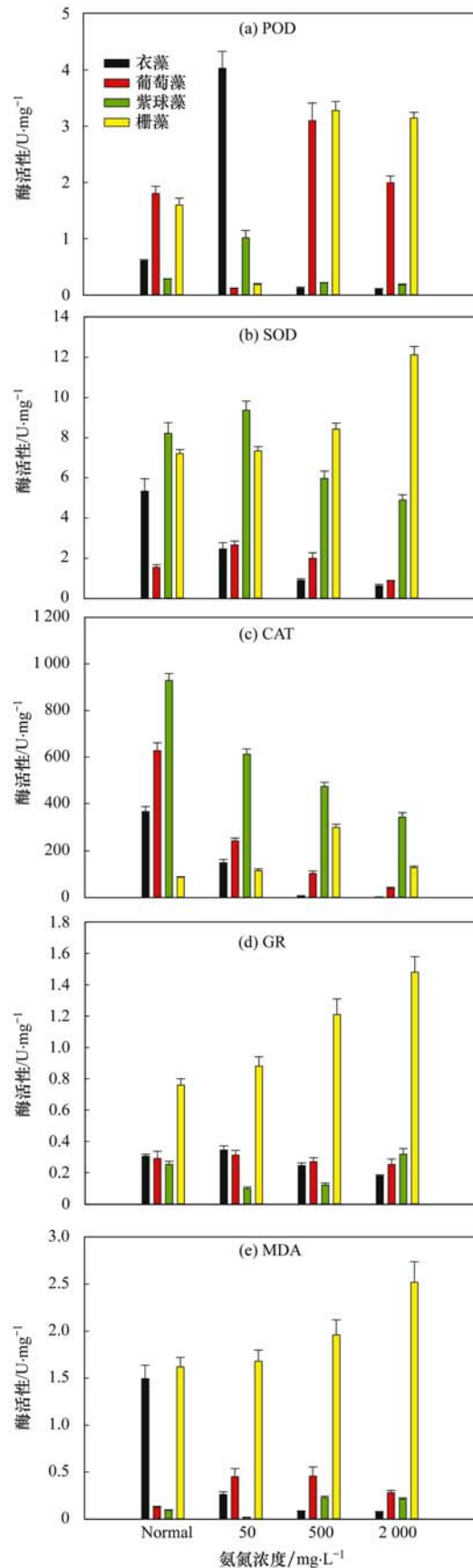


图3 不同浓度氨氮下不同藻株的酶活性及 MDA 含量

Fig. 3 Enzyme activity and MDA content of different algae under different concentrations of ammonia nitrogen

GR 的活性如图 3(d) 所示, 正常培养基及 50、500 和 2 000 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 浓度的氨氮中葡萄藻的 GR 活性分别为 0.29、0.31、0.27 和 0.25 $\text{U}\cdot\text{mg}^{-1}$; 紫球藻的 GR 活性分别为 0.25、0.10、0.12 和 0.32 $\text{U}\cdot\text{mg}^{-1}$; 衣藻的 GR 活性分别为 0.30、0.34、0.24 和 0.18 $\text{U}\cdot\text{mg}^{-1}$; 栅藻的 GR 活性分别为 0.76、0.88、1.21 和 1.48 $\text{U}\cdot\text{mg}^{-1}$, 其中葡萄藻、衣藻的 GR 活性随氨氮浓度升高而降低, 而紫球藻、栅藻的 GR 活性则随氨氮浓度的升高而升高。

当植物受到胁迫时, 随胁迫时间的延长和胁迫程度的加重, 活性氧积累得越来越多, 最终使细胞膜发生膜质过氧化并发生自由基链式反应, 形成丙二醛, 使细胞膜流动性下降, 膜功能受到伤害^[27]。图 3(e) 为 MDA 的含量, 正常培养基及 50、500 和 2 000 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 浓度的氨氮中葡萄藻的 MDA 含量分别为 0.12、0.45、0.46 和 0.28 $\text{U}\cdot\text{mg}^{-1}$; 紫球藻的 MDA 含量分别为 0.09、0.02、0.23 和 0.21 $\text{U}\cdot\text{mg}^{-1}$; 衣藻的 MDA 含量分别为 1.49、0.26、0.08 和 0.08 $\text{U}\cdot\text{mg}^{-1}$; 栅藻的 MDA 含量分别为 1.62、1.68、1.96 和 2.52 $\text{U}\cdot\text{mg}^{-1}$ 。其中栅藻的 MDA 含量随氨氮浓度的升高而升高, 葡萄藻和紫球藻的 MDA 含量均随着氨氮浓度的升高而呈现出先升后降的趋势, 衣藻的 MDA 含量随氨氮浓度的升高而下降。

