

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第8期

Vol.38 No.8

2017

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

用于滤膜称重的饱和氯化镁溶液恒湿系统搭建与评估	李晓晓, 张强, 邓建国, 蒋靖坤, 郝吉明 (3095)
钢铁工业排放颗粒物中碳组分的特征	张进生, 吴建会, 马威, 冯银厂 (3102)
常州市大气 PM _{2.5} 中 PAHs 污染特征及来源解析	顾爱军, 刘佳澍, 罗世鹏, 毕承路, 苏亚兰, 叶招莲, 盖鑫磊 (3110)
兰州河谷盆地大气多环芳烃干沉降通量及来源	尉媛丽, 刘攀亮, 于周锁, 高宏, 毛潇萱, 马建民, 黄韬 (3120)
株洲市大气降尘中元素特征及来源分析	王世豪, 张凯, 柴发合, 钟学才, 周广柱, 杨晴, 柯馨妹 (3130)
传统北京烤鸭烤制过程中大气污染物的排放特征	徐敏, 何万清, 聂磊, 韩力慧, 潘涛, 石爱军 (3139)
基于车载测试的重型柴油车尾气典型烷烃排放特征	史纯珍, 郝雪薇, 申现宝, 曹鑫悦, 张伟, 吴辉, 姚志良 (3146)
基于 wavelet-SVM 的 PM ₁₀ 浓度时序数据预测	王平, 张红, 秦作栋, 姚清晨, 耿红 (3153)
广州港船舶停泊工况排放因子实测及排放量初步估算	黄学良, 张洲, 杨威强, 李晟, 朱明, 方华, 何俊杰, 陈俊文, 万承浩, 张艳利, 刘国光, 黄祖照, 王宇骏, 王新明 (3162)
沙尘天气对生物气溶胶中总微生物浓度及粒径分布的影响	李鸿涛, 祁建华, 董立杰, 高冬梅 (3169)
典型生活垃圾处理设施恶臭排放特征及污染评价	芦会杰 (3178)
杭州地区城区降雪中全氟化合物的污染特征	张明, 唐访良, 俞雅雲, 徐建芬, 陈金汉, 余波, 周姗, 张伟 (3185)
黄浦江流域典型污水中不同粒径胶体的三维荧光光谱特征	聂明华, 晏彩霞, 杨毅, 周俊良, 刘敏 (3192)
漓江地表水体有机碳来源	赵海娟, 肖琼, 吴夏, 刘凡, 苗迎, 蒋勇军 (3200)
夏季热分层效应对典型岩溶水库水化学及溶解无机碳的影响	吴飞红, 蒲俊兵, 李建鸿, 张陶, 李丽, 黄思宇 (3209)
城市不同功能区地表水重金属污染特性比较: 以宁波为例	徐美娟, 童桂华, 孙丹, 李建新, 虞效益 (3218)
地下水主要组分水化学异常识别方法对比: 以柳江盆地为例	张小文, 何江涛, 彭聪, 张昌延, 倪泽华 (3225)
人为扰动背景下城郊溪流底质磷的生物-非生物吸收潜力分析	李如忠, 叶舟, 高苏蒂, 郑悦 (3235)
长江口低氧区沉积物中磷的形态及其环境意义	刘军, 臧家业, 冉祥滨, 赵晨英, 刘季花, 王小静 (3243)
三峡库区小流域不同土地利用类型“土壤-水体”氮磷含量特征及其相互关系	陈成龙, 高明, 木志坚, 倪九派, 祁乐 (3254)
黄土高原降雨驱动下流域碳输移特征及其碳流失评估: 以羊圈沟坝系流域为例	鄂馨卉, 汪亚峰, 高扬, 陈利顶, 陈世博, 陈维梁 (3264)
新型溴代苯酚类消毒副产物的氯化降解机制	李欢, 李正魁, 李爱民, 周庆, 王莹, 潘咏 (3273)
藻形态及混凝剂组成对混凝-超滤过程的影响	张大为, 徐慧, 王希, 门彬, 王东升, 段晋明 (3281)
汝溪河浮游硅藻功能群特征及其与环境因子相关性分析	向蓉, 李巧玉, 喻焱, 张洪波, 董聪聪, 施军琼, 吴忠兴 (3290)
石岩水库叶绿素 a 时空分布及其影响因子分析	宋云龙, 张金松, 郭小雅, 朱佳, 王丽, 陶益, 张丽 (3302)
不同湿地模型中根系微生物的多样性	王林, 李冰, 余家辉, 朱加宾, 朱健 (3312)
北海湖微生物群落结构随季节变化特征	张雅洁, 李珂, 朱浩然, 张洪勋 (3319)
基于高通量测序的流化床生物滤器细菌群落结构分析	张海耿, 宋红桥, 顾川川, 单建军, 张宇雷, 倪琦 (3330)
高效反硝化菌和包埋填料性能及微生物群落分析	孟婷, 杨宏 (3339)
基于城市污水资源化的微藻筛选与污水预处理	韩松芳, 金文标, 涂仁杰, 陈洪一 (3347)
生物膜贴壁培养小球藻净化猪粪沼液废水的效果	王愿珠, 程鹏飞, 刘德富, 刘天中 (3354)
微气泡臭氧催化氧化-生化耦合工艺深度处理煤化工废水	刘春, 周洪政, 张静, 陈晓轩, 张磊, 郭延凯 (3362)
pH 冲击对海洋厌氧氨氧化菌处理含海水污水脱氮效能的影响	于德爽, 周同, 李津, 王晓霞, 吴国栋, 王骁静 (3369)
酒精废水部分亚硝化-厌氧氨氧化脱氮的可行性	周正, 林兴, 王凡, 顾澄伟, 沈婧, 袁砚, 金润 (3377)
模拟废水中钼的微生物回收及其对亚甲基蓝的催化特性	康乃馨, 朱能武, 郭雯颖, 何志心 (3385)
采用颜色空间表征 ANAMMOX 启动与冲击过程	王利君, 李志华, 韩冬, 张天宇, 杨成建 (3393)
CSTR 和 MBR 反应器的短程硝化快速启动	张婷, 吴鹏, 沈耀良, 闫刚, 徐乐中, Samwine Thomas (3399)
硫酸盐还原氨氧化体系中基质转化途径	完颜德卿, 黄勇, 毕贞, 刘忻, 姚鹏程, 张文静 (3406)
不同 TOC/NH ₄ ⁺ -N 对厌氧氨氧化脱氮效能的影响	王凡, 刘凯, 林兴, 周正, 李祥, 黄勇 (3415)
盐度对 EGSB 反应器的运行及厌氧颗粒污泥的影响	谭潇, 黄靛, 杨平, 涂奔州 (3422)
CANON 颗粒污泥工艺的启动与负荷提高策略	孙延芳, 韩晓宇, 张树军, 李星, 曹相生 (3429)
胞外聚合物对活性污泥吸附去除全氟辛酸磺酸 (PFOS) 的影响	刘鑫彤, 尹华, 彭辉, 李浩榕, 杨萍萍, 曹雅娟 (3435)
不同施肥方式下紫色土 N ₂ O 与 NO _x 的排放特征	胡磊, 刘韵, 朱波 (3442)
地膜覆盖对蔬菜地甲烷排放的影响	张凯莉, 郝庆菊, 冯迪, 石将来, 石孝均, 江长胜 (3451)
模拟的增温增雨对内蒙古温带草原土壤氨氧化微生物的影响	张翠景, 沈菊培, 孙翼飞, 王军涛, 杨中领, 韩红艳, 张丽梅, 万师强, 贺正 (3463)
长期施肥酸性旱地土壤硝化活性及自养硝化微生物特征	徐白璐, 钟文辉, 黄欠如, 秦红益, 邓欢, 韩成 (3473)
施加碳酸钙对酸性土壤微生物氮循环的影响	郭安宁, 段桂兰, 赵中秋, 唐仲, 王杨扬, 王伯勋 (3483)
水稻不同生育期根际与非根际土壤胞外酶对施氮的响应	魏亮, 汤珍珠, 祝贞科, 蔡观, 葛体达, 王久荣, 吴金水 (3489)
凋落物呼吸温度敏感性的变化特征及其影响因素	张彦军 (3497)
西北干旱区农田土壤磁性特征及其环境意义	王新, 夏敦胜, 王博, 陈红, 刘浩 (3507)
小麦秸秆驱动菱铁矿热解制备磁性生物炭及其吸附 Cd ²⁺ 活性	张如玉, 刘海波, 邹雪华, 庆承松, 李梦雪, 陈冬, 陈天虎 (3519)
交通污染暴露对 DNA 甲基化的影响	汪婷, 丁锐, 黄丹妮, 祝子逸, 章军, 叶怀庄, 徐迎春, 金永堂 (3529)
外接菌种对污泥堆肥效能及堆体细菌群落的影响	杨萍萍, 尹华, 彭辉, 唐少宇, 卢妙, 刘皓 (3536)
中国电动自行车动力铅酸蓄电池生命周期评价	刘巍, 田金平, 陈吕军 (3544)
《环境科学》征稿简则 (3280) 《环境科学》征订启事 (3301) 信息 (3353, 3472, 3535)	

