

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第6期

Vol.35 No.6

2014

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

北京地区冬夏季持续性雾-霾发生的环境气象条件对比分析..... 廖晓农, 张小玲, 王迎春, 刘伟东, 杜佳, 赵玲慧 (2031)

阜康大气气溶胶中水溶性无机离子粒径分布特征研究 苗红妍, 温天雪, 王跃思, 刘子锐, 王丽, 兰中东 (2045)

上海地铁站台大气颗粒物中过渡金属研究 包良满, 雷前涛, 谈明光, 李晓林, 张桂林, 刘卫, 李燕 (2052)

七一冰川地区苔藓中重金属元素含量研究 马娟娟, 李真 (2060)

冬季东海、南黄海中 DMS 和 DMSP 浓度分布及影响因素研究 宋以柱, 张洪海, 杨桂朋 (2067)

大亚湾石化排污海域重金属污染及生态风险评价 徐姗姗, 李纯厚, 徐娇娇, 肖雅元, 林琳, 黄小平 (2075)

深圳水库群表层水中全氟化合物的分布特征 王鑫璇, 张鸿, 何龙, 沈金灿, 柴之芳, 杨波, 王艳萍 (2085)

表层岩溶泉水中多环芳烃污染特征及来源解析 孙玉川, 沈立成, 袁道先 (2091)

桂江主要离子及溶解无机碳的生物地球化学过程 唐文魁, 陶贞, 高全洲, 毛海若, 姜光辉, 焦树林, 郑雄波, 张乾柱, 马赞文 (2099)

汾河源区不同景观带水文过程研究 杨永刚, 李彩梅, 秦作栋, 邹松兵 (2108)

北京市通州区地下水分层质量评价及水化学特征 郭高轩, 琚宜文, 翟航, 许亮, 沈媛媛, 纪轶群 (2114)

光透法定量两相流中流体饱和度的模型及其应用 章艳红, 叶淑君, 吴吉春 (2120)

紫色土坡耕地氮淋溶过程及其环境健康效应 陈维梁, 高扬, 林勇明, 朱波, 徐亚娟, 于贵瑞, 吴承祯 (2129)

基于非点源溶解态氮负荷估算的率水流域土地利用结构优化研究 陆宇超, 毕孟飞, 李泽利, 沙健, 王玉秋, 钱丽萍 (2139)

镇江老城区古运河沉积物氮及有机质垂向分布及污染评价 周晓红, 李义敏, 周艺, 卫安平, 周广顺, 肖思思 (2148)

两种沉水植物对上覆水和间隙水中可溶性无机氮的影响 杨文斌, 李阳, 孙共献 (2156)

湖泊沉积物短时间反复扰动下悬浮物上生物有效磷的动态变化 武晓飞, 李大鹏 (2164)

不同扰动强度下城市重污染河道底泥对磷吸收和固定的影响 王尚, 李大鹏 (2171)

池塘残饵对底泥氮、磷释放影响的模拟研究 吕元蛟, 李瑞娇, 张念, 赵峰, 谢从新, 张敏 (2178)

再悬浮过程中河流底泥 PAHs 的迁移与释放 王晓慧, 毕春娟, 韩景超 (2185)

低分子有机酸对汞氧化还原反应的影响 赵士波, 孙荣国, 王定勇, 王小文, 张成 (2193)

活性炭催化过氧化氢去除荧光增白剂 刘海龙, 张忠民, 赵霞, 焦茹媛 (2201)

准分子灯光照降解水中烷基酚的动力学 刘玉海, 叶招莲, 文颖频, 毕承路 (2209)

AF + BAF 用于处理树脂化工集中区废水厂尾水的研究 涂勇, 刘伟京, 张耀辉, 徐军, 唐敏, 陈勇, 白永刚 (2216)

镉(II)-8-羟基喹啉分子印迹聚合物微球的合成及吸附性能研究 杨春艳, 陈复彬, 赵慧, 常自强, 章竹君 (2223)

微气泡曝气生物膜反应器同步硝化反硝化研究 刘春, 年永嘉, 张静, 张明, 张磊, 龚鹏飞, 肖太民, 李星 (2230)

聚乳酸/淀粉固体缓释碳源生物反硝化研究 唐丹琦, 王娟, 郑天龙, 刘建国, 汪群慧 (2236)

丝状菌膨胀对无纺布生物反应器处理效果及膜污染特征的影响 侍宽, 薛罡, 高品, 吴凡 (2241)

聚合氯化铝去除污泥水中磷的工艺优化 周振, 胡大龙, 乔卫敏, 陈冠翰, 蒋玲燕, 李震, 麦穗海 (2249)

鄱阳湖持久性有机污染物 (POPs) 长距离传输潜力模拟 弓晓峰, 向洪锐, 陈春丽, 周文斌, 王佳佳, 刘春英, 曾艳 (2256)

基于不确定性分析的垃圾焚烧烟气中重金属的土壤沉积及生态风险评估 廖志恒, 孙家仁, 吴兑, 范绍佳, 任明忠, 吕家扬 (2264)

农药企业场地土壤中苯系物污染风险及管理对策 谭冰, 王铁宇, 李奇锋, 张海燕, 庞博, 朱朝云, 王道涵, 吕永龙 (2272)

渤海湾海域 10 种鱼类中二噁英类及指示性多氯联苯的污染特征研究及风险评价 王莎莎, 高丽荣, 田益玲, 朱帅, 张芹 (2281)

基于荧光传感器 F_{rex} 的特性检测水质环境中生物毒性物质 赵巍, 汪钊, 蔡强, 欧文斌, 孟凡国 (2287)

对苯二酚抑制铜绿微囊藻生长下藻毒素的产生与释放 张元春, 梁文艳, 赵远, 李飞贞, 曹敬灿, 胡绍杰 (2294)

基于沼液的培养基及产油小球藻藻种选育 赵凤敏, 梅帅, 曹有福, 丁进锋, 徐嘉杰, 李树君 (2300)

