

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第34卷 第2期

Vol.34 No.2

2013

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

16 届亚运会期间广州城区 PM_{2.5} 化学组分特征及其对霾天气的影响 陶俊,柴发合,高健,曹军骥,刘随心,张仁健(409)

北京地区秋季雾霾天 PM_{2.5} 污染与气溶胶光学特征分析 赵秀娟,蒲维维,孟伟,马志强,董璠,何迪(416)

上海市秋季大气 VOCs 对二次有机气溶胶的生成贡献及来源研究 王倩,陈长虹,王红丽,周敏,楼晟荣,乔利平,黄成,李莉,苏雷燕,牟莹莹,陈宜然,陈明华(424)

杭州市大气超细颗粒物浓度谱季节性特征 谢小芳,孙在,付志民,杨文俊,林建忠(434)

保定市大气气溶胶中正构烷烃的污染水平及来源识别 李杏茹,杜熙强,王英锋,王跃思(441)

春节期间西安城区碳气溶胶污染特征研究 周变红,张承中,王格慧(448)

华东区域高山背景点 PM₁₀ 和 PM_{2.5} 背景值及污染特征 苏彬彬,刘心东,陶俊(455)

基于电子鼻土壤与地下水污染修复现场 TVOC 和恶臭的评估 田秀英,蔡强,刘锐,张永明(462)

积融雪控制下土壤大气间汞交换通量特征 张刚,王宁,艾建超,张蕾,杨净,刘子琪(468)

靖海湾重金属污染及铅稳定同位素溯源研究 徐林波,高勤峰,董双林,刘佳,傅秀娟(476)

正构烷烃及单体碳同位素记录的石臼湖生态环境演变研究 欧杰,王延华,杨浩,胡建芳,陈霞,邹军,谢云(484)

干旱区城市昌吉降雪及积雪中 PGEs 含量分布及其影响因素 刘玉燕,刘浩峰,张兰(494)

降尘收集方法对降尘效率的影响 张正德,董治宝(499)

海河流域水生生态功能一级二级分区 孙然好,汲玉河,尚林源,张海萍,陈利顶(509)

长江中下游浅水湖泊水下辐照度漫射衰减特征研究 时志强,张运林,王明珠,刘笑茵(517)

内陆水体叶绿素反演模型普适性及其影响因素研究 黄昌春,李云梅,徐良将,杨浩,吕恒,陈霞,王延华(525)

溶氧对富集培养的河口湿地表层沉积物氨氧化菌多样性及氨氧化速率的影响 邱昭政,罗专溪,赵艳玲,颜昌宙(532)

自然条件下盐城海滨湿地土壤水分/盐度空间分异及其与植被关系研究 张华兵,刘红玉,李玉凤,安静,薛星宇,侯明行(540)

淮河流域农业非点源污染空间特征解析及分类控制 周亮,徐建刚,孙东琪,倪天华(547)

高岚河不同降雨径流类型磷素输出特征 崔玉洁,刘德富,宋林旭,陈玲,肖尚斌,向坤,张涛(555)

城市雨水径流水质演变过程监测与分析 董雯,李怀恩,李家科(561)

复合人工湿地系统强化处理单元的运行特性与效果 任峰,陆忆夏,刘琴,汤杨杨,王世和,高海鹰,乔杰,王为进(570)

给水管网中耐氯分枝杆菌的灭活特性及机制研究 郑琦,陈超,张晓健,陆品品,刘源源,陈雨乔(576)

1 株溶藻菌的部分生物学特性及溶鱼腥藻作用 李三华,张奇亚(583)

水生植物热解生物油对中肋骨条藻抗氧化酶活性的影响 姚远,李锋民,李媛媛,单时,李杰,王震宇(589)

TiO₂ 光催化联合技术降解苯酚机制及动力学 张轶,黄若男,王晓敏,王齐,丛燕青(596)

皮革废水有机污染物生物降解特性研究 王勇,李伟光,杨力,宿程远(604)

链霉菌 FX645 对偶氮染料红 AR30 的降解机制研究 谢练武,方继生,郭亚平(611)

一种负载型生物载体的制备及性能研究 杨基先,曾红云,周义,邱珊,马放,王蕾,肖大伟(616)

基于污泥资源化利用的蛋白核小球藻(*Chlorella pyrenoidosa*) 培养研究 嵇雯雯,夏会龙,方治国,刘惠君(622)

温和热处理对低有机质污泥厌氧消化性能的影响 陈汉龙,严媛媛,何群彪,戴晓虎,周琪(629)

天然和水热合成针铁矿对有机物厌氧分解释放 CH₄ 的影响 姚敦璠,陈天虎,王进,周飞跃,岳正波(635)

蚀刻废液及其回收后生产的铜盐产品中 PCDD/Fs 含量水平及分布特征 青宪,韩静磊,温炎桑(642)

基于特定场地污染概念模型的健康风险评估案例研究 钟茂生,姜林,姚珏君,夏天翔,朱笑盈,韩丹,张丽娜(647)

区域地下水污染风险评价方法研究 杨彦,于云江,王宗庆,李定龙,孙宏伟(653)

地下水有机污染源识别技术体系研究与示范 王晓红,魏加华,成志能,刘培斌,纪轶群,张干(662)

祁连山不同海拔土壤有机碳库及分解特征研究 朱凌宇,潘剑群,张威(668)

黑土有机碳、氮及其活性对长期施肥的响应 骆坤,胡荣桂,张文菊,周宝库,徐明岗,张敬业,夏平平(676)

根茬连续还田对镉污染农田土壤中镉赋存形态和生物有效性的影响 张晶,于玲玲,辛木贞,苏德纯(685)

长期施肥措施下稻田土壤有机质稳定性研究 罗璐,周萍,童成立,石辉,吴金水,黄铁平(692)

外源Cr(III)在我国22种典型土壤中的老化特征及关键影响因子研究 郑顺安,郑向群,李晓辰,刘书田,姚秀荣(698)

某林丹生产企业搬迁遗留场地土壤中六六六的残留特征 潘峰,王利利,赵浩,尤奇中,刘林(705)

大型炼锌厂周边土壤及蔬菜的汞污染评价及来源分析 刘芳,王书肖,吴清茹,林海(712)

天津成人头发指甲中有机氟污染物的残留特征 姚丹,张鸿,柴之芳,沈金灿,杨波,王艳萍,刘国卿(718)

沉积物中雌激素及壬基酚、辛基酚、双酚 A 的测定 吴唯,史江红,陈庆彩,张晖,刘晓薇(724)

动物饲料中砷、铜和锌调查及分析 姚丽贤,黄连喜,蒋宗勇,何兆桓,周昌敏,李国良(732)

氟虫双酰胺在水稻和稻田中的残留动态研究 王点点,宋宁慧,吴文铸,由宗政,何健,石利利(740)

2 株降解菲的植物内生细菌筛选及其降解特性 倪雪,刘娟,高彦征,朱雪竹,孙凯(746)

嗜盐拟香味菌 Y6 降解硝基苯的特性研究 厉阆,钱坤,肖伟,王进军,邓新平(753)