生物膜贴壁培养小球藻净化猪粪沼液废水的效果

王愿珠¹, 程鹏飞^{2,4}, 刘德富^{1,2,3,*}, 刘天中⁵

(1. 三峡大学水利与环境学院, 三峡库区生态环境教育部工程研究中心, 宜昌 443002; 2. 武汉大学水利水电学院, 武汉 430072; 3. 湖北工业大学土木建筑与环境学院, 河湖生态修复与藻类利用湖北省重点实验室, 武汉 430068; 4. 九江学院鄱阳湖生态经济研究中心, 九江 332005; 5. 中国科学院青岛生物能源与过程研究所, 青岛 266101)

摘要: 微藻处理猪粪沼液废水是一项污水资源化生物技术. 本文以小球藻为研究对象, 通过贴壁培养方式, 对稀释不同倍数的猪粪沼液废水进行净化处理同时提取藻细胞油脂, 旨在探究小球藻贴壁培养处理猪粪沼液废水的效果, 分析小球藻耐受猪粪沼液废水的氨氮浓度. 将猪粪沼液废水分别稀释1倍(原水)、2倍、5倍、10倍制成培养基. 测定贴壁培养小球藻对各处理组猪粪沼液废水中COD、氨氮、总氮、总磷的去除效率及对重金属铜、锌、铁的富集效果, 同时探究小球藻的油脂合成情况. 结果表明, 当猪粪沼液废水稀释5倍时, 贴壁小球藻对COD、氨氮、总氮、总磷的净化效果最佳, 其去除效率分别为: 86.8%、94.1%、85.2%、84.3%; 油脂含量高达32.7%; 对重金属铜、锌、铁的去除效率分别为: 72.9%、70.0%、73.0%; 培养一个周期结束时生物产率达到 $4.21 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$. 该研究将微藻与难处理的猪粪沼液废水深度净化进行了有效的结合, 为实现藻类生物燃料工艺生产及降低废水处理成本提供理论基础.

关键词: 小球藻; 贴壁培养; 猪粪沼液废水; 稀释倍数; 油脂; 去除效率

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)08-3354-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.201701113

Purification Effect of Piggery Wastewater with *Chlorella pyrenoidosa* by Immobilized Biofilm-Attached Culture

WANG Yuan-zhu¹, CHENG Peng-fei^{2,4}, LIU De-fu^{1,2,3,*}, LIU Tian-zhong⁵

(1. College of Hydraulic and Environmental Engineering, Engineering Research Center of Eco-environment in Three Gorges Reservoir Region, Ministry of Education, China Three Gorges University, Yichang 443002, China; 2. School of Water Resources and Hydropower Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China; 3. Key Laboratory of Ecological Restoration of River-lakes and Algal Utilization, College of Resources and Environment Sciences, Hubei University of Technology, Wuhan 430068, China; 4. Poyang Lake Eco-economy Research Center of Jiujiang University, Jiujiang 332005, China; 5. Qingdao Institute of Bioenergy and Bioprocess Technology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266101, China)

Abstract: Piggery wastewater treatment with microalgae is a biological recycling technology. To evaluate the purification effect, this study investigated the treatment of piggery wastewater at different dilution ratios with *Chlorella pyrenoidosa* by attached cultivation and lipid production of algae cells and explored the tolerance of *Chlorella pyrenoidosa* to the piggery wastewater, which has high ammonia nitrogen. The piggery wastewater was diluted with purified water 1-, 2-, 5-, and 10-fold in culture media. The removal efficiencies of COD, ammonia nitrogen, total nitrogen, and total phosphorus and the enrichment effect of the heavy metals copper, zinc, and iron were measured. Meanwhile, we investigated the lipid production of *Chlorella pyrenoidosa* in variously diluted wastewater (1-, 2-, 5-, and 10-fold). It turned out that the purification effects of COD, ammonia nitrogen, total nitrogen, and total phosphorus were best when the piggery wastewater was diluted 5-fold, and the removal efficiencies were 86.8%, 94.1%, 85.2%, and 84.3%, respectively. Correspondingly, the lipid content was as high as 32.7%, and the removal efficiencies of the heavy metals copper, zinc, and iron were 72.9%, 70.0%, and 73.0%, respectively. The biomass productivity was $4.21 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$ at the end of the experiment. This research makes an effective connection between microalgae and piggery wastewater, which is difficult to purify deeply, and provides a theoretical basis for achieving algal biofuel production and decreasing the cost of wastewater treatment.

Key words: *Chlorella pyrenoidosa*; attached culture; piggery wastewater; serial dilution; lipids; removal efficiency

随着沼气工程的大规模发展,大量富营养的猪粪沼液废水对水体环境以及人类健康造成严重危害^[1,2]. 猪粪沼液废水是一种较难处理的有机废水,具有高浓度氮磷、成分复杂等特点. 在未得到妥善处理的情况下,其中的氮、磷以及有机物等会导致水体富营养化、地下水污染,造成人类饮用水的污染等水环境问题,严重破坏水体生态平衡. 另一方

面,废水中氨的释放也会对大气带来严重的污染.

收稿日期: 2017-01-13; 修订日期: 2017-03-17

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(2016M600616); 国家自然科学基金重大项目(91647207); 国际科技合作项目(2014DFE70070); 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2014ZX07104-005-02)

作者简介: 王愿珠(1991~),女,硕士研究生,主要研究方向为生态水力学, E-mail: 903802180@qq.com

* 通信作者, E-mail: dfliu@189.cn

因此寻求一种有效、简单且经济的猪粪沼液废水处理技术极为重要。

国内外对猪粪沼液废水的处理已进行大量的研究,研究人员也相继开发了不同的猪粪沼液废水处理工艺^[3],主要包括还田模式、自然处理模式和厌氧发酵产沼气模式等^[4~6]。传统的处理方式虽能在一定程度上达到除污的目的,但也会带来二次污染^[7]。目前,利用微藻处理猪粪沼液废水的技术已得到国内外学者的印证^[8]。猪粪沼液废水中含有大量藻类生长所需的氮、磷以及其他营养物质,将猪粪沼液废水净化与微藻的培养相结合,既可以达到排放标准,降低猪粪沼液废水处理成本,又可以节约微藻的培养成本,同时还可利用微藻生物质中的高附加值产物^[9,10]。但是,传统的液体悬浮培养(如跑道池等)处理沼液因占地面积大、处理效率不高、条件不易控制、采收成本较高等问题一直未得到工艺化推广利用。

本研究采用贴壁技术培养微藻处理猪粪沼液废水。贴壁培养是将藻细胞与培养基相分离,并将藻细胞固定在特定的生物膜材料上,极少量的培养基液体通过附着多孔材料的背面或内部滴入以使藻细胞处于半干湿润状态,并在一定光照强度与营养盐浓度下进行生长的培养方式。利用贴壁方式培养微藻处理猪粪沼液废水,培养结束后省去了藻细胞离心等高能耗过程,大大降低培养成本^[10~12]。尽管如此,通过微藻贴壁培养处理猪粪沼液废水的效果还需要进一步考察研究。当前,对于藻类细胞的生长以及生物技术方面的应用大多集中于传统的液体悬浮培养,包括开放的培养池或是 PBR 反应器,但这方面的知识信息并不适用于新型的生物膜贴壁培养方式。