酸性矿山废水库周边土壤微生物多样性及氨氧化菌群落研究 刘莹, 王丽华, 郝春博, 李璐, 李思远, 冯传平 (2305)

河蚬 (*Corbicula fluminea*) 扰动对表层沉积物中氨氧化菌群落结构和丰度的影响 王雪, 赵大勇, 曾巾, 余多慰, 吴庆龙 (2314)

海洋油气田沉积物产甲烷活性及微生物生态 田琪, 王佳, 范晓蕾, 罗生军, 郭荣波, 邱艳玲 (2322)

DGGE 及 T-RFLP 分析光照下电位对细菌群落的影响 吴义诚, 邓欢, 肖勇, 赵峰 (2328)

重金属抗性解磷细菌的磷溶解特性研究 田江, 彭霞薇, 李霞, 孙雅君, 冯红梅, 江泽平 (2334)

1 株耐冷兼性嗜碱好氧反硝化菌的分离鉴定及反硝化特性 王兆阳, 陈国耀, 姜珂, 许培雅 (2341)

黑麦草-丛枝菌根对不同番茄品种抗氧化酶活性、镉积累及化学形态的影响 江玲, 杨芸, 徐卫红, 王崇力, 陈蓉, 熊仕娟, 谢文文, 张进忠, 熊治庭, 王正银, 谢德体 (2349)

黄河三角洲区土壤活性氮对盐分含量的响应 李玲, 仇少君, 陈印平, 赵西梅, 刘京涛, 陆兆华 (2358)

宁南山区不同草地土壤原位矿化过程中氮素的变化特征 蒋跃利, 赵彤, 闫浩, 黄懿梅 (2365)

长期施用四环素残留猪粪对土壤中耐药菌及抗性基因形成的影响 张俊, 杨晓洪, 葛峰, 王娜, 焦少俊, 叶波平 (2374)

长期不同耕作方式对紫色水稻土重金属含量及有效性的影响 常同举, 崔孝强, 阮震, 赵秀兰 (2381)

伊犁河流域土壤重金属环境地球化学基线研究及污染评价 赵新儒, 特拉津·那斯尔, 程永毅, 詹江渝, 杨剑虹 (2392)

江苏如东互花米草盐沼湿地重金属分布及其污染评价 张龙辉, 杜永芬, 王丹丹, 高抒, 高文华 (2401)

小流域农业面源氮污染时空特征及与土壤呼吸硝化关系分析 欧阳威, 蔡冠清, 黄浩波, 耿晓君 (2411)

保护性耕作下小麦田土壤呼吸及碳平衡研究 张赛, 王龙昌, 黄召存, 贾会娟, 冉春燕 (2419)

米楮天然林和人工林土壤呼吸的比较研究 吴君君, 杨智杰, 翁发进, 刘小飞, 陈朝琪, 林伟盛, 王小红, 陈坦 (2426)

水力停留时间对复合式厌氧折流板反应器乙醇型发酵制氢系统的影响 刘晓焯, 张洪, 李永峰 (2433)

《环境科学》征订启事 (2208) 《环境科学》征稿简则 (2400) 信息 (2084, 2200, 2229, 2391)

基于沼液的培养基及产油小球藻藻种选育

赵凤敏, 梅帅, 曹有福, 丁进锋, 徐嘉杰, 李树君*

(中国农业机械化科学研究院, 北京 100083)

摘要: 将产油小球藻培养与沼液污水处理结合, 为小球藻生长提供营养和水源, 同时实现了沼液污水的无害化处理. 本研究利用 4 种产油小球藻, 在沼液污水与绿藻培养基体积比为 1:9、1:3、1:1、3:1 形成的培养基中培养, 以产油率为指标, 选育出获得最高产油率时的沼液污水-绿藻培养基配比和小球藻藻种. 结果表明, 产油率最高的培养基体积比为 1:3, 小球藻藻种为 BJ05, 该工况下产油率达到 $9.20 \text{ mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{d})^{-1}$, 高于纯绿藻培养基中的 $8.66 \text{ mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{d})^{-1}$. 在 1/4 污水比例培养基基础上, 考查添加绿藻培养基中不同营养组分对 BJ05 产油率的影响, 结果发现, 在同时不添加碳酸钠和柠檬酸的情况下, BJ05 的产油率为 $9.36 \text{ mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{d})^{-1}$, COD、TN(总氮)、TP(总磷)、 NH_4^+ -N 去除率分别达到 59%、75%、61%、100%. 而其他营养成分缺失则显著降低了 BJ05 的生物量, 进而降低了产油率, 所以进一步优化培养基为绿藻培养基中不添加碳酸钠和柠檬酸的体积比为 1:3 的沼液污水-绿藻培养基.

关键词: 沼液; 产油小球藻; 培养基; 产油率; 选育; 去除率

中图分类号: X382; X703 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)06-2300-05 DOI: 10.13227/j.hjcx.2014.06.036

Culture Medium Based on Biogas Slurry and Breeding of Oil Chlorella

ZHAO Feng-min, MEI Shuai, CAO You-fu, DING Jin-feng, XU Jia-jie, LI Shu-jun

(Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences, Beijing 100083, China)

Abstract: The oil chlorella cultivation and biogas slurry treatment were combined. The biogas slurry provided water and nutrient for growing chlorella, at the same time, harmless treatment of biogas slurry was realized. This paper cultivated 4 species of oil chlorella in the mixed medium of biogas slurry and green algae medium (the volume ratios were 1:9, 1:3, 1:1 and 3:1, respectively), and compared their oil productivity to select the best oil chlorella species and the optimal culture medium. The results showed that, the combination of medium and chlorella species to reach the highest oil productivity was a volume ratio of 1:3 and the chlorella species BJ05, and the oil productivity of chlorella BJ05 was $9.20 \text{ mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{d})^{-1}$, higher than that in green algae medium [$8.66 \text{ mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{d})^{-1}$]. In mixed medium with a volume ratio of 1:3, the effect of adding different nutrients into the green algae medium on the oil productivity was examined, and the results showed that, sodium carbonate and citric acid had no negative effect on the oil productivity of chlorella BJ05. In the absence of sodium carbonate and citric acid, the oil productivity of chlorella BJ05 was $9.36 \text{ mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{d})^{-1}$, and the removal of COD(chemical oxygen demand), total nitrogen, total phosphorus and ammonia nitrogen rates were 59%, 75%, 61% and 100%, respectively. Deficiency in other nutrients had negative effect on the oil productivity. Therefore, the culture medium was further optimized to the mixed medium of biogas slurry and green algae medium with a volume ratio of 1:3 and without addition of sodium carbonate and citric acid.