固定化条件对苯系物细胞传感器检测效果的影响 唐阔,马安周,于清,邓雪梅,吕迪,庄国强(760)

16S rDNA 克隆文库分析高含盐生物脱硫系统细菌多样性 刘卫国,梁存珍,杨金生,王桂萍,刘苗杰(767)

氨氮浓度对 CANON 工艺功能微生物丰度和群落结构的影响 刘涛,李冬,曾辉平,畅晓燕,张杰(773)

筒青霉(*Penicillium simplicissimum*) 对木质纤维素的降解及相关酶活性特征 沈莹,胡天觉,曾光明,黄丹莲,尹璐,刘杨,吴娟娟,刘晖(781)

石油污染土壤微生物群落结构与分布特性研究 杨萌青,李立明,李川,李广贺(789)

土霉素在鸡粪好氧堆肥过程中的降解及其对相关参数的影响 王桂珍,李兆君,张树清,马晓彤,梁永超(795)

生活垃圾填埋过程含水率变化研究 李睿,刘建国,薛玉伟,张媛媛,岳东北,聂永丰(804)

动物消化机制用于木质纤维素的厌氧消化 吴昊,张盼月,郭建斌,吴永杰(810)

《环境科学》征订启事(447) 《环境科学》征稿简则(493) 信息(508,588,610,731) 专辑征稿通知(788)

基于污泥资源化利用的蛋白核小球藻 (*Chlorella pyrenoidosa*) 培养研究

嵇雯雯, 夏会龙, 方治国*, 刘惠君

(浙江工商大学环境科学与工程学院, 杭州 310012)

摘要: 利用废水或者废弃物培养微藻, 不仅可使废弃物得到合理利用, 还可为微藻培养提供廉价原料. 以蛋白核小球藻 (*Chlorella pyrenoidosa*) 为研究对象, 以污泥抽提液部分或全部替代 SE (selenite enrichment) 培养基, 研究基于污泥资源化利用的微藻细胞培养方法. 结果表明, 当 SE 培养基与污泥抽提液比例为 1:9 和 2:8 时, 相同条件下接种蛋白核小球藻培养 14 d 后, 在波长为 680 nm 下其光密度分别为 0.858 和 0.845, 显著高于其它处理, 当两者比例为 0:10 和 10:0 时, 相应光密度分别为 0.571 和 0.247. 通过测定其色素和次生代谢产物含量时发现, 当 SE 培养基与污泥抽提液比例为 2:8 时, 蛋白核小球藻的叶绿素、 β -胡萝卜素和蛋白质含量最高. 因此, 剩余污泥抽提液可以部分作为培养蛋白核小球藻的良好基质, 并且其培养效果明显优于其标准培养基. 在本试验条件下, 蛋白核小球藻培养的最佳条件是污泥抽提液比例为 80%, 该条件下蛋白核小球藻的生长状况较好, 并且叶绿素与蛋白质含量最高.

关键词: 蛋白核小球藻; 剩余污泥; 污泥抽提液; 微藻培养

中图分类号: X703 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2013)02-0622-07

Study on the *Chlorella pyrenoidosa* Cultivation Technology Based on the Excess Sludge Utilization

Ji Wen-wen, Xia Hui-long, Fang Zhi-guo, Liu Hui-jun

(College of Environmental Science and Engineering, Zhejiang Gongshang University, Hangzhou 310012, China)

Abstract: Microalgae cultivation based on the waste water or other reused waste can not only make rational use of the waste, but also provide cheap materials for microalgae production. In the present study, *Chlorella pyrenoidosa* was used to develop a new way for microalgae cultivation based on the mix culture media with different ratio of sludge extracts and SE (selenite enrichment). Results showed that after 14 d cultivation under the same cultivating condition, the absorbency of *C. pyrenoidosa* at 680 nm was 0.858 and 0.845, respectively, when the ratio between culture medium of SE and sludge extracts was 1:9 and 2:8, and the absorbency at 680 nm was 0.247 and 0.571, respectively, when the ratio between culture medium of SE and sludge extracts was 0:10 and 10:0. Our results also demonstrated that highest content of chlorophyll, β -carotene and protein was achieved in *C. pyrenoidosa* cultivated in the mix medium between SE and sludge extracts with the ratio of 2:8. Therefore, sludge extracts can be used as a good medium to cultivate *C. pyrenoidosa*, and the *C. pyrenoidosa* grew much better in this mix medium than in SE medium. In this study, the best condition for *C. pyrenoidosa* cultivation was achieved in the mix medium with 80% sludge extracts, and *C. pyrenoidosa* grew very well and the content of chlorophyll and protein was also high in the microalgae cell in this mixture medium.

Key words: *Chlorella pyrenoidosa*; excess sludge; sludge extracts; microalgae cultivation

随着我国城市化进程的加快, 城市污水处理率逐年提高, 污水处理厂的污泥产量也急剧增加. 城镇污水处理厂每天产生大量的污泥如不能得到充分合理的资源化利用, 也不能利用恰当的方法进行无害化处理与处置, 极易造成严重的二次污染^[1-3]. 传统的污泥处置方法主要有海洋投弃、卫生填埋、污泥焚烧和土地利用等^[4], 这些处置方式在实际应用过程中发挥了一定作用, 但随着环境标准的提高, 这些方法显示出了明显的弊端. 近年来, 污泥的资源化利用已成为解决污泥出路问题的主要途径. 污泥堆肥化后可作为农肥或土壤改良剂^[5]; 污泥制取的微生物肥料可向农作物提供速效肥源的同时, 还能向农

作物根系提供有益微生物^[6]; 污泥进行厌氧消化产生的沼气可综合利用^[7]; 碳含量高的污泥制成的吸附剂是一种优良的有机废水处理剂^[8]; 此外污泥还可以用于制砖、制纤维板和生产生态水泥等^[9].

以剩余污泥抽提液作为基质, 来培养微藻具有很大的发展潜力. 首先, 污泥中含有丰富的碳、氮、磷等营养物质, 用离心的方法抽提剩余污泥并将上

收稿日期: 2012-04-10; 修订日期: 2012-05-14

基金项目: 浙江省自然科学基金项目(Y5100365, Y5100376); 浙江工商大学研究生科技创新项目(1260XJ1511117); 浙江省高等学校创新团队支持计划项目(T200912)

作者简介: 嵇雯雯(1987~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为环境生物与生态修复技术, E-mail: jiwewen0820@hmail

* 通讯联系人, E-mail: zhgfang77@zjgsu.edu.cn

清液作为微藻培养的替代培养基是完全可行的^[10], 这将大大降低藻类的培养成本; 其次, 污泥中含有多种矿物质, 如钾、钙、钠、镁、铁、铜、锰等, 是微藻生长必须的微量元素^[11]. 因此, 利用剩余污泥来培养微藻, 既能降低微藻的养殖成本, 又能将污泥资源化利用, 为剩余污泥的处理处置提供了可行实用的方法. 微藻被认为是当今最具开发潜力的能源之一, 也是经济高速发展过程中替代传统石油燃料能源的最佳选择之一^[12, 13]. 微藻种类繁多, 其代谢产物非常丰富, 如布朗葡萄藻 (*Botryococcus braunii*) 富含有多类物质, 最高比例可占干重的 75%, 小球藻 (*Chlorella*) 含有 30% ~ 50% 的脂类物质, 有的甚至高达 85%. 这些微藻的次生代谢产物可通过生物转化或后加工形成各种形式的生物能源和有用物质, 如生物柴油、生物合成气和生物氢气等^[14, 15]; 此外, 藻类繁殖快, 生长周期短, 并能直接将太阳能高效转化为化学能; 更重要的是, 藻类生长过程所吸收的二氧化碳与其燃烧过程中所排出的二氧化碳数量相等, 可以保持碳平衡^[16]. 基于以上众多优点, 近年来与微藻相关的研究工作受到了空前的关注. 本研究以蛋白核小球藻 (*Chlorella pyrenoidosa*) 为对象, 以污泥抽提液部分替代或全部替代 SE 培养基, 分析基于污泥资源化利用的微藻细胞培养方法, 以期降低微藻培养的生产成本, 缓解微藻生产过程中存在高成本和低产率的问题.

