

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第9期

Vol.35 No.9

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

长江三角洲地区霾判别方法的对比分析	刘晓慧,朱彬,高晋徽,张恩红,王红磊,陈焯鑫,王姝 (3239)
1980~2012年江苏省城市霾日的时空分布及成因分析	刘端阳,魏建苏,严文莲,吕军,孙燕 (3247)
瓦里关大气二氧化碳和甲烷时间变化特征	刘鹏,张国庆,王剑琼,吴昊,李宝鑫,王宁章 (3256)
上海城区PM _{2.5} 中有机碳和元素碳变化特征及来源分析	张懿华,王东方,赵倩彪,崔虎雄,李娟,段玉森,伏晴艳 (3263)
亚青会期间南京市气溶胶中OC和EC的粒径分布	王红磊,朱彬,安俊琳,段卿,邹嘉南,沈利娟 (3271)
无锡市冬季典型天气PM _{2.5} 中碳组分的污染特征	云龙,陆钊,张天舒,伍德侠,盛世杰,陆亦怀,刘建国 (3280)
高炉炼铁工艺细颗粒物PM _{2.5} 排放特性分析	范真真,赵亚丽,赵浩宁,梁兴印,孙静雯,王保贵,王亚军 (3287)
重庆市北碚城区大气中VOCs组成特征研究	祁心,郝庆菊,吉东生,张军科,刘子锐,胡波,王跃思,江长胜 (3293)
双组分VOCs的催化氧化及动力学分析	卜龙利,杨力,孙剑宇,梁欣欣,虎雪姣,孟海龙 (3302)
汽车排放超细微颗粒物浓度及粒径谱特征的实验研究	陆叶强,陈秋方,孙在,蔡志良,杨文俊 (3309)
疏勒河上游地表水化学离子特征及其控制因素	周嘉欣,丁永建,曾国雄,吴锦奎,秦甲 (3315)
河流库区沉积物-水界面营养盐及气态氮的释放过程和通量	陈朱虹,陈能汪,吴殷琪,莫琼利,周兴鹏,鲁婷,田蕴 (3325)
大辽河感潮段及其近海河口重金属空间分布及污染评价	张雷,秦延文,马迎群,赵艳民,时瑶 (3336)
雅鲁藏布江中段表层沉积物重金属形态分布及风险评价	柏建坤,李潮流,康世昌,陈鹏飞,王建力 (3346)
北京奥林匹克公园地表颗粒物粒度特征分析	李海燕,石安邦,瞿杨晨,岳靖冰 (3352)
黄河表层沉积物中类二噁英多氯联苯水平分布	李光耀,金军,何畅,王英,马召辉,李明园 (3358)
合肥城郊典型源头溪流不同渠道形态的氮磷滞留特征	李如忠,杨继伟,钱靖,董玉红,唐文坤 (3365)
基于水资源调度的平原河网区城市河道氮迁移转化研究	刘波,盛明,朱强,杨霜,檀炳超,范冉,南旭军,何茂阳,王国祥 (3373)
杭州湾潮滩湿地植物不同分解过程及其磷素动态	邵学新,梁新强,吴明,叶小齐,蒋科毅 (3381)
基于数据同化的太湖叶绿素多模型协同反演	李渊,李云梅,吕恒,朱利,吴传庆,杜成功,王帅 (3389)
天然日光辐照下两江交汇处溶解性有机质(DOM)光漂白过程:以涪江-嘉陵江为例	高洁,江韬,闫金龙,魏世强,王定勇,卢松,李璐璐 (3397)
利用紫外-可见吸收光谱估算三峡库区消落带水体、土壤和沉积物溶解性有机质(DOM)浓度	李璐璐,江韬,卢松,闫金龙,高洁,魏世强,王定勇,郭念,赵铮 (3408)
Cu ₂ O-Ag-AgBr/MA可见光催化剂的制备及其降解2-氯苯酚的研究	王冉,周雪峰,胡学香,胡春 (3417)
不同粒径零价铁活化过硫酸钠氧化降解酸性橙7的影响及动力学研究	李欢旋,王金泉,马邕文,黄明智,王艳,陈杨梅 (3422)
还原脱氯-生物联合降解2,4-二氯苯氧乙酸	周红艺,曾思思,梁思,韩鉴 (3430)
多介质土壤滤层系统(MSL)与潜流式人工湿地技术处理海水养殖废水的效能比较	宋颖,黄玉婷,葛川,张浩,陈昕,张志剑,罗安程 (3436)
不同碳源在污水处理过程中的变化规律研究	金鹏康,常晋,王先宝,刘柯君,王晓昌 (3443)
气升装置对厌氧氨氧化反应器脱氮效能的影响	李祥,张大林,黄勇,陈宗炬,袁怡 (3449)
微波及其组合工艺强化污泥厌氧消化研究	刘吉宝,倪晓棠,魏源送,佟娟,王亚伟 (3455)
“热水解-高温厌氧消化”工艺处理高含固率剩余污泥的中试研究	吴静,王广启,曹知平,李中华,胡玉瑛,王凯军,左剑恶 (3461)
温度对ABR-MBR复合工艺处理生活污水的影响及其微生物群落分析	吴鹏,陆爽君,徐乐中,刘捷,沈耀良 (3466)
污水处理厂尾水细菌群落结构分析	徐爱玲,任杰,宋志文,吴等等,夏岩 (3473)
沼液养殖钝顶螺旋藻的中试研究	国青青,刘锐,罗金飞,王根荣,陈吕军,刘笑 (3480)
内源呼吸过程溶解性代谢产物的光谱特性分析	李志华,张芹,白旭丽,刘毅 (3487)
基于呼吸图谱的自养菌与异养菌内源呼吸过程分析	李志华,白旭丽,张芹,刘毅,贺春博 (3492)
S-异丙甲草胺与镉对斜生栅藻光合作用的影响	陈彩东,胡晓娜,章小强,刘惠君 (3498)
影响浑太河流域鱼类群落结构的不同尺度环境因子分析	李艳利,李艳粉,徐宗学 (3504)
河口区新建河道轮虫群落演替及与水环境的关系	马文华,张玮,顾琬雯,张瑞雷,王丽卿 (3513)
Fontibacter sp. SgZ-2厌氧腐殖质/Fe(III)还原特性及电子传递机制研究	马晨,杨贵芹,陆琴,周顺桂 (3522)
基于UNMIX模型的夹皮沟金矿区土壤重金属源解析	艾建超,王宁,杨净 (3530)
石河子市土壤环境磁学特征及空间分布研究	杨涵,熊黑钢,陈学刚 (3537)
不同施磷量(KH ₂ PO ₄)作用对Cu、Zn在红壤中的迁移转化	郭亮,李忠武,黄斌,王艳,张艳 (3546)
硫素对水稻吸收砷的生物有效性及其在土壤中形态影响	杨世杰,唐冰培,王代长,饶伟,张亚楠,王丹,朱云集 (3553)
硫对土壤中硒形态变化及油菜硒吸收的影响	刘新伟,段碧辉,夏全杰,矫威,郭再华,胡承孝,赵竹青 (3564)
再生水灌溉对土壤化学性质及可培养微生物的影响	龚雪,王继华,关键飞,杨雪辰,陈黛慈 (3572)
西南喀斯特山区寿竹林地土壤微生物量与酶活性在不同坡位和剖面层次的分布特征	秦华军,何丙辉,赵旋池,李源,毛文韬,曾清平 (3580)
黔中喀斯特石漠化区不同土壤类型对常见植物叶片δ ¹³ C值的影响	杜雪莲,王世杰,罗绪强 (3587)
碳底物含量对厌氧条件下水稻土N ₂ 、N ₂ O、NO、CO ₂ 和CH ₄ 排放的影响	陈诺,廖婷婷,王睿,郑循华,胡荣桂,Klaus Butterbach-Bahl (3595)
北京市典型绿化灌木阻滞吸附PM _{2.5} 能力研究	梁丹,王彬,王云琦,张会兰,杨松楠,李昂 (3605)
污泥焚烧过程中氯化物对Cd迁移行为的影响	刘敬勇,卓钟旭,孙水裕,罗光前,李晓明,谢武明,王玉洁,杨佐毅,赵素莹 (3612)
京津冀区域生产和消费CO ₂ 排放的时空特点分析	汪浩,陈操操,潘涛,刘春兰,陈龙,孙莉 (3619)
水泥工业大气污染物排放控制水平确立研究	任春,江梅,邹兰,李晓倩,魏玉霞,赵国华,张国宁 (3632)
《环境科学》征稿简则 (3279) 《环境科学》征订启事 (3545) 信息 (3364,3486,3552,3563)	