Key words: biogas slurry; oil chlorella; culture medium; oil productivity; breed; removal rate

微藻是高效的光合作用水生生物,其细胞主要化学成分是脂类、蛋白质、纤维素和木质素等^[1]. 微藻中的脂肪酸多为 C14 ~ C18, 这些脂肪酸是生物柴油的主要成分^[2,3]. 微藻环境适应能力很强,可在淡水、海水和多种污水中生长,仅占用少量的土地资源,生产生物柴油的潜力巨大^[4,5]. 能源微藻中的产油小球藻可以进行工业化生产,是理想的能源微藻资源^[6,7]. 因此,本研究利用适合大规模培养、油脂含量较高、研究较为成熟的产油小球藻作为试验原料.

微藻的生长需要大量的水、养料(碳源、氮源和磷源等)以及光照,这些培养成本导致微藻生物柴油价格是石油价格的 2 倍多^[8]. 微藻生物柴油要真正成为一种替代能源,降低其培养成本至关重要.

微藻生长所需的光照可利用自然光,碳源可利用空气、烟道气中的 CO_2 等,所以大量的水和其他养料来源成了关键. 牛粪发酵后的沼液污水中含有大量的氮磷以及有机碳(可提供微藻生长所需的碳源)等成分,非常适合微藻的生长,使微藻的大规模培养减少了水的消耗,同时解决了部分养料来源问题^[9,10],大大降低了生物柴油生产成本.

人们往往希望利用高污染的污水进行微藻培养,虽然意义重大,但是由于其组成复杂及污染物浓

收稿日期: 2013-10-11; 修订日期: 2013-11-28

基金项目: 国际科技合作项目(2010DFB63750)

作者简介: 赵凤敏(1973~),女,研究员,主要研究方向为农产品加工及工程, E-mail: meishuaiyu@sina.com

* 通讯联系人, E-mail: meishuaiyu@sina.com

度过高,导致微藻的适应周期过长甚至抑制了微藻生长,大大降低了产油率,故难以形成持续化的大规模供应. 不同的藻种污水适应能力不同,故对于污染物浓度过高的污水需要进行一定的处理,并且污水中并不一定含有微藻所需生长的全部营养元素,有些营养成分需要另外添加^[11,12]. 因此本研究利用 4 种产油小球藻,在不同体积比的沼液污水与绿藻培养基形成的混合培养基中,分析了沼液污水培养微藻的可行性,选育最高产油率时产油小球藻和沼液污水培养基组合,在最高产油率的小球藻和沼液污水培养基的基础上,继续考察在沼液污水中添加不同营养成分藻细胞的产油率以及氮磷的去除效率,进一步优化沼液污水培养基,以期利用沼液污水大规模培养产油小球藻奠定基础.

1 材料与方法

1.1 材料、试剂

试验所用的小球藻 BJ01 (*Chlorella* sp.)、小球藻 BJ05 (*Chlorella pyrenoidosa*)、小球藻 BJ07 (*Chlorella vulgaris*) 由本实验室自行筛选获得,为了便于区分,将美国明尼苏达大学阮榕生教授惠赠的小球藻 (*Chlorella* sp.) 编号为 BJ09. 所用试剂均为分析纯.

1.2 主要仪器、设备

电热鼓风干燥箱(北京市永光明医疗仪器厂 101-IEBS)、电子天平(赛多利斯仪器系统有限公司 BS223S)、高速冷冻离心机(上海卢湘仪离心仪器有限公司 GL-21M)、水质分析仪(默克 Pharo 300)、真空冷冻干燥机(中国农机院研制)、恒温水浴锅(上海森信水浴锅有限公司 DK-S24)、超静音可调式气泵(广东海利有限公司 ACO-9602).

1.3 试验方法

1.3.1 沼液预处理

沼液取自中国农业机械化科学研究院农业生态科技园沼液发酵池,加入 4 倍清水搅拌经自然沉降 1 周后弃去沉淀,6 000 r·min⁻¹ 离心 10 min 取上清液,上述方式处理获得共 50 L 的沼液污水备用. 分析上清液的水质指标化学需氧量(COD)、总氮(TN)、总磷(TP)、铵态氮(NH₄⁺-N),该沼液污水的 pH 为 6.4,结果见表 1.

1.3.2 小球藻的培养

绿藻培养基中各营养成分是标准 BG11 培养基^[13]中的 2 倍,其组成(mg·L⁻¹)如下: NaNO₃ 3 000; MgSO₄·7H₂O 150; CaCl₂·2H₂O 72; 柠檬酸,

12; Na₂EDTA 2; 柠檬酸铁铵 12; Na₂CO₃ 40; KH₂PO₄·H₂O 80; 微量元素(A5): ZnSO₄·7H₂O 0.444; CuSO₄·7H₂O 0.158; MnCl₄·4H₂O 3.62; Na₂MoO₄·2H₂O 78; Co(NO₃)₂·6H₂O 0.098; H₃BO₃ 5.72.