总体上, 随着氨氮浓度的不断升高, 栅藻的 SOD、CAT 和 GR 酶活性不断升高, POD 酶活性先升高后下降, MDA 含量不断升高, 可能是栅藻在受到氨氮胁迫时, 会产生大量的 ROS 伤害机体, 酶活性的升高表明藻细胞产生了应激性反应, 保护藻细胞免受氧化压力带来的损伤, 但 POD 酶活性后期又呈下降的趋势, 表明它的活性不是无限上升的, 即它对膜系统的保护是有限度的^[28, 29]。MDA 含量的升高可能是 ROS 对栅藻产生的氧化压力导致细胞膜脂质过氧化增强, 将对细胞产生不利影响^[30]。葡萄藻和紫球藻中多数酶活性随氨氮浓度的升高而降低, MDA 含量也先升后降, 500 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的氨氮中 MDA 含量达到最大值。衣藻 POD、SOD、CAT 和 GR 这 4 种酶活性在不断降低, MDA 含量不断减少, 表明衣藻藻细胞无法通过自身的防御系统来消除或减轻氨氮的胁迫, 以致酶活性降低, 但其 MDA 含量却并未升高, 表明酶活性的降低并没有造成 ROS 的积累。

2.3 氨氮浓度对不同藻株单位生物产率的酶活性的影响

图 4 为不同氨氮浓度下不同藻株单位生物产率上的酶活性, 表明氨氮胁迫对其影响是一个动态的

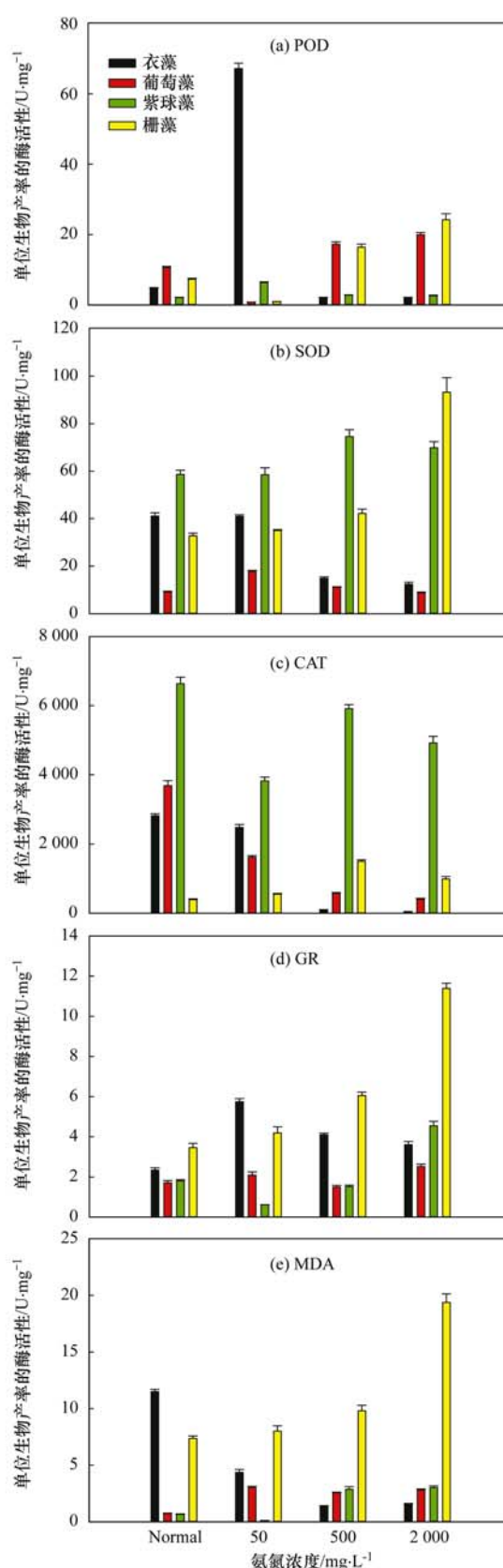


图 4 不同浓度氨氮下不同藻株单位生物产率上的酶活性及 MDA 含量

Fig. 4 Enzyme activity and MDA content in the biomass productivity of different algae under different concentrations of ammonia nitrogen