小球藻在培养中油脂含量高、生长周期短、适应能力强、光合效率高,是一种典型的较为理想的藻种资源^[13]。本试验将猪粪沼液废水(原水)稀释成不同比例用于小球藻的贴壁培养,进而考察小球藻在不同稀释倍数猪粪沼液废水下的生物量增长、油脂积累、pH 变化及 COD、氨氮、总氮、总磷、重金属铜、锌、铁去除效率,以确定小球藻在猪粪沼液废水中贴壁培养的最适宜生长浓度,探究小球藻贴壁培养处理猪粪沼液废水的效果,以期为畜禽污染控制和猪粪沼液废水深度处理提供一定的理论基础。

1 材料与方法

1.1 藻种来源与培养

本试验所用小球藻(*Chlorella pyrenoidosa*)由湖

北工业大学淡水藻种库提供。小球藻藻种培养过程所用培养基为 BG11^[14]。

1.2 猪粪沼液废水

猪粪沼液废水取自湖北省武汉市某畜禽养殖企业经厌氧发酵后的沼液污水,取水时间为 2016 年 9 月 27 日 10:00。猪粪沼液废水储存于 18℃ 的温度下,经自然沉降 2 d 后,取其上清液进行试验。将猪粪沼液废水(原水)称为 1 倍猪粪沼液废水,即取沉降后的上清液 3 L 制成培养基。2 倍猪粪沼液废水,即取沉降后的上清液 1 500 mL,再向其中加入 1 500 mL 的蒸馏水,共计 3 L 制成培养基。以此类推,5 倍、10 倍猪粪沼液废水按上述方法稀释制成培养基。

1.3 反应器与培养方法

本试验小球藻藻种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,工作体积 0.90 L。反应器内部布置直径 5 mm 的玻璃通气管,混合有 1.5% CO₂ 体积比的压缩空气(0.10 MPa)以 1 mL·s⁻¹ 的通气速率通过通气管从反应器底部鼓泡,从而将藻液搅动并补充碳源。培养过程中连续光照,培养柱表面光强 60 μmol·(m²·s)⁻¹,培养温度 20℃ ± 1℃。

贴壁培养反应装置^[15](图 1),一块长 0.40 m,宽 0.20 m,厚 3 mm 的玻璃板置于 0.50 m × 0.30 m × 0.05 m(长 × 宽 × 高)的玻璃腔中,将玻璃板的一面附滤纸,并接受正上方的光照。将小球藻藻种经过培养至对数期后,接种相同浓度藻液于醋酸纤维素膜上,再将其附着于玻璃板的滤纸上,将附有藻种的玻璃板放入玻璃腔内,通过循环泵滴加保持小球藻附着材料的湿润状态,同时为保障玻璃腔内的稳定环境,用保鲜膜封住玻璃腔的一面。为了培养液更均匀地渗入藻细胞内,将玻璃培养缸放置一定角度,荧光灯置于培养腔正上方提供光源。猪粪沼液废水贴壁培养小球藻时未通 CO₂,以空气鼓泡代替,每 2 d 取样一次,共培养 8 d。其他外界培养条件与藻种液体培养条件相同。

1.4 试验指标分析方法

1.4.1 小球藻细胞生物量测定

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℃ 烘箱中烘至恒重(W₁),将待测藻样(DW)用去离子水冲洗至烧杯中,并倒入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℃ 烘箱中烘至恒重(W₂),用分析天平称量即为藻样重量(g·m⁻²)。

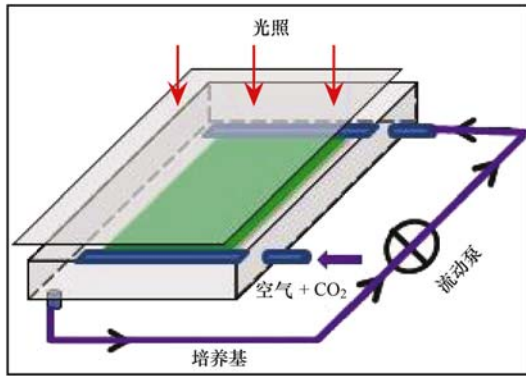


图1 微藻贴壁培养装置示意

Fig. 1 Attached cultivation device for microalgae

$$DW = (W_2 - W_1) / 0.001 \quad (1)$$

1.4.2 小球藻细胞油脂含量测定

小球藻总脂含量的测定采用改进的氯仿-甲醇法^[16]。收集藻细胞,用一定量蒸馏水冲洗离心后冷冻干燥。称取 50 mg 左右(重量 W_1)藻粉于研钵中,加入 200 mg 已烘干的石英砂,研碎后加入 5 mL 甲醇,2.5 mL 氯仿,高速振荡 5 min。摇床 12 h,离心取出上清 7.5 mL 置于新管 1。向固相中再加入 5 mL 甲醇,2.5 mL 氯仿,高速振荡 5 min,摇床 2 h,离心取出上清 7.5 mL 置于新管 1,后加入 5 mL 氯仿和 9 mL 体积分数为 1% 的 NaCl 溶液,保证最终体系为甲醇:氯仿:1% NaCl = 2:2:1.8,振荡混匀。将新管 1 于 $8000 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 下离心 10 min,去上清,下层液转移入 20 mL 干净玻璃管(已称重 W_2)。吹氮气 + 61°C 水浴,约 10 min 待氯仿挥发殆尽后,于 105°C 烘 3 h,冷却后,称重 W_3 。

$$\text{总脂含量}(\%) = (W_3 - W_2) / W_1 \cdot 100\% \quad (2)$$

1.4.3 贴壁培养基中 pH、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TN、TP、COD 浓度的测定

取贴壁培养循环装置中猪粪沼液废水,每 2 d 分别对 pH、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TN、TP 及 COD 进行测定。pH 的测定应用 pH 计; $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 测量采用纳氏试剂分光光度法(GB 7479-1987);TN 测定采用过硫酸钾消解紫外分光光度法(GB 11894-1989);TP 测量采用钼酸铵分光光度法(GB 11893-1989);COD 的测定采用重铬酸钾氧化处理法(GB 11914-1989)。

1.4.4 贴壁培养基中重金属 Cu^{2+} 、 Zn^{2+} 、 Fe^{2+} 浓度的测定

重金属 Cu^{2+} 、 Zn^{2+} 、 Fe^{2+} 的含量测定采用 AAnalyst 400 原子吸收分光光度计。 Fe^{2+} 采用火焰原子吸收分光光度法(GB 11911-89),检出限为 $0.03 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$; Cu^{2+} 、 Zn^{2+} 都采用原子吸收分光光

度法(GB 7475-87),检出限均为 $0.05 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。

1.5 试验数据分析方法

数据采用统计软件 SPSS 10.0 进行单因素方差分析,采用 LSD 和 Tukey HSD 法进行统计检验($P < 0.05$)。试验中,曲线作图及拟合采用 Origin 完成。

2 结果与讨论

2.1 贴壁培养小球藻在不同稀释倍数猪粪沼液废水中生长状况

本试验中,试验各处理组的小球藻的生长情况存在较大的差异(图 2)。试验初期(2 d 内),各组的初始小球藻生物量均为 $8.50 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ 。BG11 培养基下的小球藻的生长情况作为空白对照,经过 8 d 培养后,其生物量仅为 $21.30 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$,相应的生物产率是 $1.60 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$ 。各梯度下,其中除了小球藻在稀释浓度为 1 倍猪粪沼液废水中没有明显生长,其他梯度组小球藻生物量都明显增加,各组生物量变化趋势相近,随着培养时间的延长而增加。各梯度下小球藻生物量变化趋势为:初期上升速度较快,此后生物量增长幅度较小。经过 8 d 培养,在各梯度猪粪沼液废水生长下小球藻生物量按大小顺序排列依次是 5 倍 > 2 倍 > 10 倍 > BG11 > 1 倍。