表 1 处理后得到的沼液污水水质指标

指标	COD	TN	TP	NH ₄ ⁺ -N
含量/mg·L ⁻¹	2 590	61.8	38.2	6.8

以绿藻培养基培养的 4 种处于对数生长期的 4 种小球藻为种子液,接种到如表 2 所示的 5 种试验组培养基中,接种后的干重折合约(0.1 ± 0.01) g·L⁻¹,于温度为(26 ± 1)℃,光强为(5 000 ± 500) lx 条件下,在培养体积为 2 L 的三角瓶中,由底部连续通入空气培养(空气流速为 60 L·h⁻¹) 18 d. 每天取 20 mL 测生物量. 培养结束后离心藻液,干燥测得最终生物量、含油率、产油率同时检测培养液中 COD (chemical oxygen demand, 化学需氧量)、TN (总氮)、TP (总磷)、NH₄⁺-N 去除率. 每组设 3 个平行对照.

表 2 5 种培养基的体积组成

项目	培养基编号				
	1	2	3	4	5
沼液污水比例	0	1/10	1/4	1/2	3/4
绿藻培养基比例	1	9/10	3/4	1/2	1/4

在 5 种培养基筛选得到的培养基基础上,利用营养缺陷试验进一步优化培养基,营养缺陷组的试验安排如表 3 所示.

1.3.3 细胞生长与生物量测定

试验期间每天上午 10:00 取各试验组藻液 20 mL 于 50 mL 离心管(提前烘至恒重 W₁)中 6 000 r·min⁻¹ 离心 10 min,弃上清液,将含有藻体的离心管于 105℃ 烘箱下烘至恒重(W₂),藻细胞生物量 DW(g·L⁻¹)的计算式如下:

$$DW = (W_2 - W_1) / 20 \times 10^{-3} \quad (1)$$

式中, W₁ 为空管质量(g), W₂ 为烘后管和物料总质量(g).

1.3.4 细胞含油率测定

小球藻油脂提取方法如下^[14-16]:准确称取待测藻粉各 1.0 g(W₄)于研钵中,加入 1.0 g 石英砂,研磨 5 min,转入碘量瓶,加入 100 mL 乙醚,在超声波功率为 500 W 下每超声 5 s 间歇 10 s,反复 20 次后,

表 3 培养基营养元素筛选试验

Table 3 Experimental group arrangements for the screening of nutrients in wastewater medium

组成	试验组编号								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
NaNO ₃	-	+	+	+	+	+	+	+	+
KH ₂ PO ₄	+	-	+	+	+	+	+	+	+
MgSO ₄ ·7H ₂ O	+	+	-	+	+	+	+	+	+
CaCl ₂ ·2H ₂ O	+	+	+	-	+	+	+	+	+
柠檬酸	+	+	+	+	-	+	+	+	+
柠檬酸铁铵	+	+	+	+	+	-	+	+	+
Na ₂ EDTA	+	+	+	+	+	+	-	+	+
Na ₂ CO ₃	+	+	+	+	+	+	+	-	+
A ₅	+	+	+	+	+	+	+	+	-

置于通风橱中提取 12 h 后用滤纸过滤,并用少量乙醚洗涤三角瓶和滤渣 3 次过滤至 250 mL 三角瓶中,60℃ 水浴锅中蒸发浓缩至干后,将三角瓶置于 105℃ 烘箱中烘至恒重,准确称取油脂质量(W_3),计算含油率 $u(\%)$:

$$u = W_3/W_4 \times 100\% \quad (2)$$

式中, W_3 为油脂质量(g), W_4 为藻粉质量(g).

1.3.5 产油率测定

产油率 m 定义为平均每天每升培养基中的藻细胞所产的油脂质量,它综合考虑了单位体积培养基中微藻能达到的生物量和藻体含油率两个因素.产油率 $m[\text{mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{d})^{-1}]$ 计算公式为:

$$m = DW \times u/t \times 10^{-3} \quad (3)$$

式中, DW 为生物量($\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$), u 为含油率(%), t 为培养天数(d).

1.3.6 COD、TN、TP、NH₄⁺-N 去除率测定

利用水质分析仪进行测定.

2 结果与分析

2.1 4 种小球藻在不同培养基中的生物量、含油率和产油率

每天监测各组生物量变化,并收获各试验组第 18 d 的藻液,测得各试验组的生物量、含油率和产油率如图 1~3 所示.由图 1 可以看出,在 4 号和 5 号培养基中,4 种小球藻的生物量较在 1 号、2 号、3 号培养基中显著降低,可见,沼液污水所占比例过高会显著抑制小球藻的生长,特别是在沼液污水占 3/4 的 5 号培养基中,4 种小球藻的生长量几乎为零;而在 2 号和 3 号培养基中的 4 种小球藻的生物量与 1 号培养基中得到的生物量相差不大,所以一定比例范围内的污水浓度对小球藻的生长没有影响,利用沼液污水配制而成的培养基是可行的.相比较 4 种小球藻,在不同比例的污水培养基中,小球藻 BJ05

和 BJ01 的生物量均显著大于 BJ07 和 BJ09,说明小球藻 BJ05 和 BJ01 的适应污水环境能力更强;除了在 1 号不含污水的绿藻培养基中,小球藻 BJ05 的生物量小于小球藻 BJ01 的生物量,而在 2~5 号含不同污水比例的培养基中,小球藻 BJ05 的生物量均略大于小球藻 BJ01 的生物量.

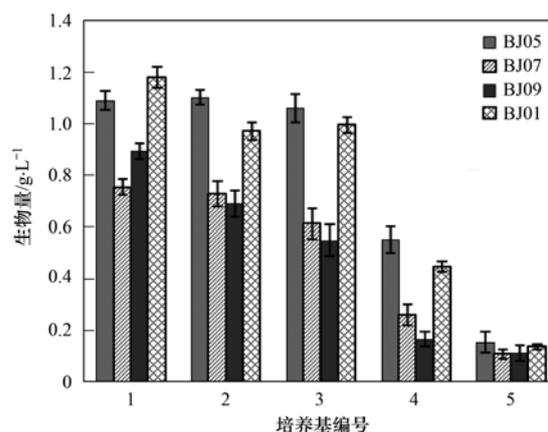


图 1 不同小球藻在 5 种培养基中的生物量比较

Fig. 1 Biomass of different chlorella in the 5 kinds of culture medium

图 2 可以看出,4 种小球藻在 5 种培养基中的藻细胞含油率在 8.3%~16.2% 间浮动,在 5 种培养基中,BJ05 的细胞含油率均比其他 3 种小球藻高,在 5 号培养基中 BJ05 的细胞含油率达到最高,为 16.2%,其次为 3 号培养基中的 15.6%.