变化过程^[31]。不同浓度氨氮处理衣藻时, 50 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 氨氮下 POD 酶活性显著提高, 但高浓度时

活性明显下降. 氨氮浓度为 $500 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 4 种藻株单位生物产率上的 POD 酶活性为葡萄藻 > 栅藻 > 紫球藻 > 衣藻; SOD 酶活性为紫球藻 > 栅藻 > 衣藻 > 葡萄藻; CAT 酶活性为紫球藻 > 栅藻 > 葡萄藻 > 衣藻; GR 酶活性为栅藻 > 衣藻 > 紫球藻 = 葡萄藻; MDA 含量为栅藻 > 紫球藻 > 葡萄藻 > 衣藻. 几种酶活性未表现出同步性, 可能是因为他们功能上具有相对独立性^[28].

藻细胞对高氨氮浓度具有一定的抗逆性能和适应能力. 但长时间高浓度氨氮环境下, 藻类可能由于体内的碳水化合物已逐渐消耗殆尽, 从而可能使得高浓度氨氮对藻类产生抑制作用, 因而无法维持酶的响应活力, 从而导致酶活性下降^[32].

3 结论

(1) 不同氨氮浓度 50、500 和 $2\,000 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 均不同程度抑制了衣藻和栅藻的生长, $50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的低浓度氨氮微藻生长较好, 紫球藻生长状况最佳, 其生物量为 $1.78 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$, 生物产率为 $0.16 \text{ g} \cdot (\text{L} \cdot \text{d})^{-1}$; 在 $500 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 氨氮中葡萄藻的生长状况最佳, 其生物量为 $1.95 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$, 生物产率为 $0.18 \text{ g} \cdot (\text{L} \cdot \text{d})^{-1}$; 而栅藻在 $500 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 氨氮中的生物量为 $2.18 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$, 生物产率为 $0.20 \text{ g} \cdot (\text{L} \cdot \text{d})^{-1}$. 因此, 可进一步研究葡萄藻和栅藻处理沼液废水的效果.

(2) 葡萄藻的 SOD、CAT 和 GR 等酶活性随氨氮浓度的升高而升高, POD 酶活性先升后降, 但 MDA 含量也在升高; 衣藻的 SOD、POD、CAT 和 GR 活性均表现为随氨氮浓度的升高, 活性下降, MDA 亦然.

参考文献:

- [1] Deng X Y, Gao K, Zhang R C, *et al.* Growing *Chlorella vulgaris* on thermophilic anaerobic digestion swine manure for nutrient removal and biomass production [J]. *Bioresource Technology*, 2017, **243**: 417-425.
- [2] 顾建辉, 李彩珍, 黄天寅, 等. 分段进水 SBR 处理高浓度氨氮废水的中试研究 [J]. *中国给水排水*, 2018, **34**(17): 104-107.
Gu J H, Li C Z, Huang T Y, *et al.* Treatment of high-concentration ammonia nitrogen wastewater by a pilot step-feed SBR [J]. *China Water & Wastewater*, 2018, **34**(17): 104-107.
- [3] 卫丹, 万梅, 刘锐, 等. 嘉兴市规模化养猪场沼液水质调查研究 [J]. *环境科学*, 2014, **35**(7): 2650-2657.
Wei D, Wan M, Liu R, *et al.* Study on the quality of digested piggery wastewater in large-scale farms in Jiaxing [J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(7): 2650-2657.
- [4] 姜奕圻, 廖若莹, 黄意淇, 等. 利用沼液养殖微藻研究进展 [J]. *中国沼气*, 2017, **35**(4): 36-42.
Jiang Y Q, Liao R Y, Huang Y Q, *et al.* Progress of microalgae cultivation in liquid digestate [J]. *China Biogas*, 2017, **35**(4): 36-42.
- [5] 王愿珠, 程鹏飞, 刘德富, 等. 生物膜贴壁培养小球藻净化猪粪沼液废水的效果 [J]. *环境科学*, 2017, **38**(8): 3354-3361.
Wang Y Z, Cheng P F, Liu D F, *et al.* Purification effect of piggery wastewater with *Chlorella pyrenoidosa* by immobilized biofilm-attached culture [J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(8): 3354-3361.
- [6] 程鹏飞, 王艳, 杨期勇, 等. 微藻贴壁培养对沼液废水的处理效果 [J]. *浙江农业学报*, 2017, **29**(9): 1564-1569.
Cheng P F, Wang Y, Yang Q Y, *et al.* Purification effect for swine wastewater with attached culture of microalgae [J]. *Acta Agriculturae Zhejiangensis*, 2015, **29**(9): 1564-1569.
- [7] Fazal T, Mushtaq A, Rehman F, *et al.* Bioremediation of textile wastewater and successive biodiesel production using microalgae [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018, **82**: 3107-3126.
- [8] 吴买生. 推广发酵床生态养猪技术实现生猪产业可持续发展 [J]. *湖南畜牧兽医*, 2009, (5): 27-29.
- [9] Ndikubwimana T, Zeng X H, Murwanashyaka T, *et al.* Harvesting of freshwater microalgae with microbial bioflocculant: a pilot-scale study [J]. *Biotechnology for Biofuels*, 2016, **9**: 47.
- [10] 刘刘, 宋立, 邓良伟. 我国规模化养殖场粪污水处理利用现状及对策 [J]. *猪业科学*, 2011, **28**(6): 30-33, 42.
- [11] Dai G Z, Qiu B S, Forchhammer K. Ammonium tolerance in the cyanobacterium *Synechocystis* sp. strain PCC 6803 and the role of the *psbA* multigene family [J]. *Plant, Cell & Environment*, 2014, **37**(4): 840-851.
- [12] 孙玉焕, 吴友浩, 杨志海. 初始氨氮浓度对钝顶螺旋藻生长及其去除率的影响 [J]. *环境保护科学*, 2012, **38**(4): 33-36.
Sun Y H, Wu Y H, Yang Z H. Effect of different initial ammonia nitrogen concentration on spirulina platensis growth and ammonia nitrogen removal [J]. *Environmental Protection Science*, 2012, **38**(4): 33-36.
- [13] Converti A, Casazza A A, Ortiz E Y, *et al.* Effect of temperature and nitrogen concentration on the growth and lipid content of *Nannochloropsis oculata* and *Chlorella vulgaris* for biodiesel production [J]. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 2009, **48**(6): 1146-1151.
- [14] Rippka R, Deruelles J, Waterbury J B, *et al.* Generic assignments, strain histories and properties of pure cultures of cyanobacteria [J]. *Journal of General Microbiology*, 1979, **111**(6): 1-61.
- [15] Miao X L, Wu Q Y. Biodiesel production from heterotrophic microalgal oil [J]. *Bioresource Technology*, 2006, **97**(6): 841-846.
- [16] Liu Z Y, Wang G C, Zhou B C. Effect of iron on growth and lipid accumulation in *Chlorella vulgaris* [J]. *Bioresource Technology*, 2008, **99**(11): 4717-4722.
- [17] 常功法, 毕学军. 高浓度氨氮废水处理 [A]. 全国高浓度有机废水处理及工程应用新技术、新设备交流研讨会论文集 [C]. 北京: 中国高科技产业化研究会, 2011.
- [18] 卞少伟, 武丹, 方普杰, 等. 天津近岸海域冬季浮游植物群落结构特征 [J]. *环境影响评价*, 2015, **37**(3): 77-80.
Bian S W, Wu D, Fang P J, *et al.* Community structure of phytoplankton in tianjin offshore waters in winter [J]. *Environmental Impact Assessment*, 2015, **37**(3): 77-80.
- [19] Lampitt R S, Wishner K F, Turley C M, *et al.* Marine snow studies in the Northeast Atlantic Ocean: distribution, composition and role as a food source for migrating plankton [J]. *Marine*