沼液养殖钝顶螺旋藻的中试研究

国青青^{1,2}, 刘锐^{2*}, 罗金飞², 王根荣⁴, 陈吕军^{2,3}, 刘笑²

(1. 上海师范大学生命与环境科学学院, 上海 200234; 2. 浙江清华长三角研究院生态环境研究所, 浙江省水质科学与技术重点实验室, 嘉兴 314006; 3. 清华大学环境学院, 北京 100084; 4. 嘉兴市南湖区农业经济局, 嘉兴 3140006)

摘要: 在室外中试规模的跑道池中, 使用混凝沉淀处理后的沼液养殖高耐污钝顶螺旋藻, 研究了螺旋藻的生长情况以及沼液中氮磷的去除情况, 计算了沼液中氮磷向螺旋藻体的转化效率. 在此基础上, 结合小试研究, 分析总结了使用沼液室外规模化养殖螺旋藻过程中存在的问题和对策. 以12 d为一个培养周期, 总共进行了6批次培养试验, 其中3批次培养的螺旋藻浓度能够达到采收要求($D_{560} > 0.8$); 而另外3批次未能收获螺旋藻. 成功的3个养殖批次中, 螺旋藻采收后沼液中COD、氨氮、总氮、总磷分别减少了28.6%~48.5%、30.4%~48.5%、41.8%~48.6%、14.3%~94.5%; 其中去除的总氮和总磷向螺旋藻细胞的转化率分别为12.1%~98.5%和21.2%~83.7%. 沼液中的高浓度氨氮以及残存虫卵孵化产生的虫害是导致另外3批次培养螺旋藻生长缓慢的主要因素, 使用生物处理技术降低沼液中氨氮含量、使用膜过滤技术去除沼液中虫卵对于稳定获得高产率的螺旋藻非常必要.

关键词: 钝顶螺旋藻; 沼液; 总氮; 总磷; 富营养化

中图分类号: X703 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)09-3480-07 DOI: 10.13227/j.hjxx.2014.09.033

Pilot-Scale Cultivation of *Spirulina platensis* with Digested Piggery Wastewater

GUO Qing-qing^{1,2}, LIU Rui², LUO Jin-fei², WANG Gen-rong⁴, CHEN Lü-jun^{2,3}, LIU Xiao²

(1. College of Life and Environmental Science, Shanghai Normal University, Shanghai 200234, China; 2. Zhejiang Provincial Key Laboratory of Water Science and Technology, Department of Environment in Yangtze Delta Region Institute of Tsinghua University, Jiaxing 314006, China; 3. School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 4. Jiaxing Nanhu Agricultural Economical Bureau, Jiaxing 314000, China)

Abstract: The swine waste pretreated with coagulation sedimentation was used for the outdoor pilot-scale cultivation of *Spirulina platensis* isolated from digested piggery wastewater (DPW) in a raceway pond. The growth of *S. platensis* and removal of nitrogen/phosphorus were studied, moreover, the conversion efficiency of total nitrogen (TN) or total phosphorus (TP) from DPW to *S. platensis* was calculated. On this basis, the existing problems and countermeasures during outdoor pilot-scale culture were analyzed and summarized combined with the laboratory research. We conducted 6 batches culture experiments, only 3 of which could reach the *S. platensis* harvest requirements ($D_{560} > 0.8$). Meanwhile, the 3 successful batches achieved removal of COD, ammonia nitrogen, TN, TP with corresponding 28.6%-48.5%, 30.4%-48.5%, 41.8%-48.6%, 14.3%-94.5%, and the conversion efficiency of TN or TP from DPW to *S. platensis* reached 12.1%-98.5%, 21.2%-83.7%, respectively. High concentration of ammonia nitrogen and insect attack of remaining egg hatching in the pretreated swine waste were the main factors to cause the slow-growing of the 3 batches of *S. platensis*. Therefore, it is highly necessary for the removal of ammonia nitrogen with biological treatment technology and insect eggs with membrane to achieve a stable high productivity.

Key words: *Spirulina platensis*; digested piggery wastewater (DPW); total nitrogen; total phosphorus; eutrophication

螺旋藻(*Spirulina*)是一种古老的微藻类生物, 含有丰富的蛋白质、氨基酸、维生素和生物活性物质, 对提高生物体免疫力、防治多种疾病有显著辅助作用^[1]. 此外, 螺旋藻作为饲料添加剂可以促进动物生长发育并提高动物产品的外观和营养价值^[2]. 螺旋藻生长繁殖快, 光合效率高, 养殖成本低、效益好, 近年来国内外规模养殖较多. 传统的螺旋藻规模养殖中需要向水中人工投加小苏打和氮磷等营养盐, 由于上述营养盐价格贵且用量大, 导致螺旋藻的生产成本较高, 其中培养基成本一般占总生产成本的20%~30%^[3]. 饲料级螺旋藻的价格很

高, 导致虽然饲料级螺旋藻的需求空间很大, 但实际产量很小.