图 3 可以看出,在生物量和含油率二者的综合影响下,4 种小球藻在 5 种培养基中的产油率相差较大,BJ05 和 BJ01 由于其生物量和细胞含油率均较 BJ07 和 BJ09 高,所以二者的产油率明显较高,而相比较 BJ05 和 BJ01 的产油率,由于 BJ05 的细胞含油率较高,所以 BJ05 的产油率较高;除 BJ05 外,随着培养基中沼液污水所占比例的提高,BJ07、BJ09 和 BJ01 的产油率呈下降趋势,BJ05 在 3 号培养基中的产油率较在 1 号、2 号培养基中的产油率略有

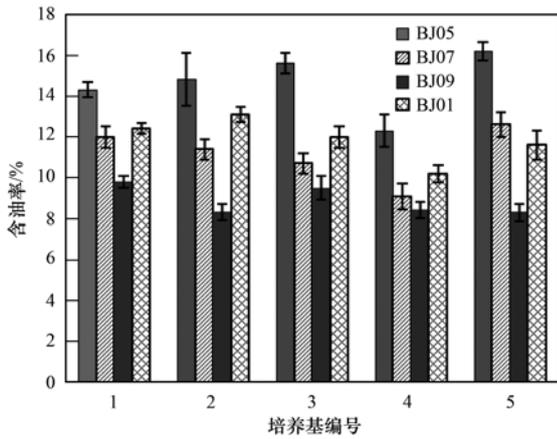


图2 不同小球藻在5种培养基中的含油率比较
Fig. 2 Oil content of different chlorella in the 5 kinds of culture medium

提高,达到20种试验组合中的最高值,在4号和5号培养基中由于其生物量极低导致其产油量急剧下降.虽然BJ05在2号和3号培养基中的产油率几乎没有差距,但是,从处理更多的污水角度来讲,3号培养基更具有优势.

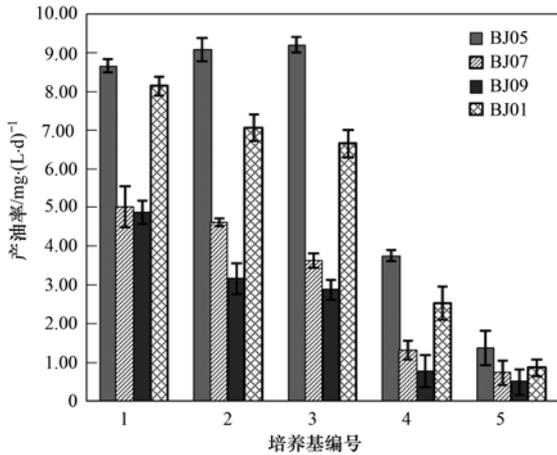


图3 不同小球藻在5种培养基中的产油率
Fig. 3 Oil productivity of different chlorella in the 5 kinds of culture medium

2.2 污水中营养缺陷对BJ05产油的影响

沼液污水中含有氮磷等多种营养成分,部分营养成分可能含量较高足以供应小球藻的生长,而有些营养成分可能较低不足以供应小球藻的生长,为了降低培养成本,在利用污水培养小球藻时,只希望添加沼液中不足以供应小球藻生长的营养成分.因此在3号培养基基础上,缺乏绿藻培养基中不同营养母液或微量营养元素,考察污水培养时哪些营养成分为微藻生长所必需.

2.3 不同营养对BJ05产油的影响

如图4所示, BJ05在分别不添加柠檬酸和碳酸钠的培养基中生长情况良好,测得产油率分别为 $9.23 \text{ mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{d})^{-1}$ 、 $9.15 \text{ mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{d})^{-1}$,而其它试验组生长情况较差,无法正常生长.说明柠檬酸和碳酸钠并非必须添加,而其他营养元素则必须添加才能满足小球藻的生长.分析原因可能是碳酸钠为小球藻生长过程提供无机碳源,而通入的空气中含有 CO_2 能够提供无机碳,柠檬酸提供有机碳源,但污水中的COD较高,说明有机碳含量较高,能够满足小球藻BJ05的碳源需求,而污水中其他营养成分的缺乏则必须经人工添加方可满足小球藻的生长.

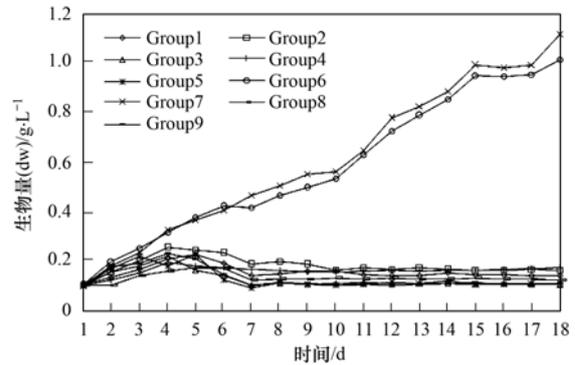


图4 沼液添加不同营养元素对BJ05生长的影响
Fig. 4 Effects of different nutrients added in wastewater on the growth of chlorella BJ05

在3号培养基不添加碳酸钠或柠檬酸试验的基础上,考察同时不添加碳酸钠和柠檬酸对BJ05的生长和产油的影响,结果如图5所示, BJ05在同时不添加柠檬酸和碳酸钠的3号培养基中生长情况良好,并且测得其生物量和细胞含油率分别为 $1.08 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$,含油率为15.6%,产油率达 $9.36 \text{ mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{d})^{-1}$,高于未优化的3号培养基中得到的 $9.20 \text{ mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{d})^{-1}$,分析原因可能是碳源过量,柠檬酸和碳酸钠的添加反而抑制了小球藻