- Biology, 1993, **116**(4): 689-702.
- [20] 蒋汉明, 高坤山. 氮源及其浓度对三角褐指藻生长和脂肪酸组成的影响[J]. 水生生物学报, 2004, **28**(5): 545-551.
Jiang H M, Gao K S. Effects of nitrogen sources and concentrations on the growth and fatty acid composition of *Phaeoda-ctylum tricornutum* [J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2004, **28**(5): 545-551.
- [21] 王璐瑶, 桑敏, 李爱芬, 等. 不同缺氮营养水平对金色奥杜藻生长及光合生理的影响[J]. 中国生物工程杂志, 2012, **32**(6): 48-56.
Wang L Y, Sang M, Li A F, et al. Effects of different nitrogen nutrition level on the growth and photosynthetic physiology of *Odontella aurita* [J]. China Biotechnology, 2012, **32**(6): 48-56.
- [22] Maldonado J G G, Bastoul D, Baig S, et al. Effect of solid characteristics on hydrodynamic and mass transfer in a fixed bed reactor operating in co-current gas-liquid up flow [J]. Chemical Engineering and Processing: Process Intensification, 2008, **47**(8): 1190-1200.
- [23] 于娟, 唐学玺, 张培玉, 等. CO₂ 加富对两种海洋微绿藻的生长、光合作用和抗氧化酶活性的影响[J]. 生态学报, 2005, **25**(2): 197-202.
Yu J, Tang X X, Zhang P Y, et al. Effects of CO₂ enrichment on growth, photosynthesis and activities of antioxidant enzymes of two marine micro-green-algae [J]. Acta Ecologica Sinica, 2005, **25**(2): 197-202.
- [24] 秦洪伟, 陈柳芳, 鲁楠, 等. 氧氟沙星对斜生栅藻的毒性效应[J]. 环境化学, 2011, **30**(4): 885-886.
- [25] 焉翠蔚, 肖宜华, 朱岩松, 等. 多效唑对 2 种海洋微藻生长和抗氧化酶活性的影响[J]. 中国海洋大学学报, 2008, **38**(2): 291-296.
Yan C W, Xiao Y H, Zhu Y S, et al. Effects of PP₃₃₃ on growth and activities of antioxidative enzymes of two marine microalgae [J]. Periodical of Ocean University of China, 2008, **38**(2): 291-296.
- [26] 彭金良, 严国安, 沈国兴, 等. α -萘酚胁迫对普通小球藻生长及抗氧化酶活性的影响[J]. 武汉大学学报(理学版), 2001, **47**(4): 449-452.
Peng J L, Yan G A, Shen G X, et al. The effects of α -naphthol on the growth and the antioxidase activities of *Chlorella vulgaris* [J]. Journal of Wuhan University (Natural Science Edition), 2001, **47**(4): 449-452.
- [27] 任红旭, 陈雄, 吴冬秀. CO₂ 浓度升高对干旱胁迫下蚕豆光合作用和抗氧化能力的影响[J]. 作物学报, 2001, **27**(6): 729-736.
Ren H X, Chen X, Wu D X. Effects of elevated CO₂ on photosynthesis and antioxidative ability of broad bean plants grown under drought condition [J]. Acta Agronomica Sinica, 2001, **27**(6): 729-736.
- [28] 王丽平, 郑丙辉, 孟伟. 苡苡对两种海洋硅藻生长、SOD 活力和 MDA 含量的影响[J]. 海洋通报, 2008, **27**(4): 53-58.
Wang L P, Zheng B H, Meng W. Effects of fluoranthene on growth, SOD activity and MDA content of two marine diatoms [J]. Marine Science Bulletin, 2008, **27**(4): 53-58.
- [29] 陈淑芳, 郭沛涌, 阮滨. 稳定性二氧化氯对水华微囊藻叶绿素 a 及酶活性的影响[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2016, **47**(2): 414-419.
Chen S F, Guo P Y, Ruan B. Effects of stable chlorine dioxide on chlorophyll a and antioxidant enzymes of *Microcystis flos-aquae* [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2016, **47**(2): 414-419.
- [30] 杨国远, 万凌琳, 雷学青, 等. 重金属铅、铬胁迫对斜生栅藻的生长、光合性能及抗氧化系统的影响[J]. 环境科学学报, 2014, **34**(6): 1606-1614.
Yang G Y, Wan L L, Lei X Q, et al. Effects of lead and chromium on the growth, photosynthetic performance, and antioxidant activity of *Scenedesmus obliquus* [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2014, **34**(6): 1606-1614.
- [31] 赖廷和, 何斌源, 范航清, 等. 重金属 Cd 胁迫对红树蚬的抗氧化酶、消化酶活性和 MDA 含量的影响[J]. 生态学报, 2011, **31**(11): 3044-3053.
Lai T H, He B Y, Fan H Q, et al. Effects of cadmium stress on the activities of antioxidant enzymes, digestive enzymes and the membrane lipid peroxidation of the mangrove mud clam *Geloina coxans* (Gmelin) [J]. Acta Ecologica Sinica, 2011, **31**(11): 3044-3053.
- [32] 颜昌宙, 曾阿妍, 金相灿, 等. 不同浓度氨氮对轮叶黑藻的生理影响[J]. 生态学报, 2007, **27**(3): 1050-1055.
Yan C Z, Zeng A Y, Jin X C, et al. Physiological effects of ammonia-nitrogen concentrations on *Hydrilla verticillata* [J]. Acta Ecologica Sinica, 2007, **27**(3): 1050-1055.