沼液中含有丰富的氮、磷、钾等营养元素以及锌、镁等微量元素, 同时还含有蛋白质、氨基酸、糖类、吡啶乙酸、核糖等营养物质和维生素、生长激素等生长调控物质^[4]. 利用沼液培养钝顶螺旋藻(*Spirulina platensis*), 不仅可以实现沼液的脱氮除磷

收稿日期: 2014-01-18; 修订日期: 2014-02-28

基金项目: 嘉兴市科技计划项目(2011AZ1015-2); 南湖区科技计划项目(2011QN01)

作者简介: 国青青(1989~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为水污染控制, E-mail: guoqingqin4166@163.com

* 通讯联系人, E-mail: liuruitsinghuazj@gmail.com

深度处理,创造环境效益;还可以降低螺旋藻的培养成本,收获藻体作为饲料,解决市场上饲料级螺旋藻供应不足的难题,创造经济效益. 沼液培养螺旋藻的室内小规模试验已有很多文献报道,如 Cañizares 等^[5]用猪粪悬液好氧发酵后的废水培养螺旋藻,藻干粉中蛋白含量为 36%. 李玉宝等^[6]在添加 10% Zarrouk 培养基的沼液中培养螺旋藻,最终产率约为 $7.5 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$,粗蛋白含量 30% ~ 40%. Chung 等^[7]在室内螺旋藻光照培养塘内缓慢注入 10% 的厌氧发酵后的猪粪废水,并添加 NaHCO_3 等无机营养盐,螺旋藻的产率可达 $5 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$,藻粉粗蛋白含量 55% ~ 61%. 沼液的室内养殖中螺旋藻的产率低或者蛋白含量低. 此外,室外小规模养殖试验也有少量报道. 吴开国等^[8]把沼液上清液用砂滤池过滤后用漂白粉消毒,添加海盐、 K_2HPO_4 、 FeSO_4 、 MnCl_2 、 NaHCO_3 ,在室外 20 m^2 养殖池中连续培养 2 周得到粗蛋白含量 $62.3\% \pm 1.1\%$ 的螺旋藻,产率为 $7.4 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$. Chaiklahan 等^[9]用稀释 5 倍的 UASB 处理后的养猪废水,再添加 $4.5 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 小苏打和 $0.2 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 氮磷复合肥后,在 100 L 的室外开放式跑道池中培养钝顶螺旋藻,螺旋藻的产率为 $12 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$. 沼液的室外养殖中添加较多的营养盐增加了养殖成本,而且受污染的风险较大,尚不能应用于规模化的养殖中.

与纯培养相比,螺旋藻在废水中的培养普遍存在生长慢、产量低、性状不良、粗蛋白含量不高等问题^[5]. 本研究从沼液中分离出了生长速率快、产量和蛋白含量高、适应性和抗逆性强、藻丝性状优良的钝顶螺旋藻株 ZJWST-S1. 前期的室内跑道池试验^[10]已经证明 ZJWST-S1 能在沼液中快速增长,净产率可达 $64.7 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$,且螺旋藻的质量满足饲料级螺旋藻标准 GB/T 17243-1998. 本研究在室外 40 m^2 椭圆形跑道池中,利用沼液培养本地分离的螺旋藻株 ZJWST-S1,探讨了螺旋藻的生长情况以及沼液中氮磷的去除情况,计算了沼液中氮磷向螺旋藻体的转化效率,并结合小试研究,分析总结了使用沼液室外规模化养殖螺旋藻过程中可能存在的问题和对策,以期对沼液的规模化养殖饲料级螺旋藻提供参考.

1 材料与方法

1.1 材料及方法

钝顶螺旋藻 ZJWST-S1 由中国微生物菌种保藏委员会普通微生物中心(CGMCC)保存,在光照恒温

培养箱中用液体 Zarrouk^[11]的培养基在温度 $25^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$ 、光照 $6000 \text{ lx} \pm 2000 \text{ lx}$ 、光暗比(12 h: 12 h)条件下培养至 D_{560} 为 3.0 ~ 5.0 时接种.

养藻用椭圆形跑道池(图 1)长 10.0 m,宽 4.0 m,水深 0.3 m. 2 个叶轮白天连续搅拌 8 ~ 10 h. 跑道池使用前用 10% 石灰水消毒.

沼液取自嘉兴某规模化养猪厂沼液储存池,添加 $40 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 聚合氯化铝,搅拌 0.5 h 后静置沉淀,取上清液用清水稀释,使氨氮浓度小于 $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,然后添加 1000 g 小苏打调节水质初始 pH 大于 8.0. 添加 1000 g NaCl 调节盐度,因第 1 批养殖中发现枝角类(节肢动物门)的污染,所以第 2 批开始添加 120 g 无水硫酸钙抑制枝角类的生长;因第 3 批养殖中发现桡足类(节肢动物门)的污染,所以第 6 批培养中还添加了 1500 g EDTA,以抑制桡足类(节肢动物门)的生长. 2012 年 6 ~ 9 月在椭圆形跑道池中养殖 6 批螺旋藻.

向配制好的沼液培养基中接入对数期的螺旋藻种,使初始 D_{560} 不小于 0.05. 每隔 24 h 观察螺旋藻的生长状况,并记录养殖过程中天气、大棚内气温和养殖池中的水温、pH 和 D_{560} 的变化. 培养 8 ~ 11 d(以实际情况而定)后用 400 目滤布将螺旋藻从培养液中分离出来,滤液用双层定性滤纸过滤后测量水质,计算沼液中氮磷去除率,并评价其向藻体细胞的转化效率.

为考察氨氮对螺旋藻生长的影响,配合室外中试试验进行了室内小试摇瓶试验,方法如下:250 mL 锥形瓶中装入 100 mL Zarrouk 培养基,加硫酸铵使培养基中氨氮浓度分别为 20、40、60、100、150、200 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$,接入藻种使 D_{560} 为 0.20,然后将锥形瓶置于光照恒温培养箱中连续培养 10 d,培养条件与藻种培育条件相同. 每天手动摇匀 3 次,每 24 h 测定 D_{560} .

中试所用小苏打和 NaCl 为工业级,其余试剂均为优级纯.

1.2 分析测试方法

D_{560} 采用 722s 可见分光光度计在 560 nm 下测定^[12];螺旋藻干重测定时先把一定容积的藻液用 400 目滤布过滤,之后在 60°C 下烘 4 h,计算单位体积藻液烘干后的干重^[13];螺旋藻的产率由螺旋藻干重与 D_{560} 拟合相关曲线: $Y(\text{g} \cdot \text{L}^{-1}) = 0.2394D - 0.0001$ ($R^2 > 0.97$) 换算获得^[14];常规水质分析参照文献[15]. 螺旋藻细胞中的氮磷含量根据文献[16]提出的螺旋藻分子式进行估算:螺旋藻分子式

近似为 $C_{106}H_{263}O_{110}N_{16}P$, 其中 C、N、P 所占百分比分别为 35.8%、6.3%、0.87%。按照式(1)计算得到藻体中 N、P 含量:

藻体中的 N(P) = 螺旋藻干物质积累量 × 藻体中 N(P) 的百分比 (1)

按照式(2)、(3)计算得出沼液中去除的 N、P 向藻体细胞的转化率:

N 转化率 = 螺旋藻干物质积累量 × 6.3% / 水中 N 削减量 (2)

P 转化率 = 螺旋藻干物质积累量 × 0.87% / 水中 P 削减量 (3)



