

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)	

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

(哈尔滨工业大学深圳研究生院, 土木与环境工程学院, 深圳 518055)

摘要: 利用城市污水培养微藻, 可在实现污水无害化处理的同时, 培养微藻回收生物质能源。污水为微藻的培养提供氮、磷等营养组分和所需水源。由于城市污水含有大量的微生物, 成分复杂, 且不同藻种对污水的适应性与耐受性不同, 因此, 需要筛选出适宜于城市污水培养和高效产脂的藻种, 并研究城市污水预处理方式, 以使预处理后的城市污水更适于微藻的生长与产脂。本文根据课题组前期获得的藻种在城市污水中的生长与产脂情况以及对污水的净化能力筛选出适宜于城市污水培养的藻种。其中斜生栅藻(*Scenedesmus obliquus*)原始株与蛋白核小球藻(*Chlorella pyrenoidosa*)离子诱变藻株生物质与油脂产量较高, 经污水培养后油脂产量分别可达 $0.43 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $0.33 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$, 且含有较多的 C16~C18 脂肪酸, 适宜于生物柴油的制备, 同时可使培养后污水中 COD、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、TN、TP 的去除率分别达到 86.4%、100%、94.3%、93.4% 和 81.8%、100%、94.9%、94.2%。对可规模化扩大的污水预处理方式进行研究, 发现不同藻种所最适的污水预处理方式不同。对于耐污性能较强的斜生栅藻原始株, 除去粗大悬浮物后的城市污水即可用于其培养。对于蛋白核小球藻诱变株, 城市污水经沉淀、过滤联合预处理后适宜于其培养。

关键词: 微藻; 城市污水; 油脂; 培养; 预处理

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)08-3347-07 DOI: 10.13227/j.hj.kx.201701109

Selection of Microalgae for Biofuel Using Municipal Wastewater as a Resource

HAN Song-fang, JIN Wen-biao*, TU Ren-jie, CHEN Hong-yi

(School of Civil and Environmental Engineering, Harbin Institute of Technology Shenzhen Graduate School, Shenzhen 518055, China)

Abstract: Cultivating microalgae using municipal wastewater can achieve not only treatment of the wastewater but also recovery of algae for use as a biofuel energy source. Wastewater provides necessary nutrients, such as nitrogen and phosphorus, and water for microalgal growth. Because of the complexity of components of municipal wastewater, variety of adaptability, and tolerance to wastewater of different microalgal species, it is necessary to select a suitable microalgal species with high performance in lipid production and identify proper pretreatment of the wastewater to achieve high lipid production using municipal wastewater for algal biofuel production. Based on microalgal growth, lipid production, and clean-up performance of wastewater, we selected *Scenedesmus obliquus* wild strain and *Chlorella pyrenoidosa* mutant by ion beam implantation from a test group for the biofuel production. Laboratory test results showed that *S. obliquus* wild strain and *C. pyrenoidosa* mutant had respective lipid productions of $0.43 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ and $0.33 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$, with more C16-C18 fatty acids, which were suitable for biodiesel production. The pollutant removals from the wastewater by *S. obliquus* wild strain and *C. pyrenoidosa* mutant were COD, 86.4% vs. 81.8%; $\text{NH}_4^+ - \text{N}$, 100.0% vs. 100.0%; TN, 94.3% vs. 94.9%; and TP, 93.4% vs. 94.2% respectively. The two different microalgal strains required different pretreatments. After removal of large particles, the raw wastewater could be directly used for the cultivation of *S. obliquus* wild strain. To grow *C. pyrenoidosa* mutant with municipal wastewater, pretreatment procedures including precipitation followed by filtration should be employed.

Key words: microalgae; municipal wastewater; lipids; cultivation; pretreatment

随着能源危机与环境污染的加剧, 微藻生物柴油越来越受到各国研究者的关注^[1~3]。就整体工艺而言, 微藻生物柴油的生产包括藻种选育、微藻培养、微藻收获、油脂提取与转脂。微藻培养是其中一个重要环节, 在微藻培养过程中, 利用淡水培养微藻需消耗大量淡水资源, 有悖于当前淡水资源紧缺的背景。同时, 营养物质的投加进一步提高了微藻的培养成本^[4,5]。

城市污水中含有大量的氮、磷营养物质, 利用城市污水培养微藻, 可在水质净化的同时, 为微藻的生长提供丰富的氮、磷, 同时污水中的细菌可分解污水中的有机物产生 CO_2 , 为微藻提供生长所需碳