1 材料与方法

1.1 试验材料与培养基成分

1.1.1 试验藻种

选择蛋白核小球藻 (FACHB-9) 为试验藻种, 购于中国科学院水生生物研究所淡水藻种库.

1.1.2 污泥抽提液的制备

剩余污泥来源于杭州七格污水处理厂二沉池. 剩余污泥抽提液的制备采用研磨-离心抽提法, 将在污水处理厂新采集的二沉池剩余污泥沉淀 12 h 后弃去上清, 混匀后测其 MLSS (mixed liquor suspended solids), 经计算后取一定体积的剩余污泥 (干污泥重为 4 g) 研磨成浆, 加入一定量的蒸馏水混匀沉淀, 离心抽提, 反复提取 3 次, 最后污泥抽提液体积定容为 1 L, 然后用孔径 0.45 μm 滤膜进行抽滤, 在高压灭菌后于 4 $^{\circ}\text{C}$ 冰箱中保存备用^[17].

1.1.3 培养基成分

用于蛋白核小球藻生长的 SE 培养基主要成分如下 (1 L): NaNO_3 0.25 g; K_2HPO_4 0.075 g; $\text{MgSO}_4 \cdot$

$7\text{H}_2\text{O}$ 0.075 g; $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 0.025 g; KH_2PO_4 0.175 g; NaCl 0.025 g; $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 0.0005 g; EDTA-Fe 1 mL; 痕量元素溶液 1 mL; 土壤提取液 40 mL. 其中痕量元素 (1 L) 包括: H_3BO_3 2.86 mg; $\text{MnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 1.86 mg; $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 0.22 mg; $\text{Na}_2\text{MoO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 0.39 mg; $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 0.08 mg; $\text{Co}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 0.05 mg. EDTA-Fe 的配制方法如下: ① HCl: 取 4.1 mL 浓盐酸用蒸馏水稀释至 50 mL; ② EDTA- Na_2 : 称取 0.9306 g 溶解于 50 mL 的蒸馏水中; ③ 称取 $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 0.901 g 溶于 10 mL 已配制的 HCl 中, 然后与 1 mL 配制完成的 EDTA- Na_2 混合, 加入蒸馏水稀释至 1000 mL. 土壤提取液的制取方法如下: 取未施过肥的花园土 200 g 置于烧杯中, 加入 1000 mL 蒸馏水, 用透气塞封口, 沸水浴 3 h, 冷却, 沉淀 24 h, 该过程反复 3 次, 过滤, 取上清液于高压灭菌锅中灭菌后, 于 4 $^{\circ}\text{C}$ 冰箱中保存待用.

1.2 测定分析方法

1.2.1 微藻细胞生长测定

每隔 24 h 取样一次, 用 722 N 型分光光度计测定藻液在 680 nm 处的光密度值, 用光密度变化表征细胞的生长情况^[18].

1.2.2 比生长速率

在藻类细胞的对数生长期分别选取两个时间点 t_1 和 t_2 , 测定细胞在 680 nm 处的光密度值, 通过公式 $\mu = (\log_2 \text{光密度}_2 - \log_2 \text{光密度}_1) / (t_2 - t_1)$ 计算其比生长速率^[19].

1.2.3 叶绿素含量测定

离心收获体积为 20 mL 的藻类细胞, 加入 90% 丙酮, 在 4 $^{\circ}\text{C}$ 黑暗条件下抽提 12 h, 分别于 630 nm 和 664 nm 处测光密度, 通过公式计算出叶绿素含量^[20].

1.2.4 β -胡萝卜素含量测定

离心收获体积为 20 mL 的藻类细胞, 加入 90% 丙酮, 在 4 $^{\circ}\text{C}$ 黑暗条件下抽提 12 h, 与 450 nm 处测光密度, 通过公式计算出 β -胡萝卜素含量^[21].

1.2.5 藻蛋白含量测定

分别测定藻液中总氮含量及离心 (10000 $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$, 5 min) 后上清液中总氮含量, 两者之差为藻体的含氮量, 藻体含氮量的 6.27 倍即为藻体内蛋白含量^[22].

1.2.6 多糖含量测定

取藻液 1 mL, 加入 1 mL 苯酚和 5 mL 浓硫酸, 恒温沸水浴加热 15 min, 冷却后于 490 nm 处测光密度, 通过标准曲线计算出多糖含量^[23].

1.2.7 水质指标测定

COD、总磷、总氮、硝态氮和亚硝态氮依次按照文献[24~28]进行测定。

1.3 试验设计

本试验利用剩余污泥抽提液部分或全部代替 SE 培养基进行微藻细胞培养的研究. 将 1.1.3 节的 SE 培养基(SE)和 1.1.2 节的污泥抽提液按不同比例进行混合,制备一系列的混合培养液,SE 培养基与污泥抽提液比例依次为 10:0、9:1、8:2、7:3、6:4、5:5、4:6、3:7、2:8、1:9、0:10. 将培养至对数生长期的藻种转接到装有 150 mL 无菌混合培养基的锥形瓶(250 mL)中,使在波长 680 nm 下的初始光密度约为 0.1. 在光源为荧光灯,光强(以 photons 计,下同)约为 $80 \mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$,培养温度为 25°C ,光暗周期设置为 12 h/12 h,相同 CO_2 条件下,采用一次性培养,研究剩余污泥抽提液部分或全部代替标准培养基的微藻细胞培养方法。

2 结果分析

2.1 剩余污泥抽提液与 SE 培养基的组分比较

采用国标法测定了剩余污泥抽提液和 SE 培养基的水质指标(表 1). 对比剩余污泥抽提液和 SE 培养基的组分发现,污泥抽提液的 COD (chemical oxygen demand) 含量约为 SE 培养基的 4 倍,总磷含量约为其 1/3 倍,SE 培养基中的总氮和硝态氮含量都明显高于污泥抽提液,但其氨氮和亚硝态氮含量明显低于污泥抽提液。

表 1 剩余污泥抽提液与 SE 培养基营养成分对比/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$

Table 1 Component comparison of residual activated sludge extracts and standard culture media/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$