图 1 椭圆形跑道池

Fig. 1 Picture of the raceway pond

2 结果与讨论

2.1 螺旋藻的生长过程曲线及产率计算

2012 年 6~9 月在椭圆形跑道池中养殖了 6 批螺旋藻, 每批次的培养周期为 8~12 d, 生长曲线如图 2 所示。第 1 批培养中, 螺旋藻经过短暂的停滞期后进入对数生长期, 第 7 d 发现水蚤终止培养, 螺旋藻的产率为 $13.7 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$ 。第 2 和第 4 批培养中, 螺旋藻的停滞期长且生长缓慢。第 3 批培养中, 螺旋藻经过 4 d 的停滞期后进入对数生长期, 第 9 d 螺旋藻浓度不再增加, 并发现有水蚤污染, 螺旋藻的产率为 $5.7 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$ 。第 5 批培养中, 螺旋藻停滞期长且生长缓慢, 第 7 d 浓度开始下降, 而后养殖池中发现摇蚊幼虫繁殖。第 6 批培养中, 螺旋藻经过 3 d 停滞期后能进入对数生长期; 但养殖池中显微镜观察发现有大量的虫卵(图 3), 第 7 d 时养殖池中发现大量摇蚊幼虫并终止培养, 螺旋藻的产率为 $8.0 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$ 。

由于螺旋藻浓度较低时采收成本会很高, 通常认为 D 为 0.6~1.0 时适合采收^[17]。本研究以 $D_{560} > 0.8$ 作为采收基准。则 6 批培养中只有第 1、3、6 批在培养途中或最终能够达到采收要求, 而其余 3 批螺旋藻生长缓慢, 最终未能达到采收要求。第 1

批养殖中螺旋藻生长快、停滞期短, 在本研究的 6 批次培养中产率最高; 相比之下, 第 3 批和第 6 批养殖试验虽然达到采收浓度, 但产率要低出很多, 这与病虫害和停滞期较长等因素有关。上述 3 批次试验得到的螺旋藻产率只有前期小试产率的 1/5~1/10, 但是最高产率还是高于文献[5,7,9]报道的产率, 而且本试验只添加了较少的营养盐, 养殖成本更低。

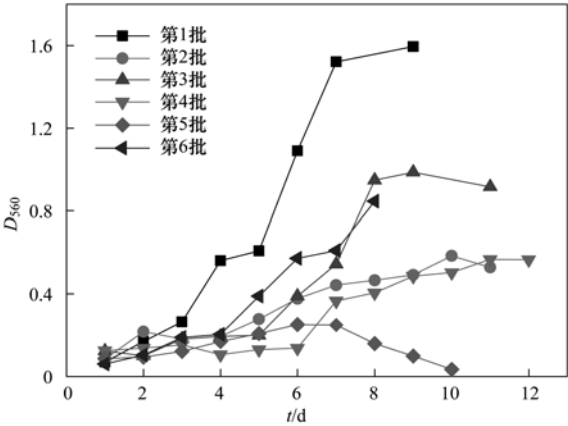


图 2 螺旋藻的生长曲线

Fig. 2 Growth curves of *S. platensis*



图 3 养殖池中虫卵显微镜照片

Fig. 3 Microscopic image of insect eggs in raceway pond

2.2 沼液中的氮磷去除率及其向藻体细胞转化情况

各批次螺旋藻采收前后沼液中各水质变化如表 1 所示。达到采收要求的 3 批次试验, 采收螺旋藻后的沼液中氨氮、总氮、总磷、COD 的去除率分别为 30.4%~48.5%、41.8%~48.6%、14.3%~94.5%、28.6%~48.5%。第 2、4、5 批因生长缓慢螺旋藻的浓度没有达到采收基准, 在此不讨论其水质情况。

本研究中氨氮、TN 和 TP 去除率较文献[18]报道值偏低,这主要是由于本研究养殖螺旋藻的沼液中氨氮、TN 和 TP 初始浓度相对较高. 同时发现本研究中去除的 TN 中大部分是氨氮,这是因为藻细胞利用氨氮的方式主要是谷氨酰胺合成酶系统,有氨氮时首先利用氨氮;没有氨氮时,硝酸盐或者亚硝酸盐会被硝酸还原酶或亚硝酸盐还原酶还原成氨氮,然后再被藻类吸收利用^[19]. 此外,本研究中 COD 也得到了少量的去除,这可能与螺旋藻体表面对有机物的吸附有关^[20],也可能与螺旋藻具有一定的异养能力,可利用沼液中的有机物进行异养生长^[21]有关.

表 1 中同时计算了沼液中去除的氮磷向螺旋藻体中的转化率. 成功采收的 3 批次试验中螺旋藻细胞对 TN 和 TP 的同化量分别为 11.8 ~ 23.6 mg·L⁻¹

和 1.6 ~ 3.2 mg·L⁻¹. 氮磷的转化效率分别为 12.1% ~ 98.5% 和 21.2% ~ 83.7%. 第 2、4、5 批因生长缓慢螺旋藻的浓度没有达到采收基准,不做讨论.

第 1 批试验的氮磷转化率超过 80%,且氮磷转化率与生长速率呈正相关. 然而仍有少量氮磷被去除了,但并未转化到藻细胞中去,这可能与藻体表面的吸附作用有关^[22],也可能是受螺旋藻养殖池中其他微生物生长代谢的影响^[23]. 此外,第 3、6 批的氮磷转化率均小于 50%,一方面可能是幼虫吞噬了一部分的螺旋藻使氮磷元素在虫体内累积;另一方面高浓度的氨氮在养殖池中碱性环境(约 8.5 ~ 9.5)和连续搅拌等因素的影响下以游离氨的形式挥发到空气中^[24],而磷酸盐则可能与沼液中钙、镁反应生成沉淀被去除^[25].

表 1 营养盐的资源化利用

Table 1 Nutrient removal and recycling to <i>S. platensis</i> cells													
批次	项目	单位	COD	氨氮	TN	TP	批次	项目	单位	COD	氨氮	TN	TP
1	养藻进水	mg·L ⁻¹	70	46	57	4	养藻进水	mg·L ⁻¹	122	99	104	4	
	养藻出水	mg·L ⁻¹	50	32	33	0.2	养藻出水	mg·L ⁻¹	64	48	49	0.2	
	去除率	%	28.6	30.4	42.1	94.5	4 去除率	%	47.5	51.5	52.9	94.5	
	藻细胞同化量	mg·L ⁻¹	—	—	23.6	3.2	藻细胞同化量	mg·L ⁻¹	—	—	6.7	3.2	
	氮/磷转化率	%	—	—	98.5	83.7	氮/磷转化率	%	—	—	12.1	83.7	
2	养藻进水	mg·L ⁻¹	63	63	69	3	养藻进水	mg·L ⁻¹	109	98	121	3	
	养藻出水	mg·L ⁻¹	43	43	45	1.8	养藻出水	mg·L ⁻¹	85	72	92	1.8	
	去除率	%	31.7	31.7	34.8	39.0	5 去除率	%	22.0	26.5	24.0	39.0	
	藻细胞同化量	mg·L ⁻¹	—	—	6.7	1.0	藻细胞同化量	mg·L ⁻¹	—	—	—	1.0	
	氮/磷转化率	%	—	—	27.8	78.6	氮/磷转化率	%	—	—	—	78.6	
3	养藻进水	mg·L ⁻¹	98	98	110	5	养藻进水	mg·L ⁻¹	66	66	72	5	
	养藻出水	mg·L ⁻¹	63	63	64	1.0	养藻出水	mg·L ⁻¹	34	34	37	1.0	
	去除率	%	35.7	35.7	41.8	80.4	6 去除率	%	48.5	48.5	48.6	80.4	
	藻细胞同化量	mg·L ⁻¹	—	—	12	1.7	藻细胞同化量	mg·L ⁻¹	—	—	11.8	1.7	
	氮/磷转化率	%	—	—	26.1	41.7	氮/磷转化率	%	—	—	33.8	41.7	

