

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第7期

Vol.38 No.7

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

基于船载走航气溶胶质谱技术的海洋气溶胶研究	颜金培, 陈立奇, 林奇, 赵淑惠, 李磊, 朱大勇 (2629)
利用 MODIS C6 数据分析中国西北地区气溶胶光学厚度时空变化特征	赵仕伟, 高晓清 (2637)
秋冬季节华北背景地区 PM ₁ 污染特征及来源	张周祥, 张养梅, 张小曳, 王亚强, 沈小静, 孙俊英, 周怀刚 (2647)
杭州市 PM _{2.5} 中水溶性离子的污染特征及其消光贡献	吴丹, 蔺少龙, 杨焕强, 杜荣光, 夏俊荣, 齐冰, 刘刚, 李凤英, 杨孟, 盖鑫磊 (2656)
青岛不同强度霾天气溶胶中二次无机离子的生成及粒径分布	谢丹丹, 祁建华, 张瑞峰 (2667)
西安市重污染与清洁天 PM _{2.5} 组分及其活性氧物质对比	王堃, 韩永明, 何世恒, 张婷, 刘随心, 曹军骥 (2679)
黄山 PM ₁₀ 中二元羧酸类化合物的季节变化特征及其来源	孟静静, 侯战方, 张二勋, 董杰, 刘晓迪, 邢继钊, 刘加珍 (2688)
泉州市大气 PM _{2.5} 铜系元素组成特征及来源解析	张云峰, 于瑞莲, 胡恭任, 孙境蔚, 许文质, 张棕巍 (2698)
西北石化区周围毒害类空气污染物污染特征及健康风险评价	许亚宣, 李小敏, 于华通, 董林艳, 赵玉婷, 姚懿函, 邹广迅, 张新民 (2707)
G20 峰会期间宜兴市大气 VOCs 特征及来源分析	张璘, 张祥志, 秦玮, 茅晶晶, 秦艳红, 谢卫平, 史文科, 陈文泰 (2718)
四川省 2005 ~ 2014 年农业源氨排放清单及分布特征	冯小琼, 陈军辉, 姜涛, 钱骏, 叶宏 (2728)
长三角地区典型城市非道路移动机械大气污染物排放清单	鲁君, 黄成, 胡馨遥, 杨强, 井宝莉, 夏阳, 卢滨, 唐伟, 楼晨荣, 陶士康, 李莉 (2738)
我国城市饮用水中 N-亚硝基二甲胺的健康风险评估及水质标准制定	张秋秋, 潘申龄, 张昱, 杨敏, 安伟 (2747)
地下水污染风险评价中污染源荷载量化方法的对比分析	赵鹏, 何江涛, 王曼丽, 崔亚丰 (2754)
胶州湾表层海水中的正构烷烃及其来源解析	张倩, 宋金明, 彭全材, 李学刚, 袁华茂, 李宁, 段雨琴, 曲宝晓, 王启栋 (2763)
桂江流域夏季水-气界面 CO ₂ 脱气的空间变化及其影响因素	张陶, 李建鸿, 蒲俊兵, 吴飞红, 李丽, 袁道先 (2773)
都柳江水系沉积物锑等重金属空间分布特征及生态风险	宁增平, 肖青相, 蓝小龙, 刘意章, 肖唐付, 赵彦龙, 吴世良 (2784)
太湖表层水体及沉积物中双酚 A 类似物的分布特征及潜在风险	陈政宏, 郭敏, 徐怀洲, 刘丹, 程杰, 李江, 张圣虎, 石利利 (2793)
洱海沉积物水提取态有机氮特征及与其他来源溶解性有机氮的差异	李文章, 张莉, 王圣瑞, 肖尚斌, 钱伟斌, 席银, 许可宸, 史玲珑 (2801)
阿哈水库沉积物-水界面磷、铁、硫高分辨率空间分布特征	孙清清, 陈敬安, 王敬富, 杨海全, 计永雪, 兰晨, 王箫 (2810)
北京市水环境中精神活性物质污染特征	张艳, 张婷婷, 陈卫平, 郭昌胜, 花镇东, 张远, 徐建 (2819)
降雨特征及污染物赋存类型对路面径流污染排放的影响	陈莹, 王昭, 吴亚刚, 赵剑强, 杨文娟 (2828)
CaO ₂ 不同投加方式对黑臭河道底泥内源磷释放抑制作用	徐焱, 李大鹏, 韩菲尔, 宋小君, 李鑫, 周婧, 黄勇 (2836)
坡耕地薄层紫色土-岩石系统中氮磷的迁移特征	鲜青松, 唐翔宇, 朱波 (2843)
微生物强化组合浮床净化微盐碱水体的效果	陈友媛, 吴亚东, 孙萍, 吴丹 (2850)