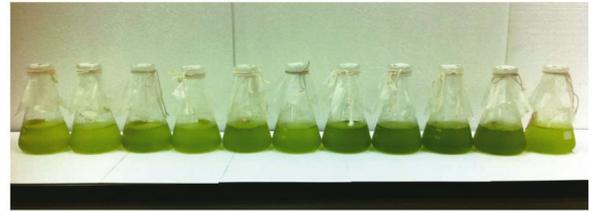
项目	SE 培养基	污泥抽提液
COD	47.87	175.99
总磷	53.08	17.44
总氮	48.33	2.84
氨氮	1.18	2.68
硝态氮	47.82	0.59
亚硝态氮	0.27	0.43

2.2 污泥抽提液部分或全部替代 SE 培养基对蛋白核小球藻生长的影响

2.2.1 蛋白核小球藻的生长效果

污泥抽提液部分或全部替代 SE 培养基蛋白核小球藻的生长效果见图 1. 从中可以看出,蛋白核小球藻在污泥抽提液比重较大的混合培养基中生长较快,当混合培养基中 SE 培养基与污泥抽提液比例为 1:9、2:8、3:7 和 4:6 时蛋白核小球藻生长效果较

好,当两者比例为 0:10 其生长效果则较差。



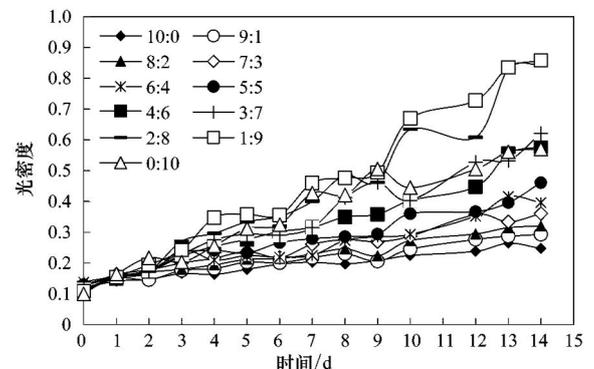
从左到右 SE 培养基与污泥抽提液比例分别为 10:0、9:1、8:2、7:3、6:4、5:5、4:6、3:7、2:8、1:9、0:10

图 1 污泥抽提液部分或全部替代 SE 培养基蛋白核小球藻的生长效果图

Fig. 1 Growth figure of *C. pyrenoidosa* based on the mix culture media with different ratio of sludge extracts and SE

2.2.2 蛋白核小球藻的生长曲线

由图 2 可知,当混合培养基中 SE 培养基与污泥抽提液比例为 1:9 时,蛋白核小球藻在波长 680 nm 下光密度最大,当两者比例为 2:8 时,蛋白核小球藻的光密度次之,当全部以污泥抽提液为培养基时,其光密度急剧下降,影响蛋白核小球的生长速率. 在初始光密度约为 0.1,培养温度为 25°C ,光强为 $80 \mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$,光暗周期为 12 h/12 h 条件下,培养 14 d 后,混合培养基中污泥抽提液含量在 60% 及以上的处理其光密度在 0.5~0.9 之间,其中最高值出现在 SE 培养基与污泥抽提液的比例为 1:9 时其光密度为 0.858,比例为 2:8 时光密度为 0.845. 在相同培养条件下,混合培养基中污泥抽提液含量在 40% 以下的处理其光密度值在 0.2~0.4 之间. 由此可知,剩余污泥抽提液可以大部分替代 SE 培养基作为蛋白核小球藻的生长基质,并且获得了较好的培养效果。



图中 10:0,9:1,8:2,7:3,6:4,5:5,4:6,3:7,2:8,1:9,0:10 为 SE 培养基与污泥抽提液的比例,下同

图 2 污泥抽提液部分或全部替代 SE 培养基蛋白核小球藻的生长曲线

Fig. 2 Growth curve of *C. pyrenoidosa* based on the mix culture media with different ratio of sludge extracts and SE

2.2.3 蛋白核小球藻的比生长速率

各处理从接种之日起培养到第 14 d, 蛋白核小球藻的比生长速率在 0.075 ~ 0.213 之间(图 3). 随着污泥抽提液比例增大蛋白核小球藻的比生长速率随之增大, 在 SE 培养基与污泥抽提液的比例为 1:9 时达到峰值, 为 0.213, 而当两者比例为 0:10 和 10:0 时, 比生长速率分别为 0.179 和 0.075. 由此可见, 蛋白核小球藻在污泥抽提液中比在 SE 培养基中更具有生长优势, 其生长速率前者约为后者的 2 倍多.

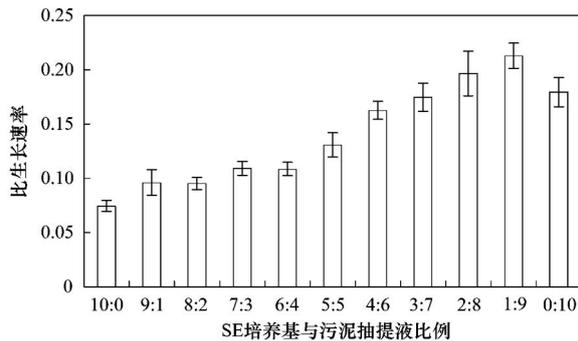


图 3 污泥抽提液部分或全部替代 SE 培养基蛋白核小球藻的比生长速率

Fig. 3 Specific growth rate of *C. pyrenoidosa* based on the mix culture media with different ratio of sludge extracts and SE

2.3 污泥抽提液部分或全部替代 SE 培养基对蛋白核小球藻色素含量的影响

2.3.1 蛋白核小球藻的叶绿素含量

在本试验条件下蛋白核小球藻培养 14 d 后的叶绿素含量如图 4. 藻细胞内叶绿素 a 的浓度随混合培养基中污泥抽提液比例的增加而增大, 在 SE 培养基与污泥抽提液的比例为 2:8 时出现峰值为 $1.91 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 明显高于纯 SE 培养基 ($0.51 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$). 叶绿素 b 和叶绿素总量的变化趋势与叶

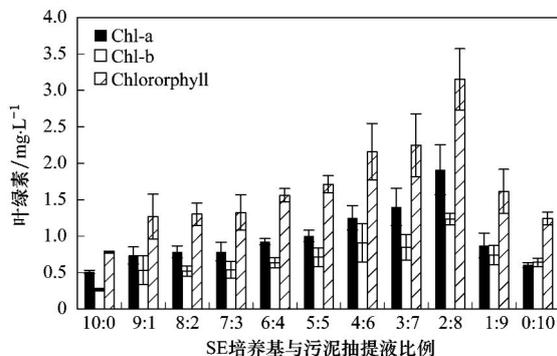


图 4 污泥抽提液部分或全部替代 SE 培养基蛋白核小球藻的叶绿素含量

Fig. 4 Chlorophyll content of *C. pyrenoidosa* based on the mix culture media with different ratio of sludge extracts and SE

绿素 a 基本一致. 由此得出, 在一定范围内, 藻细胞内叶绿素含量随着混合培养基中污泥抽提液所占比例的增加而增大, 在 SE 培养基和污泥抽提液的比例为 2:8 时其叶绿素含量最大.