2.3 螺旋藻生长缓慢原因分析

本试验中,第 1 批养殖中螺旋藻停滞期短、生长速率快、产率高. 与第 1 批养殖相比,其余各批养殖中螺旋藻的停滞期较长,生长速率也较慢. 文献[26]表明,螺旋藻的生长受温度、光照、pH、营养盐等因素的影响. 6 ~ 9 月的水温在 20 ~ 30℃ 之间不会抑制螺旋藻的生长;第 1 ~ 5 批养殖期间多为阴雨天气,光照的差异并不明显(第 6 批养殖期间多为晴天,可能强光照是导致其停滞期长的原因之一);各批次的初始 pH 在 8.0 ~ 8.5 之间,相差不大;因此各批次生长差异主要不是由温度、光照、pH 引起的,而是由于沼液中不同浓度的营养盐导致的.

与第 1 批养殖相比较,其余各批次沼液中可能

导致螺旋藻停滞期长和生长缓慢的因素主要是 COD、氨氮. 已有研究表明^[27]光照条件下螺旋藻还可以利用少量糖类、有机酸、氨基酸等进行混和营养生长,但是高浓度的有机物会抑制螺旋藻的生长. 第 3、4、5 批养殖中 COD 均超过 70 mg·L⁻¹,可能抑制了螺旋藻的生长.

与 COD 类似,高浓度氨氮同样会抑制螺旋藻的生长. Yuan 等^[28]研究表明,在高温、高 pH 时氨氮主要以游离氨的形式存在,游离氨对藻类有很大的毒性,因此高氨氮会抑制螺旋藻的生长. 第 1 批养殖中氨氮的浓度为 43 mg·L⁻¹,没有抑制螺旋藻的生长,而其余各批的氨氮浓度均超过第 1 批养殖. 孙玉焕等^[29]研究表明螺旋藻在硫酸铵浓度小于 0.4 g·L⁻¹(85 mg·L⁻¹)时,螺旋藻能够正常生长;

当硫酸铵添加量超过 $0.5\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ ($106\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) 时螺旋藻生长受到抑制. Converti 等^[30]在分批培养和连续流加培养中发现氨氮的最佳浓度为 $1.7\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ ($24\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$), 在 $10\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ ($140\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) 时对螺旋藻有明显的毒害.

为了确定本地藻种氨氮的耐受浓度和其余各批养殖中氨氮浓度是否是抑制螺旋藻生长的主要因素,在室内进行了氨氮耐受试验. 不同氨氮浓度下螺旋藻的生长曲线如图 4, 在氨氮浓度小于 $60\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,螺旋藻的生长无显著差异($P>0.05$),氨氮浓度超过 $100\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,随着氨氮浓度的增加抑制越明显. 因此,氨氮浓度小于 $60\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时本地藻种能够正常生长;本地藻种的氨氮耐受浓度为 $150\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,超过 $200\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时有毒害作用. 因此 3、4、5 批养殖中氨氮约在 $100\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,会抑制螺旋藻的生长.

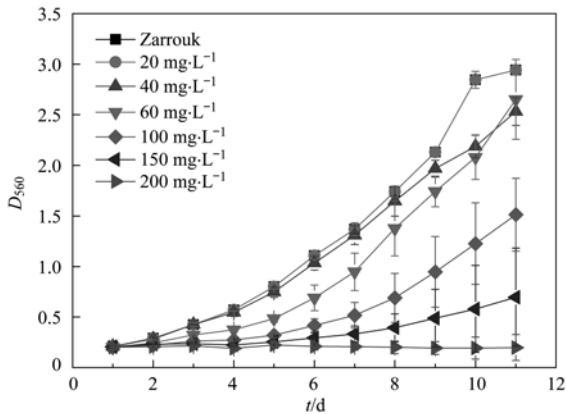


图 4 不同氨氮浓度下螺旋藻的生长曲线
Fig. 4 Growth curves of *S. platensis* under different ammonia nitrogen concentrations

除了 COD、氨氮抑制作用外,本试验中停滞期长、生长缓慢和虫灾,考虑还可能是与藻种的接种浓度与活性有关. 文献[30]表明,使用对数期的藻种并提高接种比例有利于缩短停滞期并提高产量,

第 2 批养殖中使用稳定期藻种,且接种比例小于 1:20,是导致其生长缓慢的主要因素. 稳定期藻种活性差,导致停滞期延长,接种浓度低会增加受污染的风险^[31]. 邹万生^[32]研究表明当接种比例为 1:5 时螺旋藻生长最快;在室外规模化螺旋藻养殖中,一般的接种比例大约在 1:3 ~ 1:5 之间^[33].

此外,本研究使用 Zarrouk 培养基进行育种,也就是说育种培养基与养殖池用的沼液培养基有明显的区别. 培养基的突然转换可能是造成养殖池中停滞期长的另外一个重要因素. 有研究表明^[34],当接入到新的培养基中时,微生物需要时间合成新的酶. 因此在今后的藻种培养时,采用逐步添加沼液的扩培方式来缩短螺旋藻的停滞期有可能是一种可行的方法.

2.4 病虫害的发生原因及控制方法

病虫害是影响本研究成功的最重要因素. 6 次试验中,发生了 4 次病虫害. 其中,第 1、3 批养殖中发现了水蚤(枝角类和桡足类)污染,第 5、6 批养殖则有血虫(摇蚊幼虫)暴发(图 5).

螺旋藻的露天纯培养过程中,最常见的病虫害来自轮虫、水蝇和杂藻^[35],来自水蚤和血虫污染也有报道^[36]. 本研究中发生的病虫害与轮虫等关系不大,主要来自水蚤和血虫. 这考虑是由沼液带来的虫卵. 养猪废水经中温发酵,不能完全杀死全部的虫卵;且沼液已经在沼液池里储存了较长时间,也可能有新的虫卵产生. Marcus 等^[37]研究表明桡足类的休眠卵具有极强的抗性,在严寒干燥环境中保存 20 个月,仍有 80% 的虫卵保持活性. 崔福义等^[38]认为摇蚊幼虫能在高浓度废水中生存且虫卵有较强的抗性. 养殖池中温度适宜,光照充足,易于虫卵的萌发,幼虫以螺旋藻为食能够快速繁殖.