氧化镁基生物炭高效去除水体中磷的特性	王彬斌, 林景东, 万顺利, 何锋 (2859)
Pd/Fe ⁰ 双金属复合催化纤维降解水中痕量亚硝基二甲胺	张环, 傅敏, 魏俊富, 王一冰, 安慧颖, 沈书怡 (2868)
针铁矿、磁铁矿和石膏对 2,4-二氯苯酚厌氧降解的影响	孔殿超, 周跃飞, 陈天虎, 王进, 李碧 (2875)
污水再生过程中消毒副产物前体物转化规律	韩慧慧, 缪恒峰, 张雅晶, 陆敏峰, 黄振兴, 阮文权 (2883)
微生物燃料电池改性阳极处理 PTA 废水	孙靖云, 范梦婕, 陈英文, 祝社民, 沈树宝 (2893)
水稻秸秆浸泡液对蓝藻和绿藻生长选择性抑制作用	苏文, 陈洁, 张胜鹏, 孔繁翔 (2901)
沼液 SBR 处理出水养殖螺旋藻	蔡小波, 郁强强, 刘锐, 赵远, 陈吕军 (2910)
K ⁺ 强化高盐环境下厌氧氨氧化脱氮效能	吴国栋, 于德爽, 李津, 周同, 王晓静 (2917)
包埋氨氧化细菌短程硝化的高效稳定运行	于濛雨, 刘毅, 田玉斌, 石欢, 徐富, 杨宏 (2925)
ANAMMOX 的快速启动及 EPS 在 ANAMMOX 颗粒污泥中的空间分布	李惠娟, 彭聪聪, 陈国燕, 姚倩, 卓杨, 王彬斌 (2931)
厌氧氨氧化污泥中氨氧化的潜在电子受体	李祥, 林兴, 王凡, 袁砚, 黄勇, 袁怡, 毕贞, 刘忻, 杨朋兵 (2941)
基于厌氧氨氧化的含氨废气原位处理	林兴, 王凡, 袁砚, 李祥, 黄勇, 袁澄伟 (2947)
基于污泥资源化利用的粗放型绿色屋顶生长基质的组成	沈庆然, 李田, 曹熠, 潘奥 (2953)
罗红霉素短期冲击对活性污泥中氨氧化微生物丰度和多样性的影响	高景峰, 孙丽欣, 樊晓燕, 潘凯玲, 李定昌 (2961)
不同盐度下活性污泥中微生物群落变化规律及其处理模拟染料废水	周贵忠, 许硕, 姚倩, 银钗 (2972)
CO ₂ -咸水-砂岩相互作用过程中微生物群落结构动态变化特征	王博强, 李晨阳, 卢伟, 樊昊, 张冬至, 汪治, 吕聪, 沈福东 (2978)
油菜/玉米轮作农田土壤呼吸和异养呼吸对秸秆与生物炭还田的响应	田冬, 高明, 黄容, 吕盛, 徐畅 (2988)
模拟气候升温对湿地土壤微生物群落及磷素形态的影响	腾昌运, 沈建国, 王忠, 王行, 李鸿毅, 张志剑 (3000)
秦岭红桦林土壤细菌群落剖面分布特征及其影响因素	杜璨, 许晨阳, 王强, 张帆, 马武功, 和文祥, 侯琳, 耿增超 (3010)
微生物对汞矿区农田土壤汞甲基化的影响	贾钦, 朱雪梅, 王琪, 傅海辉, 郝亚琼, 何洁, 杨子良 (3020)
施用海泡石对铅、镉在土壤-水稻系统中迁移与再分配的影响	方至萍, 廖敏, 张楠, 吕婷, 黄小斌 (3028)
BS + CTMAB 复配修饰在黄棕壤吸附苯酚上的应用	刘伟, 孟昭福, 任爽, 李文斌 (3036)
1999 年与 2014 年贡嘎山峨眉冷杉枝和叶中常见重金属的生物富集特征对比	李芬, 王训, 罗辑, 袁巍, 喻子恒, 商立海 (3045)
铅锌尾矿污染区 3 种菊科植物体内重金属的亚细胞分布和化学形态特征	朱光旭, 肖化云, 郭庆军, 张忠义, 杨曦, 孔静 (3054)
膨润土调质对污泥堆肥的脱毒及重金属钝化和雌酮消除作用	周莉娜, 蔡函臻, 李荣华, 王美净, 赵军超, 王权, 张增强 (3061)
餐厨垃圾与秸秆混合中温和高温厌氧消化对比	郭香麟, 左剑恶, 史绪川, 王凯军, 李静 (3070)
我国村镇生活垃圾可燃组分基本特征及其时空差异	晏卓逸, 岳波, 高红, 李志龙, 黄启飞, 聂小琴, 汪群慧 (3078)
甲烷催化还原 NO _x 中 Co 基/分子筛催化剂的助剂和载体优化	潘华, 建艳飞, 陈宁娜, 刘红霞, 何焱, 贺亚飞 (3085)
《环境科学》征稿简则 (2737) 《环境科学》征订启事 (2809) 信息 (2867, 2971, 3027)	