2.3.2 蛋白核小球藻 β -胡萝卜素含量

图 5 为在本试验条件下蛋白核小球藻培养 14 d 后细胞中的 β -胡萝卜素含量. 由图可知, β -胡萝卜素的变化趋势与叶绿素基本一致, 随着混合培养基中污泥抽提液比例的增加而增加, 在污泥抽提液含量为 80% 的时候达到最大值 $0.847 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 随后逐渐下降. 可知在该试验条件下, 藻细胞内 β -胡萝卜素含量随着混合培养基中污泥抽提液所占比例的增加而增大, 最大值出现在 SE 培养基与污泥抽提液比例为 2:8 时.

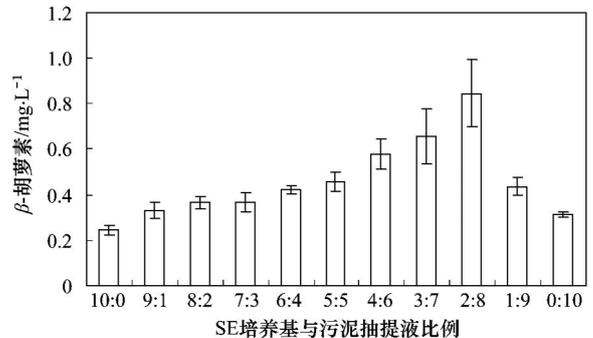


图 5 污泥抽提液部分或全部替代 SE 培养基蛋白核小球藻的 β -胡萝卜素含量

Fig. 5 β -carotene content of *C. pyrenoidosa* based on the mix culture media with different ratio of sludge extracts and SE

2.4 污泥抽提液部分或全部替代 SE 培养基对蛋白核小球藻次生代谢产物含量的影响

2.4.1 蛋白核小球藻蛋白质含量

图 6 为在本试验条件下蛋白核小球藻培养 14 d 后细胞中的蛋白质含量. 从中可知, 藻细胞中蛋白质

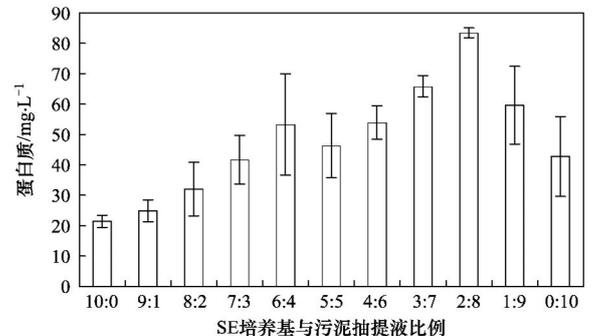


图 6 污泥抽提液部分或全部替代 SE 培养基蛋白核小球藻的蛋白质含量

Fig. 6 Protein content of *C. pyrenoidosa* based on the mix culture media with different ratio of sludge extracts and SE

浓度的变化趋势与叶绿素和 β -胡萝卜素基本一致,随着混合培养基中污泥抽提液比例的增大而增加,在污泥抽提液含量为 80% 的时候达到最大值 $83.51 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,随后逐渐下降。

2.4.2 蛋白核小球藻多糖含量

图 7 为在本试验条件下蛋白核小球藻培养 14 d 后细胞中的多糖含量。相较于上文中的生物量、叶绿素含量、 β -胡萝卜素含量及蛋白质含量,藻细胞中多糖含量变化趋势不明显。由图 7 可知,混合培养基中藻类的多糖含量与标准培养基中培育藻类的多糖含量基本持平,说明混合培养基能为藻类生产多糖提供足够的能量,该种蛋白核小球藻适合在混合培养基中进行培育。

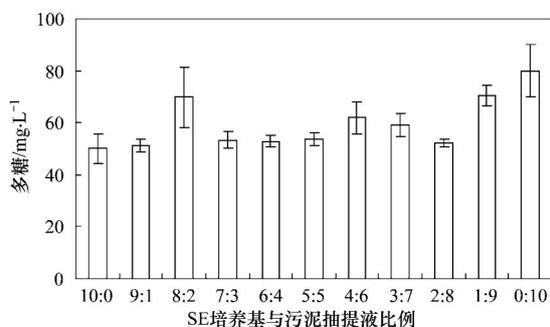


图 7 污泥抽提液部分或全部替代 SE 培养基蛋白核小球藻的多糖含量

Fig. 7 Polysaccharide content of *C. pyrenoidosa* based on the mix culture media with different ratio of sludge extracts and SE

3 讨论

针对微藻生产过程存在的高成本和低产率的问题,国内外研究人员提出利用废水或者废弃物培养微藻,这不仅可以使废弃物得到合理利用,而且还可以为微藻培养提供廉价原料,生产有用的化学物质。研究表明,多种性质不同的废水、废弃物经过适当预处理后,均可用于微藻细胞培养,如利用城市污水、糖蜜发酵废水、动物排泄物以及缫丝废水、制药、酿造、制革等工业有机废水,造纸废水、有机印染废水、味精废水等配制成培养基,用于培养不同用途的微藻,均取得了较好的效果^[29-32]。我国城市污水处理厂每年要排放大量的剩余污泥,且城市污水污泥含有丰富的有机物和氮、磷、钾等营养元素以及硅、铝、铁、钙等无机盐^[33-35],因此将剩余污泥作为微藻的培养基质,一方面可以解决微藻培养过程中存在的高成本问题,另一方面可以实现剩余污泥资源化利用,减少其处理处置成本和二次污染

的可能性。

本研究通过研磨-离心法处理杭州市七格污水处理厂二沉池的剩余污泥获得污泥抽提液,并利用污泥抽提液部分或全部替代 SE 培养基来培养蛋白核小球藻,通过测定波长 680 nm 下的光密度、比生长速率、叶绿素、 β -胡萝卜素、蛋白质和多糖含量来研究污泥抽提液对蛋白核小球藻培养的有效性。结果表明,在光源为荧光灯,光强约为 $80 \mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$,培养温度为 25°C ,光暗周期为 12 h/12 h,相同 CO_2 的条件下培养 14 d,随着混合培养基中污泥抽提液比重的逐渐增加,蛋白核小球藻的各项生长指标呈上升趋势,并且在污泥抽提液比例达到 90% 时,其光密度和比生长速率最大。当 100% 用污泥抽提液来培养时,其光密度和比生长速率虽然有所下降,但两者仍是 100% 用 SE 培养基来培养时的 2 倍多。同样,蛋白核小球藻的叶绿素、 β -胡萝卜素和蛋白质含量也是随着污泥抽提液比重的增大而逐渐增加,在污泥抽提液比重为 80% 时达到最大,随后随着污泥抽提液的比例增加呈下降趋势。从以上的研究结果可以得知,剩余污泥抽提液完全可以作为培养蛋白核小球藻的良好基质,并且其培养效果明显优于其标准培养基。微藻的光合作用需要从外界环境吸收营养物质来生产有机物,根据污泥抽提液水质指标的测定结果,肯定了污泥抽提液中也含有丰富的氮、磷等营养元素,而且污泥抽提液中的 COD 远高于 SE 培养基,这可为微藻生长代谢提供充足的营养。然而,并不是污泥抽提液在混合培养基中的比例越高越好。根据谢尔德福耐受定律,对具体生物个体来说,各种生态因子都存在着一个生物学的上限和下限,它们之间的幅度就是该种生物对某一生态因子的耐性范围。污泥抽提液中存在一些抑制因子^[33,36],在达到一定量以后,会对蛋白核小球藻的生长和繁殖起着一定的抑制作用,从而导致细胞密度降低,比生长速率下降。本实验研究结果表明,当抽提液比例为 90% 即 SE 培养基与抽提液的比例为 9:1 时,其叶绿素、 β -胡萝卜素和蛋白质的含量低于抽提液比例为 80% 的含量。当完全以抽提液为基质培养蛋白核小球藻,其生长情况和次生代谢产物的含量均受到了影响,这说明污泥抽提液中可能存在的抑制因子会对藻类的生长和次生代谢产物的积累产生抑制作用。因此在利用污泥抽提液培养微藻时,应合理确定污泥抽提液与标准培养基的比例,既要保证污泥抽提液中的营养成分被充分利用,又要避免污泥抽提液中的有毒有害物质对微