源。相比于利用人工配制的培养基并外加纯 CO_2 气体进行微藻的培养, 利用城市污水培养微藻可一定程度降低微藻培养的成本, 又可依托现有污水处理厂规模化培养, 是当前解决水环境污染和能源危机的一个有效途径。目前, 此领域的大多数研究集中在利用微藻改善污水水质或者利用人工污水培养基及灭菌污水培养微藻方面, 而将实际城市污水处理与微藻培养制备生物柴油相耦合的研究报道较

收稿日期: 2017-01-13; 修订日期: 2017-03-05

基金项目: 深圳市科技创新委员会项目(JCYJ20140417172417125)

作者简介: 韩松芳(1989~), 女, 博士研究生, 主要研究方向为微藻生物能源, E-mail: hansongfang@stmail.hitsz.edu.cn

* 通信作者, E-mail: jinwb@hit.edu.cn

少^[6,7]. Mahapatra 等^[8]利用灭菌的城市污水培养混合藻类,培养 12 d,微藻产率为 $122 \text{ mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{d})^{-1}$. Ryu 等^[7]研究表明,相较于灭菌的初沉池污水,小球藻在未灭菌的城市污水中生长得更好,微藻产率为 $126 \text{ mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{d})^{-1}$,油脂含量达到 20.59%.

由于城市污水成分复杂,固体颗粒含量高时,相应的营养物质含量较高,有利于微藻生长,但也会增加污水浊度,影响微藻对光的有效吸收.同时,污水中含有大量的微生物,微藻与细菌之间存在着互生、拮抗等复杂的相互关系^[9].且不同藻种对环境需求不同,对污水的耐受性也不同^[10,11].因此,需要筛选出适宜于城市污水培养和高效产脂的藻种,并对城市污水预处理方式进行研究,以使预处理后的城市污水更适于微藻的生长与产脂.因此本研究将从课题组前期获得的斜生栅藻与蛋白核小球藻原始株及其离子注入诱变株^[12]中根据其在实际城市污水中

的生长与产脂情况以及对污水的净化能力筛选出适宜于城市污水培养的藻种,并根据藻种性能研究适于微藻生长与产脂的可规模化扩大的污水预处理方式,以期在城市污水处理与微藻生物能源耦合工艺的建立奠定基础.

1 材料与方法

1.1 藻种与培养基

试验所用微藻为购买于中科院(武汉)水生生物研究所淡水藻种库的斜生栅藻原始株(SC-W)与蛋白核小球藻原始株(CH-W)以及课题组前期经离子注入法诱变筛选的斜生栅藻诱变株(SC-M)与蛋白核小球藻诱变株(CH-M)^[12],藻种采用 BG-11 培养基^[13]进行传代培养保藏.

试验所用城市污水取自深圳大学城市政污水井,经潜污泵抽取后使用.污水水质见表 1.

表 1 大学城城市污水水质

Table 1 Municipal wastewater quality of Shenzhen University Town

水质指标	COD/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	TP/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	TN/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	$\text{NH}_4^+ \text{-N}/\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	SS/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	pH
参数	140 ~ 200	5.0 ~ 6.5	20 ~ 45	20 ~ 40	100 ~ 120	7 ~ 8

1.2 试验方法

1.2.1 微藻培养

以 BG11 培养基培养处于对数生长期的微藻为种子液,接种于 600 mL 城市污水,于气泡柱式光生物反应器(直径为 5 cm、长度为 50 cm、容积大小约为 1 L)中培养,以相应的不加微藻的城市污水为空白对照,使扣除空白后藻液初始吸光度 $D_{680} = 0.1$,于培养温度 $(25 \pm 1)^\circ\text{C}$,光照强度 $100 \mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$,光暗比(L:D)为 12 h:12 h 条件下,连续通气培养(空气流速为 $120 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$,由底部通入).每天取样测定扣除空白后藻液的 D_{680} 以监测藻细胞生长情况.取培养达到稳定期的藻液测定扣除空白后藻细胞的干重、油脂产量.每组试验设 3 个平行对照.

1.2.2 污水预处理方法

城市污水采用以下 5 种预处理方式.原污水:经潜污泵除去粗大悬浮物后的原污水直接使用;沉淀污水:原污水沉淀 2 h 后取上清液使用;过滤污水:原污水用定性滤纸过滤后使用;沉淀+过滤污水:原污水先沉淀 2 h 处理后,上清液用定性滤纸过滤后使用;灭菌污水:原污水经高压蒸汽灭菌后使用.