大棚养殖能够减少来自养殖池周围环境中的污染,但本试验中的虫卵主要来自于沼液,因前处理过于简单不能去除其中的虫卵. 潘忠诚等^[39]研究表



枝角类 *Cladocera* 桡足类 *Copepoda* 摇蚊幼虫 *Chironomus larva*

图 5 养殖中虫害的照片
Fig. 5 Pictures of insects during *S. platensis* cultivation

明利用膜过滤对白斑综合症病毒有良好的截留作用,因此今后有必要使用膜对沼液进行过滤处理,去除沼液中的虫卵后再用于螺旋藻养殖。

3 结论

使用沼液在室外中试跑道池中培养螺旋藻,6批试验中有3批达到了采收浓度。螺旋藻产率接近既有文献报道的小试和中试产率,但是较使用同一藻种的前期室内跑道池小试结果明显降低。达到采收浓度的3批养殖中螺旋藻细胞对沼液中的氮磷有大量吸收,但受养殖条件和虫害影响,氮磷的转化效率还较低。本实试养殖虽然没能够长期稳定的运行,但获得了室外沼液养殖螺旋藻的宝贵经验,为规模化的沼液养殖奠定了基础。

参考文献:

- [1] 陈金娥. 螺旋藻的开发与应用[J]. 食品研究与开发, 2007, **28**(9): 154-157.
- [2] Holman B W B, Malau-Aduli A E O. Spirulina as a livestock supplement and animal feed[J]. Journal of Animal Physiology and Animal Nutrition, 2013, **97**(4): 615-623.
- [3] 袁晓雄, 杨淑培. 螺旋藻的养殖与加工[M]. 北京: 中国农业出版社, 1997. 34-35.
- [4] 夏旗. 钝顶螺旋藻对沼液的处理与利用[D]. 重庆: 西南大学, 2011. 3-4.
- [5] Cañizares R O, Domínguez A R. Growth of *Spirulina maxima* on swine waste[J]. Bioresource Technology, 1993, **45**(1): 73-75.
- [6] 李玉宝, 郑江, 黎中宝, 等. 利用沼液废液培养螺旋藻[J]. 安徽农业科学, 2011, **39**(22): 13668-13670.
- [7] Chung P, Pond W G, Kingsbury J M, et al. Production and nutritive value of *Arthrospira platensis*, a spiral blue-green alga grown on swine wastes[J]. Journal of Animal Science, 1978, **47**(2): 319-330.
- [8] 吴开国, 吴彤, 磨传真, 等. 应用沼液池废液培养钝顶螺旋藻的初步探讨[J]. 广西医学院学报, 1990, **7**(2): 11-17.
- [9] Chaiklahan R, Chirasuwan N, Siangdung W, et al. Cultivation of *Spirulina platensis* using pig wastewater in a semi-continuous process[J]. Journal of Microbiology and Biotechnology, 2010, **20**(3): 609-614.
- [10] Guo Q Q, Liu R, Luo J F, et al. Raceway pond tests for recycling nitrogen and phosphorus from digested piggery wastewater with a *S. platensis* [A]. In: Chinese Society for Environmental Sciences. Proceedings of the 3rd International Conference on Environmental Simulation and Pollution Control [C]. Beijing: State Key Joint Laboratory of Environmental Simulation and Pollution Control, 2013. 276-277.
- [11] Zarrouk C. Contribution a l'etude d'une cyanophycee. Influence de divers facteurs physiques et chimiques sur la croissance et la photosynthese de *Spirulina maxima* (Setch et Gardner) Geitl [D]. Paris: University of Paris, 1966.
- [12] 殷春涛, 胡鸿钧, 龚小敏, 等. 培养条件对钝顶螺旋藻(*Sp*) NS-90020 脂肪酸组成和含量的影响[J]. 武汉植物学研究, 1997, **15**(1): 59-65.
- [13] 于光, 马宇翔. 盐泽螺旋藻多糖的最佳获取条件[J]. 中国农学通报, 2010, **26**(23): 108-111.
- [14] 郑爱榕, 许伟斌, 蔡阿根, 等. 光合细菌和螺旋藻对黄泔水净化与利用初探[J]. 环境科学, 1999, **20**(4): 86-88.
- [15] 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.
- [16] Zhao X, Zhou Y, Huang S, et al. Characterization of microalgae-bacteria consortium cultured in landfill leachate for carbon fixation and lipid production[J]. Bioresource Technology, 2014, **156**: 322-328.
- [17] 商树田. 螺旋藻的培养、采收与保存[J]. 植物杂志, 1995, (6): 27-28.
- [18] Chang Y Y, Wu Z C, Bian L, et al. Cultivation of *Spirulina platensis* for biomass production and nutrient removal from synthetic human urine[J]. Applied Energy, 2013, **102**: 427-431.
- [19] Markou G, Georgakakis D. Cultivation of filamentous *Cyanobacteria* (blue-green algae) in agro-industrial wastes and wastewaters: A review[J]. Applied Energy, 2011, **88**(10): 3389-3401.
- [20] 刘晓江, 施心路, 齐桂兰, 等. 淡水藻类在监测水质和净化污水中的应用[J]. 生物学杂志, 2010, **27**(6): 76-78, 86.
- [21] 胡鸿钧, 郑怡, 陈启发. 螺旋藻-养殖原理·技术·应用[M]. 北京: 中国农业出版社, 2002. 11-13.
- [22] 冯道伦, 程远杰. 用螺旋藻吸收去除尿液中氮、磷和有机物[J]. 上海海事大学学报, 2008, **29**(4): 76-79.
- [23] Mezzomo N, Saggiorato A G, Siebert R, et al. Cultivation of microalgae *Spirulina platensis* (*Arthrospira platensis*) from biological treatment of swine wastewater[J]. Food Science and Technology (Campinas), 2010, **30**(1): 173-178.
- [24] Durán U, Val del Río A, Campos J L, et al. Enhanced ammonia removal at room temperature by pH controlled partial nitrification and subsequent anaerobic ammonium oxidation [J]. Environmental Technology, 2014, **35**(4): 383-390.
- [25] Vohla C, Kõiv M, Bavor H J, et al. Filter materials for phosphorus removal from wastewater in treatment wetlands—a review [J]. Ecological Engineering, 2011, **37**(1): 70-89.
- [26] 黄文, 何开岩, 钟水库, 等. 加 V 形导流槽的跑道式藻池 CFD 模拟[J]. 化工进展, 2013, **32**(8): 1759-1770.
- [27] 李博. 味精发酵废水培养螺旋藻可行性的研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2005. 6-7.
- [28] Yuan X, Kumar A, Sahu A K, et al. Impact of ammonia concentration on *Spirulina platensis* growth in an airlift photobioreactor [J]. Bioresource Technology, 2011, **102**(3): 3234-3239.
- [29] 孙玉焕, 吴友浩, 杨志海. 初始氨氮浓度对钝顶螺旋藻生长及其去除率的影响[J]. 环境保护科学, 2012, **38**(4): 33-36.