藻生长产生的抑制作用。

从本研究结果可以得出混合培养基中污泥抽提液的比例为 80% 时, 蛋白核小球藻的长势较好, 并且叶绿素与蛋白质含量最高, 因此在本研究的试验条件下, 可以将该比例确定为蛋白核小球藻生长的最佳比例。蒋培森等^[22] 研究发现, 啤酒厂废水污泥可 50% 替代 Zarrouk 培养基, 用于培养钝顶螺旋藻, 其生物量基本不变; 可 80% 替代标准培养基用于培养普通小球藻, 其生物量也基本不变, 这与本研究结果基本相同, 而本研究中有污泥抽提液的培养基蛋白核小球藻的生长效果明显优于纯 SE 培养基。

4 结论

(1) 随着混合培养基中污泥抽提液比重的逐渐增加, 蛋白核小球藻的各项生长指标呈上升趋势, 在污泥抽提液比例达到 80% ~ 90% 时达到最大, 并且 100% 的污泥抽提液为培养基时蛋白核小球藻的生长情况明显优于 100% 的 SE 培养基。

(2) 蛋白核小球藻的叶绿素、 β -胡萝卜素和蛋白质含量也是随着污泥抽提液比重的增大而逐渐增加, 在污泥抽提液比重为 80% 时达到最大。

(3) 本研究试验条件下, 混合培养基中污泥抽提液的比例为 80% 时, 蛋白核小球藻的长势较好, 并且叶绿素与蛋白质含量最高, 因此可将该比例确定为蛋白核小球藻培养的最佳条件。

(4) 剩余污泥抽提液完全可以作为培养蛋白核小球藻的良好基质, 并且其培养效果明显优于其标准培养基。

参考文献:

- [1] Cai Q Y, Mo C H, Wu Q T, *et al.* Occurrence of organic contaminants in sewage sludges from eleven wastewater treatment plants[J]. *Chemosphere*, 2007, **68**(9): 1751-1762.
- [2] Wang C, Hu X, Chen M L, *et al.* Total concentrations and fractions of Cd, Cr, Pb, Cu, Ni and Zn in sewage sludge from municipal and industrial wastewater treatment plants[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2005, **119**(1-3): 245-249.
- [3] 陈红英, 王红涛. 城市污水处理厂污泥的资源化利用研究[J]. *浙江工业大学学报*, 2007, **35**(3): 337-340.
- [4] 翟云波, 魏先勋, 曾光明, 等. 城市污水处理厂污泥资源化利用途径探讨[J]. *工业水处理*, 2004, **24**(2): 8-11.
- [5] 李国学, 张福锁. 固体废物堆肥化与有机复混肥生产[M]. 北京, 化学工业出版社, 2000.
- [6] 张国占, 方静, 全恩全. 污泥复合有机肥的生产与应用[J]. *中国给水排水*, 2003, **19**(6): 66-67.
- [7] 温俊明, 池涌, 刘渊源, 等. 城市污水污泥的燃烧动力学特性研究[J]. *电站系统工程*, 2004, **20**(5): 5-7.
- [8] 李桂芳, 孟范平. 污水污泥对染料废水的吸附脱色性能研究[J]. *中国海洋大学学报*, 2005, **35**(1): 91-94.
- [9] 赵鸣, 吴广芬, 李刚. 污泥资源化利用的途径与分析[J]. *环境科学与技术*, 2005, **28**(2): 92-94.
- [10] Zhou W, Li Y, Min M, *et al.* Local bioprospecting for high-lipid producing microalgal strains to be grown on concentrated municipal wastewater for biofuel production [J]. *Bioresource Technology*, 2011, **102**(13): 6909-6919.
- [11] Li Y, Chen Y F, Chen P, *et al.* Characterization of a microalgae *Chlorella* sp. well adapted to highly concentrated municipal wastewater in nutrient removal and biodiesel production [J]. *Bioresource Technology*, 2011, **102**(8): 5138-5144.
- [12] Liu J, Ma X Q. The analysis on energy and environmental impacts of microalgae-based fuel methanol in China [J]. *Energy Policy*, 2009, **37**(4): 1479-1488.
- [13] Irena D, František K, Yvette M, *et al.* Utilization of distillery stillage for energy generation and concurrent production of valuable microalgal biomass in the sequence; Biogas-cogeneration-microalgae-products [J], *Energy Conversion and Management*, 2010, **51**(3): 606-611.
- [14] Berberoglu H, Gomez P S, Pilon L. Radiation characteristics of *Botryococcus braunii*, *Chlorococcum littorale*, and *Chlorella* sp. used for CO₂ fixation and biofuel production [J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2009, **110**(17): 1879-1893.
- [15] Li Y Q. Biocatalysts and bioreactor design [J]. *Biotechnology Progress*, 2008, **24**: 815-820.
- [16] 梅洪, 张成武, 殷大聪, 等. 利用微藻生产可再生能源研究概况[J]. *武汉植物学研究*, 2008, **26**(6): 650-660.
- [17] 张聪. 利用城市污水厂污泥培养海洋微藻技术研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2007. 20-21.
- [18] 胡章喜, 安民, 段舜山, 等. 不同氮源对布朗葡萄藻生长、总脂和总烃含量的影响[J]. *生态学报*, 2009, **29**(6): 3288-3294.
- [19] 陆海珠, 蒋霞敏, 陆艳晶. 氮、磷、铁对原绿球藻生长的影响[J]. *宁波大学学报(理工版)*, 2009, **22**(3): 326-331.
- [20] 夏建荣, 余锦兰. 高浓度 CO₂ 对小新月菱形藻胞外碳酸酐酶活性和光合作用的影响[J]. *广州大学学报(自然科学版)*, 2009, **8**(3): 49-53.
- [21] 黎峥, 段舜山, 武宝环. UV-B 对两种藻光合色素和多糖含量的影响[J]. *生态科学*, 2003, **22**(1): 42-44.
- [22] 蒋培森, 蒋家伦, 汪富三, 等. 利用啤酒厂废水污泥培养钝顶螺旋藻和普通小球藻的研究[J]. *海洋湖沼通报*, 2000, (3): 15-19.
- [23] Dubois M, Gilles K A, Hamilton J K, *et al.* Colorimetric method for determination of sugars and related substances [J]. *Analytical Chemistry*, 1956, **28**(3): 350-356.
- [24] GB 11914-89 水质-化学需氧量的测定—重铬酸盐法[S].
- [25] GB 11893-89 水质-总磷的测定—钼酸铵分光光度法[S].
- [26] GB 11894-89 水质-总氮的测定—碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法[S].
- [27] HJ/T 346-2007 水质-硝酸盐氮的测定—紫外分光光度法[S].