1.3 分析方法

1.3.1 微藻生长与干重的测定

通过测定 D_{680} 来监测微藻的生长情况.微藻的

干重采用重量法测定,10 mL 藻液经预称重(W_1)的微孔滤膜($\Phi 0.45 \mu\text{m}$)过滤、洗涤,于 105°C 下烘至恒重(W_2),不加微藻的空白对照组干重为 W_0 ,微藻干重 DW ($\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$)的计算公式如下:

$$\text{DW} = (W_2 - W_1 - W_0) / 0.01$$

1.3.2 微藻油脂产量与脂肪酸组成的测定

微藻油脂提取采用氯仿甲醇共溶剂提取法^[14].待提取结束后,收集氯仿相,转移至预称重的锡纸盘中,待有机溶剂挥发完全后,于 80°C 烘箱中烘至恒重,得到微藻油脂产量,微藻细胞油脂含量为微藻油脂产量与微藻干重的百分比.

微藻脂肪酸分析,首先对提取的油脂进行甲酯化^[15],将 5 mL 藻液中脂肪酸转化成相对应的脂肪酸甲酯.采用赛里安 456-GC 气相色谱仪进行分析,色谱柱为 BR-2560 柱, $100 \text{ m} \times 0.25 \text{ mm}$ (内径) $\times 0.20 \mu\text{m}$ (膜厚),FID 检测器,分流方式进样,分流比为 30:1,进样量为 $1 \mu\text{L}$.

1.3.3 常规水质指标测定

污水水质采用国标法^[16]测定.其中微藻培养结束后出水水质,将微藻藻液于 $8000 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 离心 10 min 后,收集上清液测定. TP、TN、 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 、COD 的测定分别参照 GB 11893-89、GB 11894-89、GB 7479-87、GB 11914-89.

1.3.4 数据分析方法

数据采用统计软件 SPSS 21.0 进行单因素方差分析(one-way ANOVA), 采用 LSD 法进行统计检验($P < 0.05$).

2 结果与讨论

2.1 适于城市污水培养的藻种筛选

2.1.1 城市污水中不同藻种的生长情况

将 4 种微藻 CH-W、CH-M、SC-W、SC-M 按照初始浓度 $D_{680} = 0.1$ 分别接种到城市污水原污水中. 每天测一次 D_{680} 值监测其生长情况(图 1). 由图 1 可知, CH-M、CH-W、SC-W 藻种在污水中生长情况良好, 具有较强耐污性能, D_{680} 最高可达 1.5 以上, 其中 CH-M 藻种 D_{680} 最高. 而 SC-M 藻种虽能保持持续生长, 但生长速率较低. 后期的观察发现, CH-W 与 CH-M 分别于第 9d 进入快速衰亡期, 而 SC-W、SC-M 均可以长时间保持在生长稳定期. 从稳定性培养的角度看 SC-W、SC-M 更具有优势.

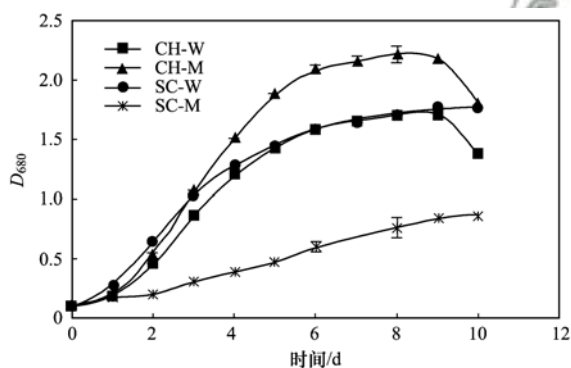


图 1 微藻在城市污水中的生长情况

Fig. 1 Growth of microalgae in the municipal wastewater

2.1.2 城市污水中不同藻种的产脂情况

取达到稳定期(第 8 d)的微藻测其干重与油脂产量, 并计算其油脂含量, 结果如图 2 所示. 对 4 种微藻的油脂进行甲酯化反应, 通过对生成的脂肪酸甲酯进行气相色谱分析, 考察 4 种微藻脂肪酸组成的差异, 结果如表 2 所示.

由图 2 可知, 利用城市污水培养微藻, 微藻干重由大到小依次为 SC-W、CH-M、SC-M、CH-W, 且彼此有显著性差异($P < 0.05$). 该排序与 D_{680} 值排序不同, 主要由于藻种差异, 小球藻个体较小, 单个藻体质量较小, 斜生栅藻个体较大, 单个藻体质量大, 所以虽然 D_{680} 值 CH-M 大于 SC-W, 但微藻干重 SC-W 藻种大于 CH-M 藻种. 微藻油脂含量由多到少依次为: CH-W、SC-W、CH-M、SC-M, 前三者无显著性差异, 但明显高于 SC-M 的油脂含量. 两者综合而

言, 所得微藻油脂产量大小依次为: SC-W、CH-M、CH-W、SC-M, 分别为 0.43、0.33、0.27、0.17 $\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$, 且彼此有显著性差异($P < 0.05$). 因此 SC-W 藻种在 4 种微藻中油脂产量最高, 是其他 3 种微藻油脂产量的 1.3、1.6、2.5 倍. 从该试验结果也可以看出, 经离子注入诱变后的小球藻能较好地保持其优良性能, 而经离子注入诱变后的斜生栅藻随着时间推移, 藻种性能发生了退化.