- [30] Converti A, Scapazzoni S, Lodi A, *et al.* Ammonium and urea removal by *Spirulina platensis* [J]. *Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology*, 2006, **33**(1): 8-16.
- [31] 焦改志. 单胞藻培养过程中接种和添加培养液应注意的几个问题[J]. *海洋科学*, 1993, **11**(6): 15.
- [32] 邹万生. 钝顶螺旋藻去废水中氨氮使用液培养条件研究[J]. *科技信息*, 2010, (9): 33-34.
- [33] 温永煌, 陈丽芬, 范业成, 等. 螺旋藻大面积生产试验研究初报[J]. *江西农业科技*, 1987, (S1): 48-52.
- [34] 杨文博, 刘方, 李明春. 微生物生物学[M]. 北京: 科学出版社, 2001. 187-192.
- [35] 封涛, 董育红, 张振兰. 螺旋藻养殖过程中生物污染的发生与防治[J]. *水利渔业*, 2003, **23**(5): 50-51.
- [36] 徐宝琪, 宁运旺, 黄怀成. 螺旋藻养殖中几个问题的探讨[J]. *耕作与栽培*, 2000, (1): 41-42.
- [37] Marcus N H, Murray M. Copepod diapause eggs: a potential source of nauplii for aquaculture [J]. *Aquaculture*, 2001, **201**(1-2): 107-115.
- [38] 崔福义, 安东, 孙兴滨, 等. 水体中摇蚊幼虫的孳生规律及其控制途径[J]. *环境污染治理技术与设备*, 2004, **5**(7): 1-4.
- [39] 潘忠诚, 赵方波, 何建国, 等. 膜生物反应器对白斑综合症病毒的去毒研究[J]. *环境科学*, 2008, **29**(3): 650-654.

《环境科学》再获“百种中国杰出学术期刊”称号

2013年9月27日,中国科技论文统计结果发布会在北京举行,会议公布了“百种中国杰出学术期刊”获奖名单.《环境科学》连续12次荣获“百种中国杰出学术期刊”称号.“百种中国杰出学术期刊”是根据中国科技学术期刊综合评价指标体系进行评定.该体系利用总被引频次、影响因子、基金论文比、他引总引比等多个文献计量学指标进行统计分析,对期刊分学科进行评比,其评价结果客观公正,为我国科技界公认,并具有广泛影响.