由此可知,猪粪沼液废水稀释 5 倍的培养条件下,相较于其他处理组,其生长最好,从图 2 中可明显看出,第 4 d 起该条件下的小球藻生物量便明显高于其它浓度梯度,培养 8 d 后小球藻生物量高达 $42.20 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$,生物产率为 $4.21 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$ 。在未经稀释的猪粪沼液废水(1 倍)中培养小球藻,培养相同时间后生物产率仅为 $0.33 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$ 。稀释 2 倍的猪粪沼液废水,其中的小球藻生物产率只有 $3.15 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$ 。在一定范围内,氮磷浓度越高,小球藻生长越快^[17],超过一定范围,小球藻生长反之越慢,进而影响生物量的积累。1 倍处理组的猪粪沼液废水的氮磷浓度较之于小球藻生长适宜所需要的氮磷浓度要高很多,一定程度上抑制了藻细胞的生长,该条件下小球藻的生物量要明显低于稀释 5 倍条件下的值。BG11 培养基是小球藻正常生长的营养盐条件,但从图 2 可知 BG11 培养条件下的小球藻的生物量低于稀释 2 倍培养条件下的小球藻的生物量。由于猪粪沼液废水的营养成分较充裕,而稀释 2 倍的猪粪沼液废水中,营养成分浓度高于 BG11,但又未达到抑制小球藻生长的高浓度水平,因此生物量积累情况优于 BG11 培养的值。另外,10

倍稀释倍数下小球藻的生物量也低于稀释 5 倍时的值,生物产率只有 $2.76\text{ g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d})^{-1}$. 猪粪沼液废水稀释 10 倍的培养条件下,可能因为猪粪沼液废水被过分稀释后,其中的营养盐含量较低,小球藻在其中的生长因营养盐浓度过低而受到抑制.

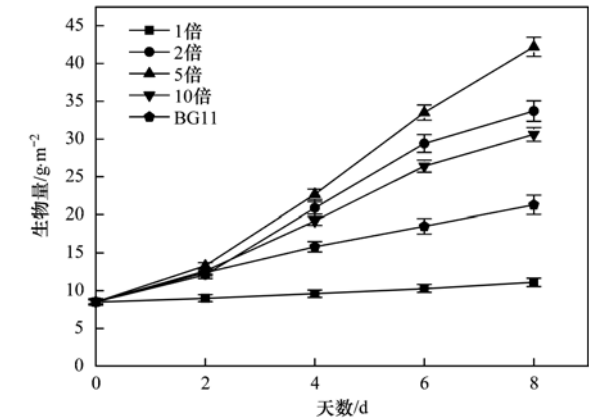


图2 贴壁小球藻在不同稀释倍数猪粪沼液废水下生物量的变化
Fig. 2 Growth curves of *Chlorella pyrenoidosa* under attached cultivation condition for the various dilution ratios of piggery wastewater

2.2 贴壁培养小球藻在不同稀释倍数猪粪沼液废水中油脂积累状况

根据 1.4.2 节中油脂的测定方法,各处理组的油脂的测定值见表 1. 猪粪沼液废水稀释 1 倍的培养条件下,油脂含量为 20.5%;猪粪沼液废水稀释 2 倍的培养条件下,油脂含量为 28.5%;猪粪沼液废水稀释 5 倍的培养条件下,油脂含量为 32.7%;猪粪沼液废水稀释 10 倍的培养条件下,油脂含量为 29.7%. 比较而言,沼液稀释 5 倍的条件油脂含量高.

张桂艳等^[18]通过重要理化因子对小球藻生长和油脂产量的影响进行试验,研究发现氮浓度变化对小球藻的生长和油脂积累都有明显影响. 王翠等^[19]研究了 pH 值对猪粪沼液废水培养小球藻生长及油含量积累情况的影响. 研究证实弱碱性条件下小球藻细胞油脂积累更有优势. 前面研究证明,猪粪沼液废水稀释 5 倍条件下小球藻生长最好,生物量积累最佳. 相应地在藻细胞生长的稳定期后,由细胞内部其他组分转换为油脂的含量也越多^[20~22]. 各猪粪沼液废水稀释培养条件下,除了原水(1 倍)中藻细胞油脂含量较低,其它两个处理组的藻细胞油脂含量相差不大. 低浓度猪粪沼液废水中的营养盐包括氮源含量均较少,小球藻在其中生长过程较慢,生物量积累不多. 但是,一般情况下,当微藻生长受到胁迫或限制时,油脂含量反而会提

高. 因此稀释 10 倍的油脂含量高于稀释 2 倍的处理组的油脂含量.

表 1 贴壁小球藻在不同稀释倍数猪粪沼液废水下油脂的含量
Table 1 Oil content of *Chlorella pyrenoidosa* under attached cultivation condition for the various dilution ratios of piggery wastewater

稀释倍数	1 倍	2 倍	5 倍	10 倍
油脂含量/%	20.5	28.5	32.7	29.7

2.3 不同稀释倍数下猪粪沼液废水的 pH 的变化

pH 值是衡量藻类生长环境的重要指标,它主要是通过改变培养基的酸碱度,进而影响培养基溶液的渗透压,同时在呼吸作用中影响微藻对有机碳源的利用效果,因此 pH 是影响藻类生长代谢的重要因子之一^[23~26]. 小球藻生长的 pH 值范围为 3.5~9.5. 试验期间,不同稀释倍数猪粪沼液废水培养条件下的 pH 变化特性如图 3 所示. 从中可知,各处理组培养基的 pH 在 8.1~9.5 之间变化. 各处理组的变化趋势:试验第 2 d,培养基的 pH 均上升,之后 6 d 变化幅度都相对平稳. 试验初期测定此猪粪沼液废水 pH 为 8.1. 试验结果表明,经过 8 d 培养,稀释 1 倍的培养基 pH 为 8.2,稀释 2 倍的培养基 pH 为 9.1,稀释 5 倍的培养基 pH 为 9.5,稀释 10 倍的培养基 pH 为 8.7,各处理组间培养基 pH 差异较为明显, pH 按大小顺序依次为 5 倍 > 2 倍 > 10 倍 > 1 倍. 由于培养基中的 pH 主要是由二氧化碳的电离平衡决定,小球藻的光合作用是以水体中二氧化碳、碳酸根、碳酸氢根为原料,光合作用越强,电离平衡就往氢氧根方向移动,造成 pH 升高. 结合 2.1 节已经得出稀释 5 倍条件下,小球藻的生物量最高,那么,在光照强度、温度、培养基总量、初始接种量等相同的培养条件下,再结合图 2 分析,不难得出, pH

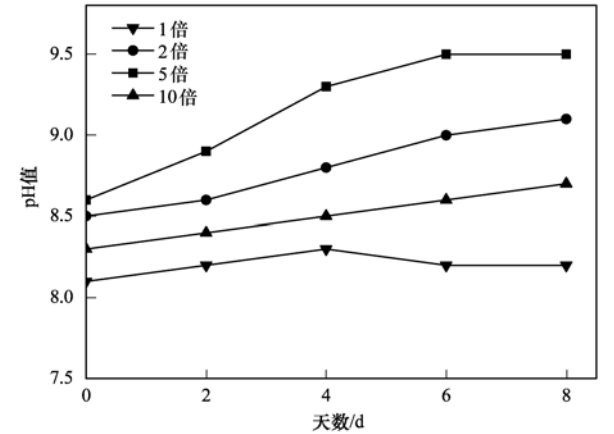


图3 不同稀释倍数猪粪沼液废水中 pH 的变化
Fig. 3 Changes of pH for the various dilution ratios of piggery wastewater

随小球藻生物量的增加而升高,从而使得培养基呈弱碱性. 因此,比较而言弱碱性条件有利于油脂的积累,这也与 Guckert 等^[27]的研究相吻合.

2.4 不同稀释倍数下小球藻净化猪粪沼液废水中营养盐的效果

小球藻培养一个周期后(8 d),不同稀释倍数猪粪沼液废水中 COD、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TN、TP 浓度的变化情况如图 4 所示.