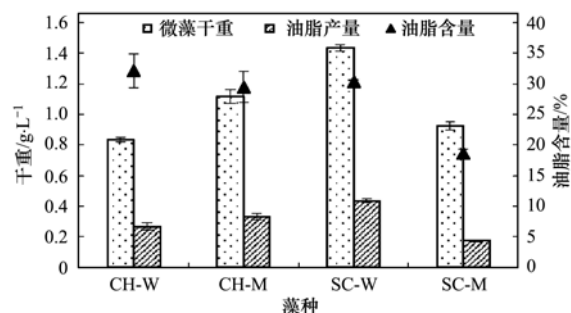


图 2 微藻在城市污水中的产脂情况

Fig. 2 Lipid production of microalgae in the municipal wastewater

由表 2 可知, 4 种微藻在脂肪酸组成上均以 C16、C18 为主, 为绿藻中常见脂肪酸^[17,18]. Song 等^[19]和 Ma 等^[20]的研究表明, 适合制备生物柴油的原料应含有较多的 C16 ~ C18 脂肪酸, 主要包括十六烷酸 (C16:0)、十八烷酸 (C18:0)、十八烯酸 (C18:1)、十八碳二烯酸 (C18:2)、十八碳三烯酸 (C18:3). 4 种微藻中该 5 种脂肪酸在总脂肪酸中的含量占比分别可达 89.34%、90.55%、97.46%、94.81%, 适宜于作为制备生物柴油的原料. 同时, 脂肪酸甲酯的结构会对生物柴油的性能(十六烷值、低温流动性、氧化安定性等)产生影响^[21]. 有研究表明, 生物柴油的十六烷值随着饱和脂肪酸甲酯含量的增加而增加, 多不饱和脂肪酸甲酯含量的增加而降低^[22]. 生物柴油低温流动性随着饱和脂肪酸甲酯尤其是长碳链质量分数增高而变差. 生物柴油的氧化安定性随着不饱和脂肪酸不饱和度增高而变差. 高品位的生物柴油应尽量少地含有多不饱和脂肪酸甲酯和饱和脂肪酸甲酯, 尽量多地含有单不饱和脂肪酸, 以改善其十六烷值、低温流动性、氧化安定性、运动黏度等性能^[23]. 根据欧盟对生产生物柴油原料的严格要求 (EN 14214), 亚麻酸甲酯 (C18:3) 含量需不超过 12%, 多不饱和甲基酯 (≥ 4 个双键) 含量需不超过 1%, 以改善生物柴油的氧化安定性. 从表 1 中可以看出, 除了 SC-M 的 C18:3 含量略大于 12%, 其它均小于 12%. 4 种微藻聚不饱和甲酯 (≥ 4 个双键) 含量均不超过 1%. 值得一

提的是,微藻油脂的脂肪酸组成并非是固定不变的,脂肪酸组成会随着培养条件以及油脂提取条件的变化而变化^[24].因此,可以通过培养条件优化来改善微藻油脂的脂肪酸组成,提高其中单不饱和脂肪酸甲酯的含量,以制备更高品位的生物柴油.

表 2 藻株脂肪酸分析¹⁾/%

Table 2 Fatty acid profiles of the microalgal strains/%

脂肪酸/%	CH-W	CH-M	SC-W	SC-M
C14:0	1.18	0.49	nd	nd
C16:0	41.10	28.02	29.71	36.16
C16:1	1.71	7.76	0.50	4.59
C16:3	1.85	1.19	1.08	0.60
C18:0	31.77	24.02	25.27	28.30
C18:1	nd	nd	4.82	3.45
C18:2	7.59	33.85	28.43	14.78
C18:3	8.88	4.66	9.23	12.12
C18:4	nd	nd	0.97	nd
C22:1	5.92	nd	nd	nd
总饱和脂肪酸	74.05	52.53	54.98	64.46
单不饱和脂肪酸	7.63	7.76	5.31	8.05
多不饱和脂肪酸	18.32	39.70	39.71	27.49