CONTENTS

Comparative Analysis Methods of Haze Distinction over Yangtze River Delta Region	LIU Xiao-hui, ZHU Bin, GAO Jin-hui, <i>et al.</i>	(3239)
Trends of Urban Haze in Jiangsu Province China over the Past 33 Years	LIU Duan-yang, WEI Jian-su, YAN Wen-lian, <i>et al.</i>	(3247)
Temporal Variation of Background Atmospheric CO ₂ and CH ₄ at Mount Waliguan, China	LIU Peng, ZHANG Guo-qing, WANG Jian-qiong, <i>et al.</i>	(3256)
Characteristics and Sources of Organic Carbon and Elemental Carbon in PM _{2.5} in Shanghai Urban Area	ZHANG Yi-hua, WANG Dong-fang, ZHAO Qian-biao, <i>et al.</i>	(3263)
Size Distribution and Characterization of OC and EC in Atmospheric Aerosols During the Asian Youth Games of Nanjing, China	WANG Hong-lei, ZHU Bin, AN Jun-lin, <i>et al.</i>	(3271)
Pollution Characteristics of Carbonaceous Aerosols in PM _{2.5} During Typical Winter Days in Wuxi City	YUN Long-long, LU Fan, ZHANG Tian-shu, <i>et al.</i>	(3280)
Emission Characteristics of PM _{2.5} from Blast Furnace Iron Making	FAN Zhen-zhen, ZHAO Ya-li, ZHAO Hao-ning, <i>et al.</i>	(3287)
Composition Characteristics of Atmospheric Volatile Organic Compounds in the Urban Area of Beibei District, Chongqing	QI Xin, HAO Qing-ju, JI Dong-sheng, <i>et al.</i>	(3293)
Catalytic Oxidation of Two-component VOCs and Kinetic Analysis	BO Long-li, YANG Li, SUN Jian-yu, <i>et al.</i>	(3302)
Ultrafine Particle Number Concentration and Size Distribution of Vehicle Exhaust Ultrafine Particles	LU Ye-qiang, CHEN Qiu-fang, SUN Zai, <i>et al.</i>	(3309)
Major Ion Chemistry of Surface Water in the Upper Reach of Shule River Basin and the Possible Controls	ZHOU Jia-xin, DING Yong-jian, ZENG Guo-xiong, <i>et al.</i>	(3315)
Sediment-water Flux and Processes of Nutrients and Gaseous Nitrogen Release in a China River Reservoir	CHEN Zhu-hong, CHEN Neng-wang, WU Yin-qi, <i>et al.</i>	(3325)
Spatial Distribution and Pollution Assessment of Heavy Metals in the Tidal Reach and Its Adjacent Sea Estuary of Daliaohe Area, China	ZHANG Lei, QIN Yan-wen, MA Ying-qun, <i>et al.</i>	(3336)
Chemical Speciation and Risk Assessment of Heavy Metals in the Middle Part of Yarlung Zangbo Surface Sediments	BAI Jian-kun, LI Chao-liu, KANG Shi-chang, <i>et al.</i>	(3346)
Analysis of Particle Size Characteristics of Road Sediments in Beijing Olympic Park	LI Hai-yan, SHI An-bang, QU Yang-sheng, <i>et al.</i>	(3352)
Levels and Distribution of the Dioxin-Like Polychlorinated Biphenyls (PCBs) in the Surface Sediment of the Yellow River	LI Guang-yao, JIN Jun, HE Chang, <i>et al.</i>	(3358)
Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Retention in Two Different Channel Forms in a Typical Headwater Stream in the Suburb of Hefei City, China	LI Ru-zhong, YANG Ji-wei, QIAN Jing, <i>et al.</i>	(3365)
Migration and Transformation of Nitrogen in Urban Stream Located in Plain River-net Area Based on Water Resources Regulation	LIU Bo, SHENG Ming, ZHU Qiang, <i>et al.</i>	(3373)
Decomposition and Phosphorus Dynamics of the Litters in Standing and Litterbag of the Hangzhou Bay Coastal Wetland	SHAO Xue-xin, LIANG Xin-qiang, WU Ming, <i>et al.</i>	(3381)
Muti-model Collaborative Retrieval of Chlorophyll a in Taihu Lake Based on Data Assimilation	LI Yuan, LI Yun-mei, LÜ Heng, <i>et al.</i>	(3389)
Photobleaching of Dissolved Organic Matter (DOM) from Confluence of Two Rivers Under Natural Solar Radiation; A Case Study of Fujiang River-Jialingjiang River	GAO Jie, JIANG Tao, YAN Jin-long, <i>et al.</i>	(3397)
Using Ultraviolet-Visible (UV-Vis) Absorption Spectrum to Estimate the Dissolved Organic Matter (DOM) Concentration in Water, Soils and Sediments of Typical Water-Level Fluctuation Zones of the Three Gorges Reservoir Areas	LI Lu-lu, JIANG Tao, LU Song, <i>et al.</i>	(3408)
Synthesis of Cu ₂ O-Ag-AgBr/MA Visible Photocatalyst and Its Performance in Degradation of 2-Chlorophenol	WANG Ran, ZHOU Xue-feng, HU Xue-xiang, <i>et al.</i>	(3417)
Effects of Particle Size of Zero-Valent Iron on the Reactivity of Activating Persulfate and Kinetics for the Degradation of Acid Orange 7	LI Huan-xuan, WAN Jin-quan, MA Yong-wen, <i>et al.</i>	(3422)
Degradation of 2,4-D by Combined Catalytic Dechlorination and Biological Oxidation	ZHOU Hong-yi, ZENG Si-si, LIANG Si, <i>et al.</i>	(3430)
Treatment of Marine-Aquaculture Effluent by the Multi-Soil-Layer (MSL) System and Subsurface Flow Constructed Wetland	SONG Ying, HUANG Yu-ting, GE Chuan, <i>et al.</i>	(3436)
Variation of Different Carbon Sources in the Sewage Treatment Process	JIN Peng-kang, CHANG Jin, WANG Xian-bao, <i>et al.</i>	(3443)
Effect of Gas-lift Device on Nitrogen Removal Efficiency of ANAMMOX Reactor	LI Xiang, ZHANG Da-lin, HUANG Yong, <i>et al.</i>	(3449)
Enhancement for Anaerobic Digestion of Sewage Sludge Pretreated by Microwave and Its Combined Processes	LIU Ji-bao, NI Xiao-tang, WEI Yuan-song, <i>et al.</i>	(3455)
Pilot Study of Thermal Treatment/Thermophilic Anaerobic Digestion Process Treating Waste Activated Sludge of High Solid Content	WU Jing, WANG Guang-qi, CAO Zhi-ping, <i>et al.</i>	(3461)
Effects of Temperature on Combined Process of ABR and MBR for Domestic Sewage Treatment and Analysis of Microbial Community	WU Peng, LU Shuang-jun, XU Yue-zhong, <i>et al.</i>	(3466)
Microbial Community of Municipal Discharges in A Sewage Treatment Plant	XU Ai-ling, REN Jie, SONG Zhi-wen, <i>et al.</i>	(3473)
Pilot-Scale Cultivation of <i>Spirulina plantensis</i> with Digested Piggery Wastewater	GUO Qing-qing, LIU Rui, LUO Jin-fei, <i>et al.</i>	(3480)
Spectral Characteristics of Soluble Metabolites During Endogenous Respiration	LI Zhi-hua, ZHANG Qin, BAI Xu-li, <i>et al.</i>	(3487)
Endogenous Respiration Process Analysis of Heterotrophic Biomass and Autotrophic Biomass Based on Respiration Map	LI Zhi-hua, BAI Xu-li, ZHANG Qin, <i>et al.</i>	(3492)
Influence of S-Metolachlor and Cd ²⁺ on Photosynthesis of <i>Scenedesmus obliquus</i>	CHEN Cai-dong, HU Xiao-na, ZHANG Xiao-qiang, <i>et al.</i>	(3498)
Effect of Environmental Factors on Fish Community Structure in the Huntai River Basin at Multiple Scales	LI Yan-li, LI Yan-fen, XU Zong-xue, <i>et al.</i>	(3504)
Succession of Rotifer Community and Its Relationship with Environmental Factors in a New Estuarial Landscape River, Shanghai	MA Wen-hua, ZHANG Wei, GU Wan-wen, <i>et al.</i>	(3513)
Anaerobic Reduction of Humus/Fe(III) and Electron Transport Mechanism of <i>Fontibacter</i> sp. SgZ-2	MA Chen, YANG Gui-qin, LU Qin, <i>et al.</i>	(3522)
Source Apportionment of Soil Heavy Metals in Jiapigou Goldmine Based on the UNMIX Model	AI Jian-chao, WANG Ning, YANG Jing, <i>et al.</i>	(3530)
Environmental Magnetic Properties and Their Spatial Variability of Topsoil in Shihezi City	YANG Han, XIONG Hei-gang, CHEN Xue-gang, <i>et al.</i>	(3537)
Effects of Different Amounts of Phosphate Fertilizers on Copper, Zinc Transfer in Red Soil Under the Application of KH ₂ PO ₄	GUO Liang, LI Zhong-wu, HUANG Bin, <i>et al.</i>	(3546)
Influence of Sulfur on the Bioavailability of Arsenic Uptake by Rice (<i>Oryza sativa</i> L.) and Its Speciation in Soil	YANG Shi-jie, TANG Bing-pei, WANG Dai-chang, <i>et al.</i>	(3553)
Effects of Sulfur on Transformation of Selenium in Soil and Uptake of Selenium in Rape	LIU Xin-wei, DUAN Bi-hui, XIA Quan-jie, <i>et al.</i>	(3564)
Impact of Reclaimed Water Irrigation on Soil Chemical Properties and Culturable Microorganisms	GONG Xue, WANG Ji-hua, GUAN Jian-fei, <i>et al.</i>	(3572)
Influence of Different Slope Position and Profile in <i>Disporopsis pernyi</i> Forest Land on Soil Microbial Biomass and Enzyme Activity in Southwest Karst Mountain of China	QIN Hua-Jun, HE Bing-Hui, ZHAO Xuan-chi, <i>et al.</i>	(3580)
Effects of Different Soil Types on the Foliar δ ¹³ C Values of Common Local Plant Species in Karst Rocky Desertification Area in Central Guizhou Province	DU Xue-lian, WANG Shi-jie, LUO Xu-qiang, <i>et al.</i>	(3587)
Effect of Carbon Substrate Concentration on N ₂ , N ₂ O, NO, CO ₂ and CH ₄ Emissions from a Paddy Soil in Anaerobic Condition	CHEN Nuo, LIAO Ting-ting, WANG Rui, <i>et al.</i>	(3595)
Ability of Typical Greenery Shrubs of Beijing to Adsorb and Arrest PM _{2.5}	LIANG Dan, WANG Bin, WANG Yun-qi, <i>et al.</i>	(3605)
Effects of Chlorides on Cd Transformation in a Simulated Grate Incinerator During Sludge Incineration Process	LIU Jing-yong, ZHUO Zhong-xu, SUN Shui-yu, <i>et al.</i>	(3612)
Spatial Temporal Differentiation of Product-based and Consumption-based CO ₂ Emissions and Balance in the Beijing-Tianjin-Hebei Region: an Economic Input-Output Analysis	WANG Hao, CHEN Cao-cao, PAN Tao, <i>et al.</i>	(3619)
Study on Feasible Emission Control Level of Air Pollutions for Cement Industry	REN Chun, JIANG Mei, ZOU Lan, <i>et al.</i>	(3632)

《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9月15日 第35卷 第9期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 9 Sep. 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

国内外公开发行人