由于藻细胞在生长过程中需要利用废水中有机物质进行自身物质的合成,COD 是沼液中的主要营养物质,也是养殖业需要考虑能否达标排放的重要指标. 通过对猪粪沼液废水稀释一定的倍数培养小球藻,同时观察其对猪粪沼液废水净化的效果. 从图 4(a)中可以看出,猪粪沼液废水稀释倍数为 1、2、5、10 倍的培养液 COD 初始值分别为 385.77、267.87、116.10、82.00 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 培养 8 d,相应的各处理组猪粪沼液废水中的 COD 值分别下降为 97.19、55.99、16.12、21.53 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,去除效率分别为 74.8%、79.1%、86.8%、73.7%. 本试验表明,小球藻在猪粪沼液废水稀释倍数为 1、2、5 倍的培养基中能够生长良好,在培养周期内 COD 下降速度非常快,去除 COD 的效率随着培养基稀释倍数的增加而增加. 但是猪粪沼液废水稀释 10 倍时小球藻去除 COD 速率缓慢,这或许是因为稀释倍数较

大,营养物质质量浓度过低,培养基中低浓度的有机质无法较好地满足小球藻所需物质合成的需要. 因此小球藻在猪粪沼液废水稀释倍数为 5 倍时去除 COD 效率最好,其对于 COD 的去除效果要远远高于传统的液体培养处理法^[28].

图 4(b)为不同处理组 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的去除效果. 初始猪粪沼液废水的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 值为 578.27 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,试验第 1 d,猪粪沼液废水稀释倍数为 2、5、10 倍的混合液中的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 值分别为 293.72、134.17、38.20 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 试验开始后各处理组 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 质量浓度迅速下降,前 4 d 的变化相当明显. 试验结束第 8 d,各处理组中沼液的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 值分别降低为 103.19、13.61、2.67、3.10 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,去除效率分别为 82.2%、87.8%、94.1%、91.9%. 微藻对培养液中氨氮的去除方式有两种,一是藻类的生长吸收消耗的易吸收氮源主要是氨氮,用于合成自身细胞所需的有机物;二是微藻光合作用时,溶液中 pH 值升高,从而导致氨氮的挥发^[29]. 本试验中,稀释 10 倍的培养基中,混合液的氨氮浓度相对较低,但仍然可以提供满足小球藻生长的条件. 而稀释 1 倍和 2 倍的培养基由于营养成分略高于小球藻适宜的生长条件,有抑制小球藻生长的可能性. 综上所述稀释 5 倍的处理组 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 值的去除效果是最好的.

从图 4(c)可知,猪粪沼液废水稀释倍数为 1、

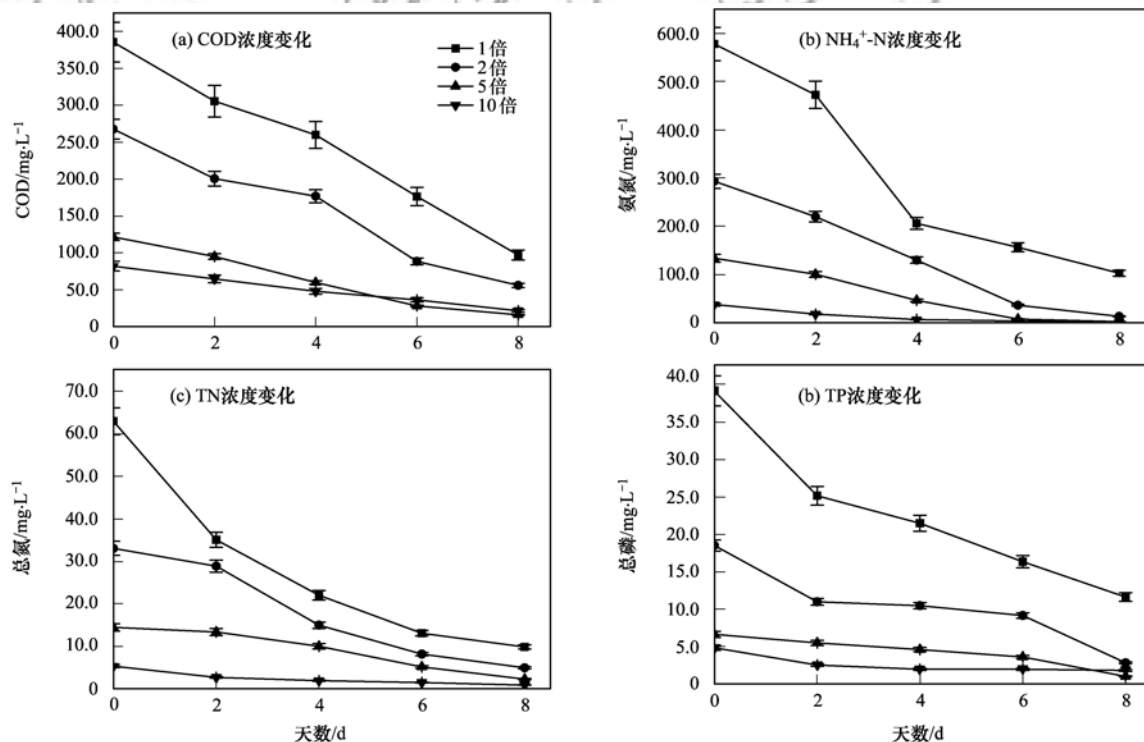


图 4 不同稀释倍数猪粪沼液废水中营养盐的浓度

Fig. 4 Concentrations of nutrients for the various dilution ratios of piggery wastewater

2、5、10 倍的混合液中的 TN 初始值分别为 63.03、33.09、14.49、5.34 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 试验第 8 d,各处理组中猪粪沼液废水中的 TN 值分别降低为 9.87、4.95、2.29、0.88 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,相应地去除效率分别为 84.3%、85.0%、85.2%、83.6%. 微藻对于沼液中氮化合物的去除主要是通过其吸收作用,将含氮化合物通过自养作用合成藻细胞中氨基酸以及蛋白质等物质^[30]. 由于猪粪沼液废水稀释 10 倍时,低浓度的营养物质虽对小球藻的生长有一定影响,但去除 TN 效率仍然可以达到 83.6%. 其他处理组的处理效率也均在 80.0% 以上. 因此小球藻对于猪粪沼液废水中 TN 去除效果很好.

图 4(d),初始猪粪沼液废水的 TP 值为 39.12 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,猪粪沼液废水稀释 2、5、10 倍的混合液中 TP 值分别为 18.53、6.65、4.86 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 培养至第 8 d,各处理组培养基中的 TP 值分别降低为 11.63、2.86、1.05、1.84 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,去除效率分别为

70.3%、84.5%、84.3%、62.1%. 同样,微藻对磷的去除途径主要有两种:一是微藻生长同化培养液中的磷元素,合成自身的营养物质. 二是藻的光合作用使溶液中 pH 值上升,磷元素以难溶盐的形式沉淀下来^[29]. 图 4(d)反映了各组猪粪沼液废水中 TP 的去除趋势,很明显随着培养时间的延长,TP 逐渐被小球藻利用代谢,效率均达到 83% 以上,高于 Ruan 等^[31]用传统方式的净化效果. 当猪粪沼液废水稀释 5 倍时 TP 的浓度下降速度较为均匀并且下降速率最高.

2.5 不同稀释倍数下小球藻对重金属 Cu^{2+} 、 Fe^{2+} 、 Zn^{2+} 的去除效果

研究人员发现有些藻体对重金属具有一定的富集能力,这使藻类作为生物吸附剂修复水体重金属污染成为可能. 对重金属 Cu^{2+} 、 Fe^{2+} 、 Zn^{2+} 共存情况下的猪粪沼液废水进行定期取样检测,测定小球藻对 Cu^{2+} 、 Fe^{2+} 、 Zn^{2+} 的去除情况,如表 2 所示.