1) nd 表示未检测出

2.1.3 城市污水培养微藻后污染物去除情况

城市污水培养微藻后,污水中的 COD、NH₄⁺-N、TN、TP 去除情况如表 3 所示.从中可知,微藻可以起到很好的水质净化作用,尤其以 CH-M 藻种与 SC-W 藻种污水处理能力最佳,可使污水中 COD 去除率达到 80% 以上,TN、TP 去除率达到 93% 以上.由于微藻培养过程保持碱性环境,氨氮部分变成氨气,在吹脱作用下从水中去除,因此 NH₄⁺-N 的去除效果最好,

表 3 城市污水培养微藻后污染物的去除情况/%

Table 3 Pollutant removal rates from the municipal wastewater after microalgal cultivation/%

指标	CH-W	CH-M	SC-W	SC-M
COD	72.7 ± 2.6	86.4 ± 3.9	81.8 ± 0.0	47.6 ± 2.6
NH ₄ ⁺ -N	100.0 ± 0.0	100 ± 0.0	100 ± 0.0	100 ± 0.0
TN	92.6 ± 1.2	94.3 ± 1.1	94.9 ± 2.8	92.5 ± 2.1
TP	88.5 ± 3.2	93.4 ± 1.3	94.2 ± 0.8	91.2 ± 1.6

微藻培养结束后污水中已检测不到^[25,26].

综合而言,SC-W 与 CH-M 藻种在城市污水中具有较好的生长与产脂性能,同时对污水有较好的净化效果,为适宜于城市污水培养的高效藻种.

2.2 城市污水培养微藻污水预处理

2.2.1 沉淀、过滤预处理

城市污水采用原污水、沉淀污水、过滤污水、沉淀 + 过滤污水这 4 种预处理方式,预处理后的污水水质情况如表 4 所示.将 SC-W、CH-M 按照初始浓度 $D_{680} = 0.1$ 分别接种到不同预处理方式处理后的城市污水中,取稳定期的藻液测其微藻干重,油脂产量并计算其油脂含量.所得结果如图 3、图 4 所示.

由表 4 可知,城市污水中 COD 含量经沉淀处理后变化不大,经过滤、沉淀与过滤联合处理后降低.城市污水中 NH₄⁺-N、TN、TP 含量经沉淀、过滤处理后有所降低,经沉淀与过滤联合处理后进一步降低.总体而言,原污水中氮、磷等营养物质较为丰富,但悬浮物也较多,随着处理程度的加深,悬浮物减少,但污水中的营养物质损耗也会相应增加.

表 4 城市污水预处理后水质/mg·L⁻¹

Table 4 Water quality of the wastewater after pretreatment/mg·L⁻¹

指标	原污水	沉淀	过滤	沉淀 + 过滤
COD	154.67 ± 0	154.67 ± 2.51	114.67 ± 1.26	121.33 ± 3.14
NH ₄ ⁺ -N	28.10 ± 0.07	24.46 ± 0.07	24.91 ± 0.04	23.66 ± 0.05
TN	29.26 ± 0.63	26.66 ± 0.04	25.12 ± 0.21	24.62 ± 0.12
TP	6.16 ± 0.05	4.63 ± 0.09	4.32 ± 0.09	4.31 ± 0.08

由图 3、图 4 可知,不同的微藻具有不同的耐污性能,对污水预处理程度的要求也不同. SC-W 在原污水中生物质产量最高,当使用沉淀、过滤单种预处理方式处理污水后,会造成微藻干重的降低,当使用沉淀与过滤联合预处理方式处理污水后,会造成微藻干重的进一步降低.由此可以看出斜生栅藻具有较强的耐污性能,当污水中营养物质越丰富时,生长越好.微藻油脂产量由微藻生物质产量和微藻油脂含量共同决定,四种预处理方式中,原污水预处理

方式微藻生物质产量最高,微藻油脂含量较高,所以总的微藻油脂产量最高,为 0.19 g·L⁻¹.因此,城市污水可不经沉淀、过滤处理,直接除去粗大悬浮物后作为培养基用于 SC-W 的培养.而 CH-M 在原污水中的干重最低,当经沉淀、过滤单种预处理方式处理污水后,干重有所提高,当使用沉淀与过滤联合预处理方式处理污水后干重最高.4 种预处理方式中,沉淀与过滤联合处理方式,CH-M 油脂产量显著高于其它 3 组($P < 0.05$),为 0.16 g·L⁻¹.由此可以

看出,小球藻比较喜欢相对洁净的环境,当污水中浊度越低时,生长越好. 试验中发现污水浊度较高试验组,CH-M 更易于沉淀,因此不利于其与营养物充分接触,会对其生长产生影响. 因此,城市污水经沉淀+过滤预处理后更适合作为培养基用于 CH-M 的培养.