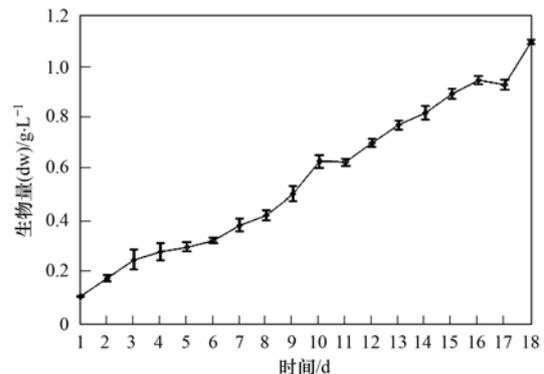


图5 BJ05在不添加柠檬酸和碳酸钠的沼液中生长情况
Fig. 5 Growth of chlorella BJ05 in biogas slurry without addition of citrate acid and Na_2CO_3

BJ05 产油.

分别比较不添加柠檬酸或碳酸钠、以及同时不添加柠檬酸和碳酸钠这3种情况下,小球藻 BJ05 产油率相差不大,说明柠檬酸和碳酸钠非必须添加. 培养结束后,检测3号培养基中 COD、TN、TP、 NH_4^+ -N 的消耗量发现,BJ05 在该培养基中的 COD、TN、TP、 NH_4^+ -N 去除率分别达到 59%、75%、61%、100%.

3 讨论

本研究基于沼液污水,对不同比例的培养基和不同小球藻藻种进行了选育,选育出小球藻 BJ05,但是,对于培养基的选育仍然有需进一步研究的地方,比如,如何保证沼液污水的相对稳定性,还需更多的前处理研究. 另外,研究每种营养成分添加多少能保证小球藻的产油率不受影响或者有更大的提高,从而进一步减小培养小球藻产油的成本,具有更现实的意义.

4 结论

(1)本研究基于中国农业机械化科学研究院农业生态科技园沼气发酵池中的沼液污水,探讨沼液污水培养小球藻产油的可行性. 结果发现,BJ05 能很好地在含 1/4 沼液污水的培养基中生长,并获得较高的产油率,沼液污水中添加适量的无机氮、无机磷,镁盐、钙盐、柠檬酸铁铵、络合剂和微量元素,即可较好地用于微藻的培养与油脂生产,但对于沼液污水的稳定性和营养元素的添加的量还有待进一步研究,这样才具有更好的应用前景.

(2)同时,对培养水体中 COD、TN 和 TP 残留的检测结果显示,微藻对无机氮与磷均有着高效的吸收机制. 沼液污水用于含油微藻的培养前景广阔,通过部分营养元素的添加,即可获得高产油率的微藻生物质,在产生巨大经济效益的同时,解决了污水处理中无机氮与无机磷难以去除的难点,可以缓解农村发展对环境破坏的压力,对我国农村和能源发展具有重要社会效益.

参考文献:

- [1] Hhmmouda O, Gaber A, Abdelraouf N. Microalgae and wastewater treatment [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 1995, **31**(3): 205-210.
- [2] Chi Z Y, Zhang Y B, Jiang A P, et al. Lipid production by culturing oleaginous yeast and algae with food waste and municipal wastewater in an integrated process [J]. Applied Biochemistry and Biotechnology, 2011, **165**(2): 442-453.
- [3] Pittman J K, Dean A P, Osundeko O. The potential of sustainable algal biofuel production using wastewater resources [J]. Bioresource Technology, 2011, **102**(1): 17-25.
- [4] 胡洪营, 李鑫, 杨佳. 基于微藻细胞培养的水质深度净化与高价值生物质生产耦合技术 [J]. 生态环境学报, 2009, **18**(3): 1122-1127.
- [5] 傅晓娜, 姚刚. 微藻污水处理与生物质能耦合技术综述 [J]. 绿色科技, 2011, (11): 100-104.
- [6] 刘振强, 陆向红, 晏荣军, 等. 高密度高含油率微藻培养研究进展 [J]. 农业工程学报, 2011, **27**(S1): 210-217.
- [7] Illman A M, Scragg A H, Sllales S W. Increase in Chlorella strains calorific values when grown in low nitrogen medium [J]. Enzyme and Microbial Technology, 2000, **27**(8): 631-635.
- [8] Lam M K, Lee K T. Potential of using organic fertilizer to cultivate *Chlorella vulgaris* for biodiesel production [J]. Applied Energy, 2012, **94**: 303-308.
- [9] Bhatnagar A, Bhatnagar M, Chinnasamy S, et al. *Chlorella minutissima*-a promising fuel alga for cultivation in municipal wastewaters [J]. Applied Biochemistry and Biotechnology, 2010, **161**(1-8): 523-536.
- [10] 王秀锦, 李兆胜, 邢冠岚, 等. 蛋白核小球藻 *Chlorella pyrenoidosa*-15 的异养培养条件优化及污水养殖 [J]. 环境科学, 2012, **33**(8): 2735-2739.
- [11] 吕素娟, 张维, 彭小伟, 等. 城市生活废水用于产油微藻培养 [J]. 生物工程学报, 2011, **27**(3): 445-452.
- [12] Mandal S, Mallick N. Microalga *Scenedesmus obliquus* as a potential source for biodiesel production [J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2009, **84**(2): 281-291.
- [13] Stainier R Y, Kunisawa R, Mandel M, et al. Purification and properties of unicellular blue-green algae (order Chroococcales) [J]. Bacteriology Reviews, 1971, **35**(2): 171-205.
- [14] 孙利芹, 王长海, 江涛. 紫球藻细胞破碎方法研究 [J]. 海洋通报, 2004, **23**(4): 71-74.
- [15] 王雪青, 苗惠, 翟燕. 微藻细胞破碎方法的研究 [J]. 天津科技大学学报, 2007, **22**(1): 21-24.
- [16] 王利兵, 于海燕, 贺晓辉, 等. 生物柴油树种油脂脂肪酸组成对燃料特性的影响 [J]. 燃料化学学报, 2012, **40**(4): 397-404.