- [28] GB 7493-87 水质-亚硝酸盐氮的测定—分光光度法[S].
- [29] Órpez R, Martínez M E, Hodaifa G, *et al.* Growth of the microalga *Botryococcus braunii* in secondarily treated sewage[J]. *Desalination*, 2009, **246**(1-3): 625-630.
- [30] Wang L, Li Y C, Chen P, *et al.* Anaerobic digested dairy manure as a nutrient supplement for cultivation of oil-rich green microalgae *Chlorella* sp[J]. *Bioresource Technology*, 2010, **101**(8): 2623-2628.
- [31] Wang L, Min M, Li Y, *et al.* Cultivation of green algae *Chlorella* sp. in different wastewaters from municipal wastewater treatment plant[J]. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 2010, **162**(4): 1174-1186.
- [32] Chinnasamy S, Bhatnagar A, Hunt R W, *et al.* Microalgae cultivation in a wastewater dominated by carpet mill effluents for biofuel applications [J]. *Bioresource Technology*, 2010, **101**(9): 3097-3105.
- [33] Goyal S, Dhull S K, Kapoor K K. Chemical and biological changes during composting of different organic wastes and assessment of compost maturity [J]. *Bioresource Technology*, 2005, **96**(14): 1584-1591.
- [34] Adani F, Tambone F. Long-term effect of sewage sludge application on soil humic acids [J]. *Chemosphere*, 2005, **60**(9): 1214-1221.
- [35] 乔显亮, 骆永明. 我国部分城市污泥化学组成及其农用标准初探[J]. *土壤*, 2001, **33**(4): 205-209.
- [36] 周立祥, 胡霭堂, 胡忠明. 厌氧消化污泥化学组成及其环境化学性质 [J]. *植物营养与肥料学报*, 1997, **3**(2): 176-181.