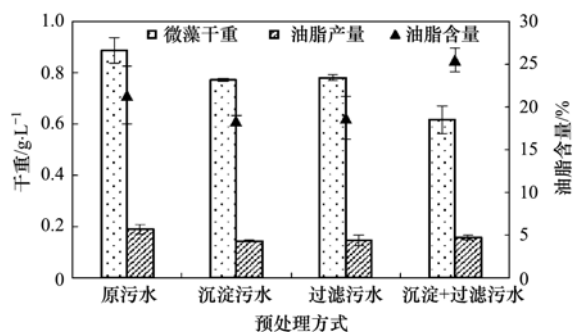


图3 SC-W 在不同预处理方式城市污水中产脂情况

Fig. 3 Lipid production of SC-W in the municipal wastewater with different pretreatments

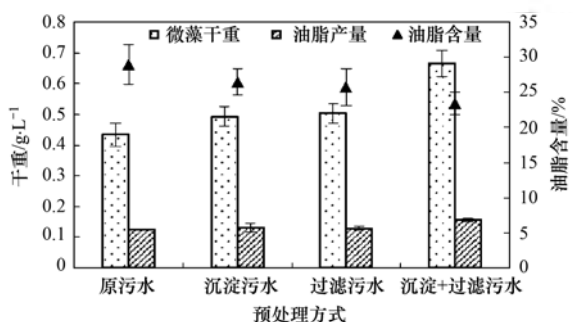


图4 CH-M 在不同预处理方式城市污水中产脂情况

Fig. 4 Lipid production of CH-M in the municipal wastewater with different pretreatments

2.2.2 灭菌预处理

微藻与细菌之间存在互生、拮抗等复杂的相互关系. 菌藻的互生关系表现在微藻通过光合作用释放出氧气供给细菌进行代谢活动,而细菌将水中有机污染物降解转化为二氧化碳、无机氮、磷化合物等,为微藻提供光合作用所需的碳源和营养,如此循环,形成藻菌之间互生的关系. 菌藻拮抗关系表现在,微藻能够产生抑制细菌生长的抗生素类物质,且微藻生长会导致 pH 与溶解氧的升高,从而抑制某些细菌的生长等,而细菌也可能通过释放可溶解纤维素的酶等胞外物抑制甚至裂解藻细胞,或在生长过程中,附着于反应器内壁,阻碍光线的透射,从而影响微藻的光合生长. 为消除细菌对微藻的影响,文献中常对污水采取灭菌预处理. 但灭菌预处理也存在着成本高、难以扩大的问题.

对城市污水进行灭菌预处理,以原污水作为对

照. 将 SC-W、CH-M 按照初始浓度 $D_{680} = 0.1$ 分别接种到不同预处理方式处理后的城市污水中,取稳定期的藻液测其微藻干重,油脂产量并计算其油脂含量. 所得结果如图 5、图 6 所示.

由图 5、图 6 可知,与不同的微藻具有不同的耐污性能相似,灭菌对不同微藻的生长与产脂的影响也不同. 耐污性能较强的 SC-W 在原污水中生物质与油脂产量高于灭菌污水中的生物质与油脂产量,油脂含量两者相差不大,灭菌组略高. 故 SC-W 在原污水中油脂产量较高主要归因于其生物质产量较高,说明城市污水中的细菌对 SC-W 的生长有促进作用,该结论与 Ryu 等^[7] 所得结论一致. 而 CH-M 在灭菌污水中生物质产量较高,说明城市污水中的细菌对 CH-M 的生长有一定的抑制作用. 灭菌组与原污水组的油脂产量无显著性差异.

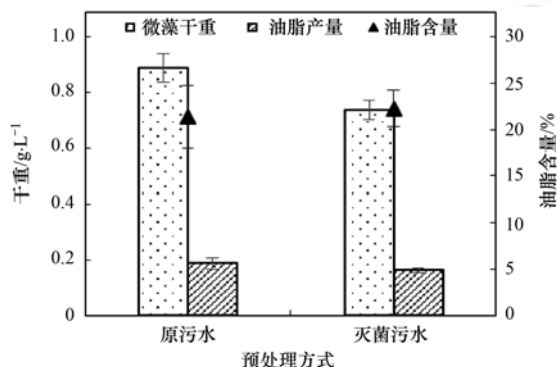


图5 SC-W 在不同预处理方式城市污水中产脂情况

Fig. 5 Lipid production of SC-W in the municipal wastewater with different pretreatments