CONTENTS

Comparative Analysis on Meteorological Condition for Persistent Haze Cases in Summer and Winter in Beijing	LIAO Xiao-nong, ZHANG Xiao-ling, WANG Ying-chun, <i>et al.</i> (2031)
Size Distributions of Water-Soluble Inorganic Ions in Atmospheric Aerosols in Fukang	MIAO Hong-yan, WEN Tian-xue, WANG Yue-si, <i>et al.</i> (2045)
Study on Transition Metals in Airborne Particulate Matter in Shanghai City's Subway	BAO Liang-man, LEI Qian-tao, TAN Ming-guang, <i>et al.</i> (2052)
Heavy Metal Concentrations in Mosses from Qiyi Glacier Region	MA Juan-juan, LI Zhen (2060)
Distributions of Dimethylsulfide and Dimethylsulfoniopropionate and Influencing Factors in the East China Sea and the Southern Yellow Sea During the Winter	SONG Yi-zhu, ZHANG Hong-hai, YANG Gui-peng (2067)
Pollution by Heavy Metals in the Petrochemical Sewage Waters of the Sea Area of Daya Bay and Assessment on Potential Ecological Risks	XU Shan-nan, LI Chun-hou, XU Jiao-jiao, <i>et al.</i> (2075)
Distribution of Perfluorinated Compounds in Surface Water of Shenzhen Reservoir Groups	WANG Xin-xuan, ZHANG Hong, HE Long, <i>et al.</i> (2085)
Contamination and Source of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Epikarst Spring Water	SUN Yu-chuan, SHEN Li-cheng, YUAN Dao-xian (2091)
Biogeochemical Processes of the Major Ions and Dissolved Inorganic Carbon in the Guijiang River	TANG Wen-kui, TAO Zhen, GAO Quan-zhou, <i>et al.</i> (2099)
Hydrologic Processes of the Different Landscape Zones in Fenhe River Headwater Catchment	YANG Yong-gang, LI Cai-mei, QIN Zuo-dong, <i>et al.</i> (2108)
Assessment of Groundwater Quality of Different Aquifers in Tongzhou Area in Beijing Plain and Its Chemical Characteristics Analysis	GUO Gao-xuan, JU Yi-wen, ZHAI Hang, <i>et al.</i> (2114)
Models for Quantification of Fluid Saturation in Two-Phase Flow System by Light Transmission Method and Its Application	ZHANG Yan-hong, YE Shu-jun, WU Ji-chun (2120)
Nitrogen Leaching and Associated Environmental Health Effect in Sloping Cropland of Purple Soil	CHEN Wei-liang, GAO Yang, LIN Yong-ming, <i>et al.</i> (2129)
Research on Land Use Structure Optimization Based on Nonpoint Source Dissolved Nitrogen Load Estimation in Shuashui Watershed	LU Yu-chao, BI Meng-fei, LI Ze-li, <i>et al.</i> (2139)
Nitrogen and Organic Matter Vertical Distribution Characteristics and Evaluation in Ancient Canal Sediments of Zhenjiang Old Town	ZHOU Xiao-hong, LI Yi-min, ZHOU Yi, <i>et al.</i> (2148)
Effects of Two Submerged Macrophytes on Dissolved Inorganic Nitrogen in Overlying Water and Interstitial Water	YANG Wen-bin, LI Yang, SUN Gong-xian (2156)
Bioavailable Phosphorus on Suspended Solids of Lake Under Short-term and Repeated Sediment Disturbance	WU Xiao-fei, LI Da-peng (2164)
Influence of Different Disturbance Intensity on the Phosphorus Adsorption and Immobilization by the Sediments from an Inner City Heavily Polluted Canal	WANG Shang, LI Da-peng (2171)
Effect of Feed Residues on the Release of Nitrogen and Phosphorus of Pond Sediment	LÜ Yuan-jiao, LI Rui-jiao, ZHANG Nian, <i>et al.</i> (2178)
Delivery and Release of Sediment PAHs During Resuspension	WANG Xiao-hui, BI Chun-juan, HAN Jing-chao (2185)
Effects of Low Molecular Weight Organic Acids on Redox Reactions of Mercury	ZHAO Shi-bo, SUN Rong-guo, WANG Ding-yong, <i>et al.</i> (2193)
Removal of Fluorescent Whitening Agent by Hydrogen Peroxide Oxidation Catalyzed by Activated Carbon	LIU Hai-long, ZHANG Zhong-min, ZHAO Xia, <i>et al.</i> (2201)
Kinetics of Alkylphenols Degradation in Aqueous Phase with Excilamp Irradiation	LIU Yu-hai, YE Zhao-lian, WEN Ying-pin, <i>et al.</i> (2209)
AF + BAF for Treating Effluent in the Sewage Plant of the Resin and Chemical Industry Park	TU Yong, LIU Wei-jing, ZHANG Yao-hui, <i>et al.</i> (2216)
Synthesis and Adsorption Property of Cd(II)-8-hydroxyquinoline Molecularly Imprinted Polymer Microspheres	YANG Chun-yan, CHEN Fu-bin, ZHAO Hui, <i>et al.</i> (2223)
Simultaneous Nitrification and Denitrification in a Microbubble-aerated Biofilm Reactor	LIU Chun, NIAN Yong-jia, ZHANG Jing, <i>et al.</i> (2230)
Effect of PLA/Starch Slow-Release Carbon Source on Biological Denitrification	TANG Dan-qi, WANG Juan, ZHENG Tian-long, <i>et al.</i> (2236)
Impacts of Filamentous Bulking on Treatment Effect and Fouling Characteristics of Nonwoven Bioreactor	SHI Kuan, XUE Gang, GAO Pin, <i>et al.</i> (2241)
Optimization for Phosphorous Removal in Thickening and Dewatering Sludge Water by Polyaluminum Chloride	ZHOU Zhen, HU Da-long, QIAO Wei-min, <i>et al.</i> (2249)