CONTENTS

Characterization of Chemical Compositions in PM _{2.5} and Its Impact on Hazy Weather During 16 th Asian Games in Guangzhou	TAO Jun, CHAI Fa-he, GAO Jian, <i>et al.</i> (409)
PM _{2.5} Pollution and Aerosol Optical Properties in Fog and Haze Days During Autumn and Winter in Beijing Area	ZHAO Xiu-juan, PU Wei-wei, MENG Wei, <i>et al.</i> (416)
Forming Potential of Secondary Organic Aerosols and Sources Apportionment of VOCs in Autumn of Shanghai, China	WANG Qian, CHEN Chang-hong, WANG Hong-li, <i>et al.</i> (424)
Study on Number Concentration Distribution of Atmospheric Ultrafine Particles in Hangzhou	XIE Xiao-fang, SUN Zai, FU Zhi-min, <i>et al.</i> (434)
Pollution Characteristics and Source Identification of Atmospheric Particulate Matters <i>n</i> -Alkanes in Baoding City	LI Xing-ru, DU Xi-qiang, WANG Ying-feng, <i>et al.</i> (441)
Study on Pollution Characteristics of Carbonaceous Aerosols in Xi'an City During the Spring Festival	ZHOU Bian-hong, ZHANG Cheng-zhong, WANG Ge-hui (448)
Characteristics of PM ₁₀ and PM _{2.5} Concentrations in Mountain Background Region of East China	SU Bin-bin, LIU Xin-dong, TAO Jun (455)
Assessment of TVOC and Odor in the Remediation Site of Contaminated Soil and Groundwater Using Electronic Nose	TIAN Xiu-ying, CAI Qiang, LIU Rui, <i>et al.</i> (462)
Characteristics of Mercury Exchange Flux Between Soil and Atmosphere Under the Snow Retention and Snow Melting Control	ZHANG Gang, WANG Ning, AI Jian-chao, <i>et al.</i> (468)
Study on Heavy Metal Contaminations and the Sources of Pb Pollution in Jinghai Bay Using the Stable Isotope Technique	XU Lin-bo, GAO Qin-feng, DONG Shuang-lin, <i>et al.</i> (476)
Eco-environmental Evolution Inferred from <i>n</i> -Alkanes and $\delta^{13}\text{C}$ Records in the Sediments of Shijiu Lake	OU Jie, WANG Yan-hua, YANG Hao, <i>et al.</i> (484)
Distribution of PGEs Contents and Its Factors in Snowfall and Snow Cover over the Arid Region in Changji City	LIU Yu-yan, LIU Hao-feng, ZHANG Lan (494)
Effect of Dust Deposition Collection Methods on Collection Efficiency	ZHANG Zheng-cai, DONG Zhi-bao (499)
Regionalization of the Freshwater Eco-regions in the Haihe River Basin of China	SUN Ran-hao, JI Yu-he, SHANG Lin-yuan, <i>et al.</i> (509)
Characteristics of Diffuse Attenuation Coefficient of Underwater Irradiance in the Lakes in the Middle and Lower Reaches of Yangtze River	SHI Zhi-qiang, ZHANG Yun-lin, WANG Ming-zhu, <i>et al.</i> (517)
Study on Influencing Factors and Universality of Chlorophyll- <i>a</i> Retrieval Model in Inland Water Body	HUANG Chang-chun, LI Yun-mei, XU Liang-jiang, <i>et al.</i> (525)
Effect of Dissolved Oxygen on Diversity of Ammonia-Oxidizing Microorganisms in Enrichment Culture from Estuarine Wetland Surface Sediments and Ammonia-oxidizing Rate	QIU Zhao-zheng, LUO Zhuan-xi, ZHAO Yan-ling, <i>et al.</i> (532)
Spatial Variation of Soil Moisture/Salinity and the Relationship with Vegetation Under Natural Conditions in Yancheng Coastal Wetland	ZHANG Hua-bing, LIU Hong-yu, LI Yu-feng, <i>et al.</i> (540)
Spatial Heterogeneity and Classified Control of Agricultural Non-Point Source Pollution in Huaihe River Basin	ZHOU Liang, XU Jian-gang, SUN Dong-qi, <i>et al.</i> (547)
Phosphorus Output Characteristics Under Different Rainfall-Runoffs in Gaolan River	CUI Yu-jie, LIU De-fu, SONG Lin-xu, <i>et al.</i> (555)
Monitoring and Analysis on Evolution Process of Rainfall Runoff Water Quality in Urban Area	DONG Wen, LI Huai-en, LI Jia-ke (561)
Characteristics and Contribution of the Strengthening Units of Composite Constructed Wetland for Treating Urban Sewage	REN Feng, LU Yi-xia, LIU Qin, <i>et al.</i> (570)
Inactivation of <i>Mycobacteria mucogenicum</i> in Drinking Water: Chlorine Resistance and Mechanism Analysis	ZHENG Qi, CHEN Chao, ZHANG Xiao-jian, <i>et al.</i> (576)
Partial Biological Characteristics and Algicidal Activity of an Algicidal Bacterium	LI San-hua, ZHANG Qi-ya (583)
Effects of Macrophytes Pyrolysis Bio-oil on <i>Skeletonema costatum</i> Antioxidant Enzyme Activities	YAO Yuan, LI Feng-min, LI Yuan-yuan, <i>et al.</i> (589)
Mechanism and Kinetics of Phenol Degradation by TiO ₂ Photocatalytic Combined Technologies	ZHANG Yi, HUANG Ruo-nan, WANG Xiao-min, <i>et al.</i> (596)
Biodegradation Characteristics of Organic Pollutants Contained in Tannery Wastewater	WANG Yong, LI Wei-guang, YANG Li, <i>et al.</i> (604)
Microbial Degradation Mechanism of Disperse Azo Dye Red 30 by <i>Streptomyces</i> sp. FX645	XIE Lian-wu, FANG Ji-qian, GUO Ya-ping (611)
Study on Preparation and Performance of a Biological Carrier with Tourmaline	YANG Ji-xian, ZENG Hong-yun, ZHOU Yi, <i>et al.</i> (616)
Study on the <i>Chlorella pyrenoidosa</i> Cultivation Technology Based on the Excess Sludge Utilization	JI Wen-wen, XIA Hui-long, FANG Zhi-guo, <i>et al.</i> (622)
Effects of Mild Thermal Pretreatment on Anaerobic Digestibility of Sludge with Low Organic Content	CHEN Han-long, YAN Yuan-yuan, HE Qun-biao, <i>et al.</i> (629)
Effect of Natural and Hydrothermal Synthetic Goethite on the Release of Methane in the Anaerobic Decomposition Process of Organic Matter	YAO Dun-fan, CHEN Tian-hu, WANG Jin, <i>et al.</i> (635)
Concentrations and Distribution Characteristics of PCDD/Fs in Spent Etching Solution and Its Copper Salt Recycling Products	QING Xian, HAN Jing-lei, WEN Yan-shen (642)
Case Study on Health Risk Assessment Based on Site-Specific Conceptual Model	ZHONG Mao-sheng, JIANG Lin, YAO Jue-jun, <i>et al.</i> (647)
Study on the Risk Assessment Method of Regional Groundwater Pollution	YANG Yan, YU Yun-jiang, WANG Zong-qing, <i>et al.</i> (653)
Groundwater Organic Pollution Source Identification Technology System Research and Application	WANG Xiao-hong, WEI Jia-hua, CHENG Zhi-neng, <i>et al.</i> (662)
Study on Soil Organic Carbon Pools and Turnover Characteristics Along an Elevation Gradient in Qilian Mountain	ZHU Ling-yu, PAN Jian-jun, ZHANG Wei (668)
Response of Black Soil Organic Carbon, Nitrogen and Its Availability to Long-term Fertilization	LUO Kun, HU Rong-gui, ZHANG Wen-ju, <i>et al.</i> (676)
Phytoavailability and Chemical Speciation of Cadmium in Different Cd-Contaminated Soils with Crop Root Return	ZHANG Jing, YU Ling-ling, XIN Shu-zhen, <i>et al.</i> (685)
Study on Mechanism of SOM Stabilization of Paddy Soils Under Long-term Fertilizations	LUO Lu, ZHOU Ping, TONG Cheng-li, <i>et al.</i> (692)
Aging Process of Cr(III) in 22 Typical Soils of China and Influence Factors Analysis	ZHENG Shun-an, ZHENG Xiang-qun, LI Xiao-chen, <i>et al.</i> (698)
Residual Characteristics of HCHs in Soils of a Former Lindane Production Enterprise	PAN Feng, WANG Li-li, ZHAO Hao, <i>et al.</i> (705)
Evaluation and Source Analysis of the Mercury Pollution in Soils and Vegetables Around a Large-scale Zinc Smelting Plant	LIU Fang, WANG Shu-xiao, WU Qing-ru, <i>et al.</i> (712)
Residue of Organic Fluorine Pollutants in Hair and Nails Collected from Tianjin	YAO Dan, ZHANG Hong, CHAI Zhi-fang, <i>et al.</i> (718)
Analysis of Estrogens, Nonylphenol, 4-tert-Octylphenol and Bisphenol A in the Sediments	WU Wei, SHI Jiang-hong, CHEN Qing-cai, <i>et al.</i> (724)
Investigation of As, Cu and Zn Species and Concentrations in Animal Feeds	YAO Li-xian, HUANG Lian-xi, JIANG Zong-yong, <i>et al.</i> (732)
Residue Dynamics of Flubendiamide in Paddy Field	WANG Dian-dian, SONG Ning-hui, WU Wen-zhu, <i>et al.</i> (740)
Isolation of Two Endophytic Phenanthrene-Degrading Strains and Their Degradation Capacity	NI Xue, LIU Juan, GAO Yan-zheng, <i>et al.</i> (746)
Biodegradation of Nitrobenzene by a Halophilic <i>Myroides odoratimimus</i> Strain Y6	LI Tian, QIAN Kun, XIAO Wei, <i>et al.</i> (753)
Effect of Immobilization on Biosensor for Benzene Derivates Detection	TANG Kuo, MA An-zhou, YU Qing, <i>et al.</i> (760)
Investigation of Bacterial Diversity in the Biological Desulfurization Reactor for Treating High Salinity Wastewater by the 16S rDNA Cloning Method	LIU Wei-guo, LIANG Cun-zhen, YANG Jin-sheng, <i>et al.</i> (767)
Assessment of the Effect of Influent NH ₄ ⁺ -N Concentration on the Abundance and Community Structure of Functional Bacteria in CANON Process	LIU Tao, LI Dong, ZENG Hui-ping, <i>et al.</i> (773)
Biodegradation of Lignocellulose by <i>Penicillium simplicissimum</i> and Characters of Lignocellulolytic Enzymes	SHEN Ying, HU Tian-jue, ZENG Guang-ming, <i>et al.</i> (781)
Microbial Community Structure and Distribution Characteristics in Oil Contaminated Soil	YANG Meng-qing, LI Li-ming, LI Chuan, <i>et al.</i> (789)
Degradation of Oxytetracycline in Chicken Feces Aerobic-Composting and Its Effects on Their Related Parameters	WANG Gui-zhen, LI Zhao-jun, ZHANG Shu-qing, <i>et al.</i> (795)
Research of Moisture Content Variation in MSW Landfill	LI Rui, LIU Jian-guo, XUE Yue-wei, <i>et al.</i> (804)
Anaerobic Digestion of Lignocellulosic Biomass with Animal Digestion Mechanisms	WU Hao, ZHANG Pan-yue, GUO Jian-bin, <i>et al.</i> (810)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

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

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2013年2月15日 34卷 第2期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 34 No. 2 Feb. 15, 2013

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

国内外公开发行人