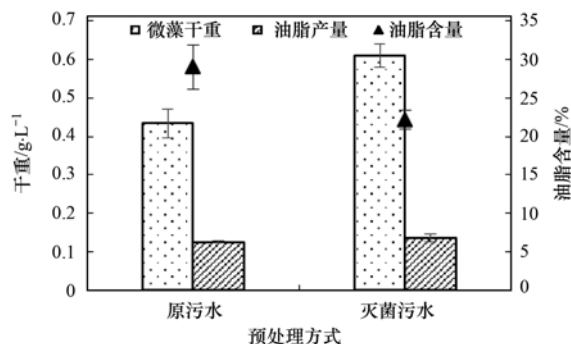


图6 CH-M 在不同预处理方式城市污水中产脂情况

Fig. 6 Lipid production of CH-M in the municipal wastewater with different pretreatments

综合考虑微藻在不同污水预处理方式下的生物质与油脂产量及污水预处理的成本与可操作性. 对于 SC-W,除去粗大悬浮物后的原污水可以不经任何处理,直接用于 SC-W 的培养,该结果对于低成本的微藻培养十分有利. 对于 CH-M,沉淀+过滤预处理、灭菌预处理方式下,CH-M 的生物质产量较

高,且沉淀+过滤预处理方式下,CH-M 油脂产量略高于灭菌预处理($P < 0.05$)。同时考虑到污水灭菌处理的高成本、难以扩大,原污水可经沉淀+过滤预处理后用于 CH-M 的培养。

3 结论

(1)斜生栅藻、蛋白核小球藻原始株及经离子注入诱变的诱变株均可在实际城市污水中生长。其中斜生栅藻原始株、蛋白核小球藻原始与诱变株生长情况较好, D_{680} 可达 1.5 以上,斜生栅藻原始与诱变株生长稳定性较好,可较长时间保持在稳定期。

(2)斜生栅藻原始株与蛋白核小球藻诱变株生物质与油脂产量较高,且含有较多的 C16-C18 脂肪酸,适宜于生物柴油的制备。经离子诱变后的蛋白核小球藻能较好地保持其优良性能,而经离子诱变后的斜生栅藻随着时间推移,藻种性能发生了退化。

(3)微藻可以起到很好的水质净化作用。尤其以蛋白核小球藻诱变株与斜生栅藻原始株的污水处理能力最佳,可使污水中 COD 去除率达到 80% 以上, TN、TP 去除率达到 93% 以上。其中 NH_4^+-N 的去除效果最好,微藻培养结束后污水中已检测不到。

(4)不同藻种所最适的污水预处理方式不同。综合考虑微藻在不同污水预处理方式下的生物质与油脂产量及污水预处理的成本与可操作性,对于耐污性能较强的斜生栅藻原始株,除去粗大悬浮物后的原污水可直接用于其培养。对于蛋白核小球藻诱变株,经沉淀+过滤预处理后的城市污水适宜于其培养。

参考文献:

- [1] Chisti Y. Constraints to commercialization of algal fuels [J]. Journal of Biotechnology, 2013, **167**(3): 201-214.
- [2] Han S F, Jin W B, Tu R J, et al. Biofuel production from microalgae as feedstock: current status and potential [J]. Critical Reviews in Biotechnology, 2015, **35**(2): 255-268.
- [3] Abomohra A E F, Jin W B, Tu R J, et al. Microalgal biomass production as a sustainable feedstock for biodiesel: current status and perspectives [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016, **64**: 596-606.
- [4] Yang J, Xu M, Zhang M X, et al. Life-cycle analysis on biodiesel production from microalgae: water footprint and nutrients balance [J]. Bioresource Technology, 2011, **102**(1): 159-165.
- [5] del Mar Morales-Amaral M, Gómez-Serrano C, Ación F G, et al. Production of microalgae using centrate from anaerobic digestion as the nutrient source [J]. Algal Research, 2015, **9**: 297-305.
- [6] Ramsundar P, Guldhe A, Singh P, et al. Assessment of municipal wastewaters at various stages of treatment process as potential growth media for *Chlorella sorokiniana* under different modes of cultivation [J]. Bioresource Technology, 2017, **227**: 82-92.
- [7] Ryu B G, Kim E J, Kim H S, et al. Simultaneous treatment of municipal wastewater and biodiesel production by cultivation of *Chlorella vulgaris* with indigenous wastewater bacteria [J]. Biotechnology and Bioengineering, 2014, **19**(2): 201-210.
- [8] Mahapatra D M, Chanakya H N, Ramachandra T V. Bioremediation and lipid synthesis through mixotrophic algal consortia in municipal wastewater [J]. Bioresource Technology, 2014, **168**: 142-150.
- [9] Muñoz R, Guieysse B. Algal-bacterial processes for the treatment of hazardous contaminants: a review [J]. Water Research, 2006, **40**(15): 2799-2815.
- [10] Abdelaziz A E M, Leite G B, Belhaj M A, et al. Screening microalgae native to Quebec for wastewater treatment and biodiesel production [J]. Bioresource Technology, 2014, **157**: 140-148.
- [11] Massimi R, Kirkwood A E. Screening microalgae isolated from urban storm-and wastewater systems as feedstock for biofuel [J]. PeerJ, 2016, **4**: e2396.
- [12] Tu R J, Jin W B, Wang M, et al. Improving of lipid productivity of the biodiesel promising green microalga *Chlorella pyrenoidosa* via low-energy ion implantation [J]. Journal of Applied Phycology, 2016, **28**(4): 2159-2166.
- [13] Stanier R Y, Kunisawa R, Mandel M, et al. Purification and properties of unicellular blue-green algae (order Chroococcales) [J]. Bacteriological Reviews, 1971, **35**(2): 171-205.
- [14] Folch J, Lees M, Stanley G H S. A simple method for the isolation and purification of total lipides from animal tissues [J]. The Journal of Biological Chemistry, 1957, **226**(1): 497-509.
- [15] Kaczmarzyk D, Fulda M. Fatty acid activation in cyanobacteria mediated by acyl-acyl carrier protein synthetase enables fatty acid recycling [J]. Plant Physiology, 2010, **152**(3): 1598-1610.
- [16] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法 [M]. (第四版). 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [17] 刘林林, 黄旭雄, 危立坤, 等. 15 株微藻对猪场养殖污水中氮磷的净化及其细胞营养分析 [J]. 环境科学学报, 2014, **34**(8): 1986-1994.
- [18] Liu L L, Huang X X, Wei L K, et al. Removal of nitrogen and phosphorus by 15 strains of microalgae and their nutritional values in piggery sewage [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2014, **34**(8): 1986-1994.
- [19] Vidyashankar S, VenuGopal K S, Swarnalatha G V, et al. Characterization of fatty acids and hydrocarbons of chlorophycean microalgae towards their use as biofuel source [J]. Biomass and Bioenergy, 2015, **77**: 75-91.
- [20] Song M M, Pei H Y, Hu W R, et al. Evaluation of the potential of 10 microalgal strains for biodiesel production [J]. Bioresource Technology, 2013, **141**: 245-251.
- [21] Ma Y B, Wang Z Y, Yu C J, et al. Evaluation of the potential of 9 *Nannochloropsis* strains for biodiesel production [J]. Bioresource Technology, 2014, **167**: 503-509.
- [22] Stansell G R, Gray V M, Sym S D. Microalgal fatty acid composition: implications for biodiesel quality [J]. Journal of Applied Phycology, 2012, **24**(4): 791-801.

- [22] 方利国, 林璟. 脂肪酸甲酯对生物柴油十六烷值影响的研究[J]. 化工新型材料, 2008, **36**(11): 94-96.
- [23] Hoekman S K, Broch A, Robbins C, *et al.* Review of biodiesel composition, properties, and specifications[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2012, **16**(1): 143-169.
- [24] Han S F, Jin W B, Tu R J, *et al.* Optimization of aeration for biodiesel production by *Scenedesmus obliquus* grown in municipal wastewater[J]. Bioprocess and Biosystems Engineering, 2016, **39**(7): 1073-1079.
- [25] Ebrahimian A, Kariminia H, Vosoughi M. Lipid production in mixotrophic cultivation of *Chlorella vulgaris* in a mixture of primary and secondary municipal wastewater [J]. Renewable Energy, 2014, **71**: 502-508.
- [26] 赵凤敏, 梅帅, 曹有福, 等. 基于沼液的培养基及产油小球藻种选育[J]. 环境科学, 2014, **35**(6): 2300-2304.
- Zhao F M, Mei S, Cao Y F, *et al.* Culture medium based on biogas slurry and breeding of oil *Chlorella* [J]. Environmental Science, 2014, **35**(6): 2300-2304.

《环境科学》多项引证指标名列前茅

2016年10月12日,中国科学技术信息研究所在中国科技论文统计结果发布会上公布了2015年度中国科技论文统计结果. 统计结果显示《环境科学》2015年度总被引频次8 844,影响因子1.617,多项引证指标位居环境科学技术及资源科学技术类科技期刊前列.



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, <i>et al.</i>	(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)