CONTENTS

Characteristics of PM _{2.5} Pollution and the Efficiency of Concentration Control During a Red Alert in the Beijing-Tianjin-Hebei Region, 2016	ZHANG Chong, LANG Jian-lei, CHENG Shui-yuan, <i>et al.</i> (3397)
Concentration Characteristics of PM _{2.5} and the Causes of Heavy Air Pollution Events in Beijing During Autumn and Winter	XU Ran, ZHANG Heng-de, YANG Xiao-wen, <i>et al.</i> (3405)
Elemental Composition Characteristics of PM _{2.5} and PM ₁₀ , and Heavy Pollution Analysis in Hefei	LIU Ke-ke, ZHANG Hong, LIU Gui-jian (3415)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of Fine Particulate Matter in Autumn and Winter in Puyang, China	CHEN Chu, WANG Ti-jian, LI Yuan-hao, <i>et al.</i> (3421)
Pollution Characteristics and Sources of Carbonaceous Components in PM _{2.5} in the Guanzhong Area	KANG Bao-rong, LIU Li-zhong, LIU Huan-wu, <i>et al.</i> (3431)
Molecular Composition and Source Apportionment of Fine Organic Aerosols in Autumn in Changchun	WU Xia, CAO Fang, ZHAI Xiao-yao, <i>et al.</i> (3438)
Effects of Urban Expansion and Changes in Urban Characteristics on PM _{2.5} Pollution in China	WANG Gui-lin, ZHANG Wei (3447)
Effect of a Wet Flue Gas Desulphurization System on the Emission of PM _{2.5} from Coal-Fired Power Plants	DENG Jian-guo, MA Zi-zhen, LI Zhen, <i>et al.</i> (3457)
Pollution Characteristics and Emission Coefficients for Volatile Organic Compounds from the Synthetic Leather Industry in Zhejiang Province	XU Jia-qí, WANG Zhe-míng, SONG Shuang, <i>et al.</i> (3463)
Particle Size Distribution and Population Characteristics of Airborne Bacteria Emitted from a Sanitary Landfill Site	MA Jia-wei, YANG Kai-xiong, CHAI Feng-guang, <i>et al.</i> (3470)
Distribution of Total Microbes in Atmospheric Bioaerosols in the Coastal Region of Qingdao	GONG Jing, QI Jian-hua, LI Hong-tao (3477)
Distribution, Sources, and Health Risk Assessment of PAHs in Water Supply Source Regions of Guangzhou	SONG Yu-mei, WANG Chang, LIU Shang, <i>et al.</i> (3489)
Distribution of 16 Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Dianchi Lake Surface Sediments After the Integrated Water Environment Control Project	HU Xin-yi, GAO Bing-li, CHEN Tan, <i>et al.</i> (3501)
Distribution Characteristics and Source Analysis of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Salinized Farmland Soil from the Oil Mining Area of the Yellow River Delta	QIU Hui, LIU Yue-xian, XIE Xiao-fan, <i>et al.</i> (3509)
Wind Field Influences on the Spatial Distribution of Cyanobacterial Blooms and Nutrients in Meiliang Bay of Lake Taihu, China	YU Mao-lei, HONG Guo-xi, ZHU Guang-wei, <i>et al.</i> (3519)
Spatial and Temporal Distribution Characteristics and the Retention Effects of Nutrients in Xiangjiaba Reservoir	WANG Yao-yao, LÜ Lin-peng, JI Dao-bin, <i>et al.</i> (3530)
Effects of Exogenous Inputs on Phosphorus Recovery and Transport in Newborn Surface Layers from Sediment Dredging	LI Xin, GENG Xue, WANG Hong-wei, <i>et al.</i> (3539)