Simulation of Long-Range Transport Potential of POPs in Poyang Lake	GONG Xiao-feng, XIANG Hong-rui, CHEN Chun-li, <i>et al.</i> (2256)
Uncertainty Analysis of Ecological Risk Assessment Caused by Heavy-metals Deposition from MSWI Emission	LIAO Zhi-heng, SUN Jia-ren, WU Dui, <i>et al.</i> (2264)
Risk Assessment and Countermeasures of BTEX Contamination in Soils of Typical Pesticide Factory	TAN Bing, WANG Tie-yu, LI Qi-feng, <i>et al.</i> (2272)
Levels Distribution and Risk Assessment of the Indicator and Dioxin-Like Polychlorinated Biphenyls in Ten Different Species of Marine Fish of Bohai Bay, China	WANG Sha-sha, GAO Li-rong, TIAN Yi-ling, <i>et al.</i> (2281)
Detection of Biohazardous Materials in Water upon the Characteristics of Fluorescent Sensor Flex	ZHAO Wei, WANG Zhao, CAI Qiang, <i>et al.</i> (2287)
Generation and Release of Microcystin-LR by <i>Microcystis aeruginosa</i> Under Hydroquinone Inhibition	ZHANG Yuan-chun, LIANG Wen-yan, ZHAO Yuan, <i>et al.</i> (2294)
Culture Medium Based on Biogas Slurry and Breeding of Oil Chlorella	ZHAO Feng-min, MEI Shuai, CAO You-fu, <i>et al.</i> (2300)
Microbial Diversity and Ammonia-Oxidizing Microorganism of a Soil Sample Near an Acid Mine Drainage Lake	LIU Ying, WANG Li-hua, HAO Chun-bo, <i>et al.</i> (2305)
Effects of <i>Corbicula fluminea</i> Bioturbation on the Community Composition and Abundance of Ammonia-Oxidizing Archaea and Bacteria in Surface Sediments	WANG Xue, ZHAO Da-yong, ZENG Jin, <i>et al.</i> (2314)
Methanogenic Activity and Methanogen Diversity in Marine Gas Field Sediments	TIAN Qi, WANG Jia, FAN Xiao-lei, <i>et al.</i> (2322)
Effect of the Potential on Bacterial Community Under Illumination by DGGE and T-RFLP	WU Yi-cheng, DENG Huan, XIAO Yong, <i>et al.</i> (2328)
Isolation and Characterization of Two Bacteria with Heavy Metal Resistance and Phosphate Solubilizing Capability	TIAN Jiang, PENG Xia-wei, LI Xia, <i>et al.</i> (2334)
Identification and Denitrification Characteristics of a Psychrotolerant Facultative Basophilic Aerobic Denitrifier	WANG Zhao-yang, CHEN Guo-yao, JIANG Ke, <i>et al.</i> (2341)
Effects of Ryegrass and Arbuscular Mycorrhiza on Activities of Antioxidant Enzymes, Accumulation and Chemical Forms of Cadmium in Different Varieties of Tomato	JIANG Ling, YANG Yun, XU Wei-hong, <i>et al.</i> (2349)
Response of Active Nitrogen to Salinity in a Soil from the Yellow River Delta	LI Ling, QIU Shao-jun, CHEN Yin-ping, <i>et al.</i> (2358)
Variation of Soil Nitrogen During <i>in situ</i> Mineralization Process Under Different Grasslands in the Mountainous Area of Southern Ningxia, Northwest China	JIANG Yue-li, ZHAO Tong, YAN Hao, <i>et al.</i> (2365)
Effects of Long-Term Application of Pig Manure Containing Residual Tetracycline on the Formation of Drug-Resistant Bacteria and Resistance Genes	ZHANG Jun, YANG Xiao-hong, GE Feng, <i>et al.</i> (2374)
Long-Term Effects of Tillage Methods on Heavy Metal Accumulation and Availability in Purple Paddy Soil	CHANG Tong-ju, CUI Xiao-qiang, RUAN Zhen, <i>et al.</i> (2381)
Environmental Geochemical Baseline of Heavy Metals in Soils of the Ili River Basin and Pollution Evaluation	ZHAO Xin-ru, Telajin Nasier, CHENG Yong-yi, <i>et al.</i> (2392)
Distribution Patterns and Pollution Assessments of Heavy Metals in the <i>Spartina alterniflora</i> Salt-Marsh Wetland of Rudong, Jiangsu Province	ZHANG Long-hui, DU Yong-fen, WANG Dan-dan, <i>et al.</i> (2401)
Temporal-Spatial Distribution of Agricultural Diffuse Nitrogen Pollution and Relationship with Soil Respiration and Nitrification	OUYANG Wei, CAI Guan-qing, HUANG Hao-bo, <i>et al.</i> (2411)
Soil Respiration and Carbon Balance in Wheat Field Under Conservation Tillage	ZHANG Sai, WANG Long-chang, HUANG Zhao-cun, <i>et al.</i> (2419)
Comparison of Soil Respiration in Natural <i>Castanopsis carlesii</i> Forest and Plantation Forest	WU Jun-jun, YANG Zhi-jie, WENG Fa-jin, <i>et al.</i> (2426)
Influences of Hydraulic Retention Time on the Ethanol Type Fermentation Hydrogen Production System in a Hybrid Anaerobic Baffled Reactor	LIU Xiao-ye, ZHANG Hong, LI Yong-feng (2433)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

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

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2014年6月15日 第35卷 第6期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 6 Jun. 15, 2014

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

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 90.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行