表 2 不同稀释倍数猪粪沼液废水中重金属浓度/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$

Table 2 Concentrations of heavy metals in attached cultivation for the various dilution ratios of piggery wastewater/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$

试验天数 /d	1 倍			2 倍			5 倍			10 倍		
	Cu	Zn	Fe	Cu	Zn	Fe	Cu	Zn	Fe	Cu	Zn	Fe
0	0.80	0.40	1.44	0.74	0.32	1.02	0.70	0.24	0.89	0.20	0.11	0.49
2	0.50	0.26	0.99	0.52	0.24	0.62	0.40	0.11	0.59	0.18	ND	0.29
4	0.40	0.20	0.89	0.36	0.19	0.46	0.28	0.08	0.44	0.16	ND	0.22
6	0.32	0.17	0.84	0.30	0.17	0.38	0.23	0.07	0.33	0.14	ND	0.18
8	0.28	0.15	0.81	0.26	0.13	0.30	0.19	0.07	0.24	0.13	ND	0.16
去除效率/%	65.0	62.5	43.8	64.9	59.4	70.6	72.9	70.0	73.0	35.0		67.3

从表 2 中可以看出,小球藻对 Cu^{2+} 、 Fe^{2+} 、 Zn^{2+} 的去除是个较为快速的过程. 试验开始 2 d 后,各处理组中 Cu^{2+} 、 Fe^{2+} 、 Zn^{2+} 的浓度迅速下降,培养 6 d 后逐渐趋于平缓. 稀释 1、2、5、10 倍的猪粪沼液废水对于 Cu^{2+} 的去除效率分别为:65.0%、64.9%、72.9%、35.0%. 其中去除效率最高的是稀释 5 倍的培养基, Cu^{2+} 浓度由初始 0.70 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 下降到了 0.19 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 稀释 1、2、5、10 倍的猪粪沼液废水对于 Fe^{2+} 的除去效率分别为 43.8%、70.6%、73.0%、67.3%. 此时,去除效率最高的也是稀释 5 倍的猪粪沼液废水,该培养基中的 Fe^{2+} 浓度由 0.89 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 降低到 0.24 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 稀释 1、2、5 倍的猪粪沼液废水对于 Zn^{2+} 的除去效率分别为 62.5%、59.4%、70.0%. 由于 Zn^{2+} 使用 1.4.4 节中试验方法测试时,其检出限为 0.05 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 10 倍的猪粪沼液废水中 Zn^{2+} 的初始含量为 0.11 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,第 2 d 其含量已经检测不到. 以上分析可知,稀释 5 倍的培养基对于重金属 Cu^{2+} 、 Fe^{2+} 、

Zn^{2+} 的吸收效果是最好的.

5 倍稀释倍数的培养基对于重金属 Cu^{2+} 、 Fe^{2+} 、 Zn^{2+} 的吸收效果表明,其吸附能力大小依次为: $\text{Fe}^{2+} > \text{Cu}^{2+} > \text{Zn}^{2+}$. 吴海锁等^[32]研究了多种金属离子共存时,小球藻对金属的吸附具有一定的选择性,其对 Cu^{2+} 的吸附能力强于 Zn^{2+} ,且不同离子间有一定的抑制作用,这与本研究结果相似. 各处理组由于重金属浓度还未达到毒害藻体死亡的含量,因此 4 个处理组的去除效率都是逐渐升高的. 这与藻细胞对重金属的吸附机制有关,吸附的最初时期金属离子通过络合、离子交换等作用吸附在细胞壁上,这是一个快速吸附的过程,此后在细胞代谢的作用下吸附在表面的金属离子被转运至细胞体内,重金属被藻细胞富集,因此去除率随时间慢慢上升. 但是 1 倍、2 倍处理组对重金属离子的去除效果并未像 5 倍时那么好,而 10 倍处理组由于稀释倍数过高,最终的去除效果也并非如 5 倍时明显. 这可能是由于金属阳离子进入藻液时立即被细胞壁上

的羟基(—OH)、羧基(—COOH)等基团水解释放的阴离子和质子结合,吸附在细胞表面,而同时重金属对藻细胞的胁迫作用致使藻细胞生长受阻. 或可能由于某一种金属进入藻液后和氨基、羧基等功能基团相互作用并大量附着在藻细胞表面^[33,34]. 重金属对小球藻生长有抑制作用,低浓度下抑制效果不明显,高浓度下显著影响藻细胞生长,且重金属大量存在会使藻细胞破碎. 但由于本试验中培养基中重金属浓度并非很高,所以并未对小球藻正常的生长产生较大影响,反而一定程度上可以满足小球藻生长对于微量元素的需求,所以最终的去除效率也较明显.

3 结论

(1)小球藻贴壁培养处理猪粪沼液废水是可行的. 在不同稀释倍数下(1、2、5、10 倍)的猪粪沼液废水中,小球藻均能生长. 在猪粪沼液废水稀释 5 倍时, COD 为 $121.72 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 氨氮为 $134.17 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、总氮为 $14.49 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、总磷为 $6.65 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 此时小球藻生长最好,培养一个周期 8 d 后生物产率为 $4.21 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$. 对 COD、氨氮、总氮、总磷的去除效率最高,分别为:86.8%、94.1%、85.2%、84.3%.

(2)猪粪沼液废水稀释 5 倍时,小球藻贴壁培养藻细胞的油脂含量最高,为 32.7%,其次是稀释 2 倍下,小球藻油脂含量为 28.5%. 同时,在猪粪沼液废水稀释 5 倍时,小球藻贴壁培养去除重金属铜、锌、铁的效果最好,去除率分别是 72.9%、70.0%、73.0%.

参考文献:

- [1] Chen X, Luo A C, Sato K, *et al.* An introduction of a multi-soil-layering system: a novel green technology for wastewater treatment in rural areas [J]. *Water and Environment Journal*, 2009, **23**(4): 255-262.
- [2] 赵君怡,张克强,王风,等. 猪场废水灌溉地下水中氮素的影响[J]. *生态环境学报*, 2011, **20**(1): 149-153.
Zhao J Y, Zheng K Q, Wang F, *et al.* Influence of livestock wastewater irrigation on nitrogen compounds contents in groundwater[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2011, **20**(1): 149-153.
- [3] Ji M K, Ahn Y T, Khan M A, *et al.* Removal of nitrate and ammonium ions from livestock wastewater by hybrid systems composed of zero-valent iron and adsorbents[J]. *Environmental Technology*, 2011, **32**(16): 1851-1857.
- [4] Xiao H, Yang P, Peng H, *et al.* Nitrogen removal from livestock and poultry breeding wastewaters using a novel sequencing batch biofilm reactor [J]. *Water Science & Technology*, 2010, **62**(11): 2599-2606.
- [5] Shi L J, Ban L T, Liu H F, *et al.* Study on livestock and poultry farming wastewater treatment using a hybrid baffled reactor [J]. *Advanced Materials Research*, 2011, **201-203**: 2797-2802.
- [6] 余薇薇,张智,毕胜兰,等. 改良型两级 A/O 工艺处理畜禽养殖场的沼液研究[J]. *中国给水排水*, 2011, **27**(1): 8-11.
Yu W W, Zhang Z, Bi S L, *et al.* Improved two-stage A/O process for treatment of biogas slurry from livestock and poultry breeding farm [J]. *China Water & Wastewater*, 2011, **27**(1): 8-11.
- [7] 田静思,张后虎,张毅敏,等. 矿化垃圾湿地处理畜禽养殖废水的研究[J]. *生态与农村环境学报*, 2011, **27**(2): 95-99.
Tian J S, Zhang H H, Zhang Y M, *et al.* Treatment of livestock wastewater using wetland of mineralized refuse [J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2011, **27**(2): 95-99.
- [8] de Godos I, Blanco S, García-Encina P A, *et al.* Long-term operation of high rate algal ponds for the bioremediation of piggery wastewaters at high loading rates [J]. *Bioresource Technology*, 2009, **100**(19): 4332-4339.
- [9] Kale D K, Anthappan P D. Sustainable treatment of wastewater using effective microorganisms [J]. *Journal of Pure and Applied Microbiology*, 2012, **6**(1): 333-338.
- [10] 张强,邹华,余云龙,等. 小球藻处理养殖废水的初步研究 [J]. *上海环境科学*, 2011, **30**(6): 249-253.
Zhang Q, Zou H, Yu Y L, *et al.* An approach to the treatment of livestock farming wastewater by *Chlorella vulgaris* [J]. *Shanghai Environmental Sciences*, 2011, **30**(6): 249-253.
- [11] de Godos D I, Muñoz R, Guieysse B. Tetracycline removal during wastewater treatment in high-rate algal ponds [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2012, **229-230**: 446-449.
- [12] 李松林,吕军,张峰,等. 高浓度沼液淹灌水土系统中氮、磷和有机物的动态变化 [J]. *水土保持学报*, 2011, **25**(2): 125-129.
Li S L, Lü J, Zhang F, *et al.* Dynamic changes of nitrogen, phosphorus and organic matter in soil-water system in the process of biogas slurry flooding treatment [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2011, **25**(2): 125-129.
- [13] Mata T M, Martins A A, Caetano N S. Microalgae for biodiesel production and other applications: a review [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2010, **14**(1): 217-232.
- [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**(1): 1-61.
- [15] 程鹏飞,王艳,杨期勇,等. 葡萄糖生物膜贴壁培养处理含钴工业废水与烃类生产的耦合 [J]. *环境科学*, 2016, **37**(7): 2666-2671.
Cheng P F, Wang Y, Yang Q Y, *et al.* Coupling of hydrocarbon accumulation and cobalt removal during treatment of cobalt enriched industrial wastewater with *Botryococcus braunii* biofilm attached cultivation [J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(7): 2666-2671.
- [16] Bligh E G, Dyer W J. A Rapid method of total lipid extraction and purification [J]. *Canadian Journal of Biochemistry and Physiology*, 1959, **37**(8): 911-917.
- [17] 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.
- [18] 张桂艳, 温小斌, 梁芳, 等. 重要理化因子对小球藻生长和油脂产量的影响[J]. 生态学报, 2011, **31**(8): 2076-2085.
Zhang G Y, Wen X B, Liang F, *et al.* The effects of physical and chemical factors on the growth and lipid production of *Chlorella* [J]. Acta Ecologica Sinica, 2011, **31**(8): 2076-2085.
- [19] 王翠, 李环, 王钦琪, 等. pH 值对沼液培养的普通小球藻生长及油含量积累的影响[J]. 生物工程学报, 2010, **26**(8): 1074-1079.
Wang C, Li H, Wang Q Q, *et al.* Effect of pH on growth and lipid content of *Chlorella vulgaris* cultured in biogas slurry[J]. Chinese Journal of Biotechnology, 2010, **26**(8): 1074-1079.
- [20] Takagi M, Watanabe K, Yamaberi K, *et al.* Limited feeding of potassium nitrate for intracellular lipid and triglyceride accumulation of *Nannochloris* sp. UTEX LB1999[J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2000, **54**(1): 112-117.
- [21] 陈峰, 姜悦. 微藻生物技术[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 1999.
- [22] 杨闯, 王文国, 马丹炜, 等. 耐高浓度沼液产油小球藻的分离鉴定与特征分析[J]. 环境科学, 2015, **36**(7): 2707-2712.
Yang C, Wang W G, Ma D W, *et al.* Isolation, identification and characteristic analysis of an oil-producing *Chlorella* sp. tolerant to high-strength anaerobic digestion effluent [J]. Environmental Science, 2015, **36**(7): 2707-2712.
- [23] Bernal C B, Vázquez G, Quintal I B, *et al.* Microalgal dynamics in batch reactors for municipal wastewater treatment containing dairy sewage water[J]. Water, Air, and Soil Pollution, 2008, **190**(1): 259-270.
- [24] González C, Marciniak J, Villaverde S, *et al.* Microalgae-based processes for the biodegradation of pretreated piggery wastewaters [J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2008, **80**(5): 891-898.
- [25] An J Y, Sim S J, Lee J S, *et al.* Hydrocarbon production from secondarily treated piggery wastewater by the green alga *Botryococcus braunii* [J]. Journal of Applied Phycology, 2003, **15**(2): 185-191.
- [26] Yang C F, Ding Z Y, Zhang K C. Growth of *Chlorella pyrenoidosa* in wastewater from cassava ethanol fermentation[J]. World Journal of Microbiology and Biotechnology, 2008, **24**(12): 2919-2925.
- [27] Guckert J B, Cooksey K E. Triglyceride accumulation and fatty acid profile changes in *Chlorella* (Chlorophyta) during high pH-induced cell cycle inhibition[J]. Journal of Phycology, 1990, **26**(1): 72-79.
- [28] 乔慧, 陈灏, 赵玉柱, 等. 沼液处理液养殖普通小球藻的试验研究[J]. 中国沼气, 2016, **34**(6): 115-120.
Qiao H, Chen H, Zhao Y Z. *Chlorella vulgaris* cultivation with treated biogas slurry [J]. China Biogas, 2016, **34**(6): 115-120.
- [29] 刘振强. 微藻优化培养、采收及沼液培养微藻的研究[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2012.
- [30] 王钦琪, 李环, 王翠, 等. 沼液培养的普通小球藻对 CO₂ 的去除[J]. 应用与环境生物学报, 2011, **17**(5): 700-705.
Wang Q Q, Li H, Wang C, *et al.* Reduction of CO₂ by *Chlorella vulgaris* cultured in biogas slurry[J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2011, **17**(5): 700-705.
- [31] Ruan R S, Jian E G, Wu X D, *et al.* Treatment of biogas slurry from pig industry by *Chlorella vulgaris* [J]. Modern Chemical Industry, 2013, **33**(8): 62-64, 66.
- [32] 吴海锁, 张洪玲, 张爱茜, 等. 小球藻吸附重金属离子的试验研究[J]. 环境化学, 2004, **23**(2): 173-177.
- [33] Gupta V K, Rastogi A. Biosorption of lead (II) from aqueous solutions by non-living algal biomass *Oedogonium* sp. and *Nostoc* sp. -a comparative study [J]. Colloids and Surfaces B: Biointerfaces, 2008, **64**(2): 170-178.
- [34] Maldonado J, de los Rios A, Esteve I, *et al.* Sequestration and *in vivo* effect of lead on DE2009 microalga, using high-resolution microscopic techniques [J]. Journal of Hazardous Materials, 2010, **183**(1-3): 44-50.