Chemical Characteristics and Sources of Groundwater Sulfate in the Kashgar Delta, Xinjiang	WEI Xing, ZHOU Jin-long, NAI Wei-hua, <i>et al.</i> (3550)
Groundwater Chemistry Characteristics and the Analysis of Influence Factors in the Luochuan Loess Tablelands	LI Zhou, LI Chen-xi, HUA Kun, <i>et al.</i> (3559)
Analysis of River Zooplankton Community Characteristics in Autumn in Beijing	WANG Hai-lin, LIU Yu-fei, REN Yu-fen, <i>et al.</i> (3568)
Benthic Diatom Communities in the Main Stream of Three Gorges Reservoir Area and Its Relationship with Environmental Factors	LIU Li, HE Xin-yu, FU Jun-ke, <i>et al.</i> (3577)
Environmental Response and Ecological Function Prediction of Aquatic Bacterial Communities in the Weihe River Basin	WAN Tian, HE Meng-xia, REN Jie-hui, <i>et al.</i> (3588)
Community Composition of <i>nirS</i> -type Denitrifying Bacteria in the Waters of the Lower Reaches of the Fenne River and Its Relationship with Inorganic Nitrogen	WANG Yin-long, FENG Min-quan, DONG Xiang-qian (3596)
Metabolic Functional Analysis of Dominant Microbial Communities in the Rapid Sand Filters for Drinking Water	HU Wan-chao, ZHAO Chen, WANG Qiao-juan, <i>et al.</i> (3604)
Control Measure Effects on the Effluent Quality from Extensive Green Roofs Based on Stabilized Sludge Recycling	PENG Hang-yu, LI Tian, QI Yue, <i>et al.</i> (3612)
Impacts of Vegetation on Quantity and Quality of Runoff from Green Roofs	ZHANG Sun-xun, ZHANG Shou-hong, ZHANG Ying, <i>et al.</i> (3618)
Organic Matter Removal and Membrane Fouling Control of Secondary Effluents Using a Combined Nanofiltration Process	FAN Ke-wen, LI Xing, YANG Yan-ling, <i>et al.</i> (3626)
Adsorption Properties of Ammonia Nitrogen in Aqueous Solution by Various Materials	JIAO Ju-long, YANG Su-wen, XIE Yu, <i>et al.</i> (3633)
Effects of Different Concentrations of Ammonia Nitrogen on the Growth and Enzyme Activity of Four Common Algae Strains	CHANG Ting, XU Zhi-hui, CHENG Peng-fei, <i>et al.</i> (3642)
Treatment of Highly Concentrated Swine Wastewater and Its Degradation Processes Using Three Matrix Materials	LIU Ming-yu, XIA Meng-hua, LI Yuan-hang, <i>et al.</i> (3650)
Phosphorus Removal Performance and Mechanism of Modified Zeolite Using Alum Sludge Acidified Extraction Liquid	HAN Yun, HU Yu-jie, LIAN Jie, <i>et al.</i> (3660)
Advanced Denitrification of Municipal Wastewater Achieved via Partial ANAMMOX in Anoxic MBBR	YANG Lan, PENG Yong-zhen, LI Jian-wei, <i>et al.</i> (3668)
Effect of an Aerobic Unit and a Sedimentation Unit on Sludge and Nitrogen Removal in an Anoxic Unit in a Continuous-flow System	XUE Huan-ting, YUAN Lin-jiang, LIU Xiao-bo, <i>et al.</i> (3675)
Performance and Mechanisms of Advanced Nitrogen Removal via FeS-driven Autotrophic Denitrification Coupled with ANAMMOX	MA Jing-de, PAN Jian-xin, LI Ze-min, <i>et al.</i> (3683)