CONTENTS

Evaluation and Development of a Weighing Chamber by Using Saturated MgCl_2 Solution	LI Xiao-xiao, ZHANG Qiang, DENG Jian-guo, <i>et al.</i> (3095)
Characteristics Research on Carbonaceous Component of Particulate Matter Emitted from Iron and Steel Industry	ZHANG Jin-sheng, WU Jian-hui, MA Xian, <i>et al.</i> (3102)
Pollution Characteristics and Source Identification of PAHs in Atmospheric $\text{PM}_{2.5}$ in Changzhou City	GU Ai-jun, LIU Jia-shu, LUO Shi-peng, <i>et al.</i> (3110)
Atmospheric Dry Deposition Fluxes and Sources of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Lanzhou Valley, Northwest China	JU Yuan-li, LIU Pan-liang, YU Zhou-suo, <i>et al.</i> (3120)
Characteristics and Sources of Elements in Atmospheric Dust Fall in Zhuzhou City, Central China	WANG Shi-hao, ZHANG Kai, CHAI Fa-he, <i>et al.</i> (3130)
Atmospheric Pollutant Emission Characteristics from the Cooking Process of Traditional Beijing Roast Duck	XU Min, HE Wan-qing, NIE Lei, <i>et al.</i> (3139)
Exhaust Emission Characteristics of Typical Alkanes from Heavy-Duty Diesel Vehicles Based on a Portable Emission Measurement System	SHI Chun-zhen, HAO Xue-wei, SHEN Xian-bao, <i>et al.</i> (3146)
PM_{10} Concentration Forecasting Model Based on Wavelet-SVM	WANG Ping, ZHANG Hong, QIN Zuo-dong, <i>et al.</i> (3153)
Emission Factors and Preliminary Emission Estimates of Air Pollutants from Ships at Berth in the Guangzhou Port	HUANG Xue-liang, ZHANG Zhou, YANG Wei-qiang, <i>et al.</i> (3162)
Influence of Dust Events on the Concentration and Size Distribution of Microorganisms in Bioaerosols	LI Hong-tao, Qi Jian-hua, DONG Li-jie, <i>et al.</i> (3169)
Odor Emission Characteristics and Pollution Evaluation from Typical Household Rubbish Disposal Facilities	LU Hui-jie (3178)
Perfluorinated Compounds in Snow from Downtown Hangzhou, China	ZHANG Ming, TANG Fang-liang, YU Ya-yun, <i>et al.</i> (3185)
Fluorescence Characterization of Fractionated Colloids in Wastewaters Received by Huangpu River	NIE Ming-hua, YAN Cai-xia, YANG Yi, <i>et al.</i> (3192)
Sources of Organic Carbon in the Surface Water of Lijiang River	ZHAO Hai-juan, XIAO Qiong, WU Xia, <i>et al.</i> (3200)
Impacts of Thermal Stratification on the Hydrochemistry and Dissolved Inorganic Carbon in a Typical Karst Reservoir in Summer	WU Fei-hong, PU Jun-bing, LI Jian-hong, <i>et al.</i> (3209)
Comparison of Heavy Metal Contamination Characteristics in Surface Water in Different Functional Areas; A Case Study of Ningbo	XU Mei-juan, TONG Gui-hua, SUN Dan, <i>et al.</i> (3218)
Comparison of Identification Methods of Main Component Hydrochemical Anomalies in Groundwater; A Case Study of Liujiang Basin	ZHANG Xiao-wen, HE Jiang-tao, PENG Cong, <i>et al.</i> (3225)
Biotic and Abiotic Uptake of Phosphorus in Benthic Sediments of Suburban Streams Under Intense Human Disturbance Scenario	LI Ru-zhong, YE Zhou, GAO Su-di, <i>et al.</i> (3235)
Sedimentary Phosphorus Speciation in the Coastal Hypoxic Area of Changjiang Estuary and Its Environmental Significance	LIU Jun, ZANG Jia-ye, RAN Xiang-bin, <i>et al.</i> (3243)
Characteristics and the Relationship of Nitrogen and Phosphorus in Soil and Water of Different Land Use Types of a Small Watershed in the Three Gorges Reservoir Area	CHEN Cheng-long, GAO Ming, MU Zhi-jian, <i>et al.</i> (3254)
Characteristics of Carbon Transportation Under Rainfall Events and Associated Carbon Loss Evaluation in Loess Plateau, China; A Case Study of Yangjuangou Dam Watershed	E Xin-hui, WANG Ya-feng, GAO Yang, <i>et al.</i> (3264)
New Bromated Phenolic Disinfection Byproducts: Mechanism of Their Decomposition During Chlorination	LI Huan, LI Zheng-kui, LI Ai-min, <i>et al.</i> (3273)
Effects of Algal Morphology and Al Species Distribution on the Coagulation-Ultrafiltration Process	ZHANG Da-wei, XU Hui, WANG Xi, <i>et al.</i> (3281)
Functional Group Characteristics of Planktonic Diatoms and Their Relationship with Environmental Factors in the Ruxi River	XIANG Rong, LI Qiao-yu, YU Yi, <i>et al.</i> (3290)
Spatiotemporal Variations of Chlorophyll <i>a</i> and Its Relationship to Environmental Factors in Shiyan Reservoir	SONG Yun-long, ZHANG Jin-song, Guo Xiao-ya, <i>et al.</i> (3302)
Rhizosphere Microbial Diversity in Different Wetland Microcosms	WANG Lin, LI Bing, YU Jia-hui, <i>et al.</i> (3312)
Community Structure of Microorganisms and Its Seasonal Variation in Beihai Lake	ZHANG Ya-jie, LI Ke, ZHU Hao-ran, <i>et al.</i> (3319)
Analysis of Microbial Diversity in a Fluidized-Sand Biofilter Based on High-Throughput Sequencing Technology	ZHANG Hai-geng, SONG Hong-qiao, GU Chuan-chuan, <i>et al.</i> (3330)
Analysis of High-efficiency Denitrifying Bacteria and Embedding Filler Performance and Microflora	MENG Ting, YANG Hong (3339)
Selection of Microalgae for Biofuel Using Municipal Wastewater as a Resource	HAN Song-fang, JIN Wen-biao, TU Ren-jie, <i>et al.</i> (3347)
Purification Effect of Piggery Wastewater with <i>Chlorella pyrenoidosa</i> by Immobilized Biofilm-Attached Culture	WANG Yuan-zhu, CHENG Peng-fei, LIU De-fu, <i>et al.</i> (3354)
Combination of Microbubble Catalytic Ozonation and Biological Process for Advanced Treatment of Biotreated Coal Chemical Wastewater	LIU Chun, ZHOU Hong-zheng, ZHANG Jing, <i>et al.</i> (3362)
Effect of pH Shock on Nitrogen Removal Performance of Marine Anaerobic Ammonium-Oxidizing Bacteria Treating Saline Wastewater	YU De-shuang, ZHOU Tong, LI Jin, <i>et al.</i> (3369)
Removal of Nitrogen from Alcohol Wastewater by PN-ANAMMOX	ZHOU Zheng, LIN Xing, WANG Fan, <i>et al.</i> (3377)
Biorecovery of Palladium from Simulated Wastewaters and Its Catalytic Property for Methylene Blue	KANG Nai-xin, ZHU Neng-wu, GUO Wen-ying, <i>et al.</i> (3385)
Investigation of Initiation and Shock Process of ANAMMOX Based on Color Space	WANG Li-jun, LI Zhi-hua, HAN Dong, <i>et al.</i> (3393)
Fast Start-up of Shortcut Nitrification in a CSTR and an MBR	ZHANG Ting, WU Peng, SHEN Yao-liang, <i>et al.</i> (3399)
Conversion Pathways of Substrates in Sulfate-Reducing Ammonia Oxidation System	WANYAN De-qing, HUANG Yong, BI Zhen, <i>et al.</i> (3406)
Effect of Different TOC to NH_4^+ -N Ratios on Nitrogen Removal Efficiency in the ANAMMOX Process	WANG Fan, LIU Kai, LIN Xing, <i>et al.</i> (3415)
Effects of Salinity on the Operation of EGSB Reactors and the Anaerobic Granular Sludge	TAN Xiao, HUANG Liang, YANG Ping, <i>et al.</i> (3422)
Start-up of Granule CANON Process and the Strategy for Enhancing Total Nitrogen Removal Rate	SUN Yan-fang, HAN Xiao-yu, ZHANG Shun-jun, <i>et al.</i> (3429)
Effect of Extracellular Polymeric Substance (EPS) on the Adsorption of Perfluorooctane Sulfonate (PFOS) onto Activated Sludge	LIU Xin-tong, YIN Hua, PENG Hui, <i>et al.</i> (3435)
Characteristics of N_2O and NO_x Emissions from Purple Soil Under Different Fertilization Regimes	HU Lei, LIU Yun, ZHU Bo (3442)
Effect of Plastic Film Mulching on Methane Emission from a Vegetable Field	ZHANG Kai-li, HAO Qing-ju, FENG Di, <i>et al.</i> (3451)
Responses of Soil Ammonia Oxidizers to Simulated Warming and Increased Precipitation in a Temperate Steppe of Inner Mongolia	ZHANG Cui-jing, SHEN Ju-peí, SUN Yi-fei, <i>et al.</i> (3463)
Nitrification Activity and Autotrophic Nitrifiers in Long-term Fertilized Acidic Upland Soils	XU Bai-lu, ZHONG Wen-hui, HUANG Qian-ru, <i>et al.</i> (3473)
Effects of CaCO_3 Application on Soil Microbial Nitrogen Cycle in an Acid Soil	GUO An-ning, DUAN Gui-lan, ZHAO Zhong-qiu, <i>et al.</i> (3483)
Responses of Extracellular Enzymes to Nitrogen Application in Rice of Various Ages with Rhizosphere and Bulk Soil	WEI Liang, TANG Zhen-zhu, ZHU Zhen-ke, <i>et al.</i> (3489)
Variation in the Temperature Sensitivity of Surface Litter Respiration and Its Influencing Factors	ZHANG Yan-jun (3497)
Magnetic Properties of Farmland Soils in Arid Regions in Northwest China and Their Environmental Implications	WANG Xin, XIA Dun-sheng, WANG Bo, <i>et al.</i> (3507)
Preparation of Magnetic Biomass Carbon by Thermal Decomposition of Siderite Driven by Wheat Straw and Its Adsorption on Cadmium	ZHANG Ru-yu, LIU Hai-bo, ZOU Xue-hua, <i>et al.</i> (3519)
Effects of Traffic-related Air Pollution Exposure on DNA Methylation	WANG Ting, DING Rui, HUANG Dan-ni, <i>et al.</i> (3529)
Effects of Exogenous Microorganism Inoculation on Efficiency and Bacterial Community Structure of Sludge Composting	YANG Ping-ping, YIN Hua, PENG Hui, <i>et al.</i> (3536)
Life Cycle Assessment of Traction Lead-acid Batteries for Electric Bikes in China	LIU Wei, TIAN Jin-ping, CHEN Lü-jun (3544)