Simultaneous Conversion Conditions of Ammonia and Sulfate in ANAMMOX Systems	DONG Shi-yu, BI Zhen, ZHANG Wen-jing, <i>et al.</i> (3691)
Potential Source Environments for Microbial Communities in Wastewater Treatment Plants (WWTPs) in China	ZHANG Bing, WU Lin-wei, WEN Xiang-hua (3699)
Comparison of the Microbial Community Structure in Nitrifying Processes Operating with Different Dissolved Oxygen Concentrations	LIU Wen-ru, GU Guang-fa, SONG Xiao-kang, <i>et al.</i> (3706)
Simultaneous Nitrogen and Phosphorus Removal and Kinetics by the Heterotrophic Nitrifying Bacterium <i>Acinetobacter junii</i> NP1	YANG Lei, CHEN Ning, REN Yong-xiang, <i>et al.</i> (3713)
Realization of Limited Filamentous Bulking with Type 0092 Filamentous Bacteria as the Dominant Filamentous Bacteria in Shortcut Nitrification	GAO Chun-di, AN Ran, HAN Hui, <i>et al.</i> (3722)
Nitrification, Denitrification, and N ₂ O Production Under Saline and Alkaline Conditions	DAI Wei, ZHAO Jian-qiang, DING Jia-zhi, <i>et al.</i> (3730)
Effect of Biochar on Ammonia Volatilization in Saline-Alkali Soil	WANG Yi-yu, WANG Sheng-sen, DAI Jiu-lan (3738)
Effect of Two Soil Synergists on Ammonia Volatilization in Paddy Fields	ZHOU Yu-ling, HOU Peng-fu, LI Gang-hua, <i>et al.</i> (3746)
Determination of Heavy Metal Geochemical Baseline Values and Its Accumulation in Soils of the Luanhe River Basin, Chengde	SUN Hou-yun, WEI Xiao-feng, GAN Feng-wei, <i>et al.</i> (3753)
Migration and Source Analysis of Heavy Metals in Vertical Soil Profiles of the Drylands of Xiamen City	ZHANG Wei-hua, YU Rui-lian, YANG Yu-jie, <i>et al.</i> (3764)
Heavy Metal Pollution Characteristics and Influencing Factors in Baoji Urban Soils	ZHANG Jun, DONG Jie, LIANG Qing-fang, <i>et al.</i> (3774)
Stabilizing Effects of Fe-Ce Oxide on Soil As(V) and P	LIN Long-yong, YAN Xiu-lan, YANG Shuo (3785)
Stabilization of Arsenic-Contaminated Soils Using Fe-Mn Oxide Under Different Water Conditions	ZHOU Hai-yan, DENG Yi-rong, LIN Long-yong, <i>et al.</i> (3792)
Effects of Biochar Amendment on Soil Microbial Biomass Carbon, Nitrogen and Dissolved Organic Carbon, Nitrogen in Paddy Soils	LIU Jie-yun, QIU Hu-sen, TANG Hong, <i>et al.</i> (3799)
Effects of Organic Amendments on Microbial Biomass Carbon and Nitrogen Uptake by Corn Seedlings Grown in Two Purple Soils	WANG Yue, ZHANG Ming-hao, ZHAO Xiu-lan (3808)
Effects of Land Use Type on the Content and Stability of Organic Carbon in Soil Aggregates	LUO Xiao-hong, WANG Zi-fang, LU Chang, <i>et al.</i> (3816)
Effects of Converting Farmland into Forest and Grassland on Soil Nitrogen Component and Conversion Enzyme Activity in the Mountainous Area of Southern Ningxia	GAO Han, XIAO Li, NIU Dan, <i>et al.</i> (3825)
Leaching Behavior of Dissolved Organic Matter in Biochar with Different Extracting Agents	HE Pin-jing, ZHANG Hao-hao, QIU Jun-jie, <i>et al.</i> (3833)
Toxicity of PM _{2.5} Based on a Battery of Bioassays	JIANG Xiao-dong, XUE Yin-gang, WEI Yong, <i>et al.</i> (3840)