沼液 SBR 处理出水养殖螺旋藻

蔡小波^{1,2}, 郁强强², 刘锐^{2*}, 赵远¹, 陈吕军^{2,3}

(1. 常州大学环境与安全工程学院, 常州 213164; 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)

摘要: 养猪沼液氮磷等营养物质丰富, 可作为廉价的螺旋藻培养基, 但其成分复杂, 尤其是高氨氮等因素严重抑制螺旋藻的生长. 采用序批式生物反应器 (sequencing batch reactor, SBR) 降低沼液中的氨氮浓度, 通过改变进水中化学需氧量 (chemical oxygen demand, COD) 与总氮 (total nitrogen, TN) 的比值, 研究了沼液中的亚硝态氮及硝态氮的保留情况, 为螺旋藻生长提供氮源. 通过对比螺旋藻在不同工况出水中的生长情况, 以及氮元素的保留情况, 筛选出最佳 SBR 工况. 摇瓶试验结果表明, 当进水 COD/TN = 3.0, 出水中氨氮、硝态氮、亚硝态氮浓度分别为 51.2、91.6、213.1 mg·L⁻¹, 此时螺旋藻具有较快生长速率, 产率达到 0.084 g·(L·d)⁻¹. 在此基础之上, 通过放大螺旋藻培养规模至 120L, 研究了螺旋藻在室外大棚中的生长情况及螺旋藻对沼液中氮、磷元素的去除, 结果表明螺旋藻在室外依然生长良好, 培养 10 d 后, 产率为 (0.075 ± 0.003) g·(L·d)⁻¹, 螺旋藻蛋白含量达到 60% 左右, 养殖出水中氨氮去除率达到 99%.

关键词: 养猪沼液; 螺旋藻; SBR; 循环利用; 氨氮

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)07-2910-07 DOI: 10.13227/j.hjxx.201612168

Cultivation of *Spirulina platensis* in Digested Piggery Wastewater Pretreated by SBR with Operating Conditions Optimization

CAI Xiao-bo^{1,2}, YU Qiang-qiang², LIU Rui^{2*}, ZHAO Yuan¹, CHEN Lü-jun^{2,3}

(1. College of Environment & Safety Engineering, Changzhou University, Changzhou 213164, China; 2. Zhejiang Provincial Key Laboratory of Water Science and Technology, Department of Ecological Environment, Yangtze Delta Region Institute of Tsinghua University, Jiaxing 314006, China; 3. School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Digested piggery wastewater (DPW) contains high concentrations of nitrogen and phosphorus which could be used as a cost-effective culture medium for *Spirulina platensis*. However, *Spirulina platensis* would be limited by many factors in the complex composition of DPW, especially the high concentration of ammonium. In this paper, a traditional sequencing batch reactor (SBR) was used to remove these inhibitors in DPW. The retention of nitrate and nitrite in the effluent, which was used as nitrogen source for cultivating *Spirulina platensis*, was studied at different ratios of chemical oxygen demand (COD) to total nitrogen (TN) in the influent. By comparing the growth of *Spirulina platensis* in the related effluents, the operation condition of SBR was optimized. The lab-scale cultivation results showed that *Spirulina platensis* possessed a high biomass yield of 0.084 g·(L·d)⁻¹ in the effluent when the COD/TN ratio of SBR influent was 3.0. In particular, the concentrations of ammonium, nitrate and nitrite in the effluent were 51.2 mg·L⁻¹, 91.6 mg·L⁻¹ and 213.1 mg·L⁻¹, respectively. Furthermore, the aforementioned effluent was also used to culture *Spirulina platensis* in a 120 L outdoor raceway pond, and the growth rate of *Spirulina platensis* reached (0.075 ± 0.003) g·(L·d)⁻¹ after 10-day culture. The protein content of *Spirulina platensis* was approximately 60% and the removal efficiency of ammonium was 99%. This study provides an alternative method for the utilization of DPW.

Key words: digested piggery wastewater (DPW); *Spirulina platensis*; sequencing batch reactor (SBR); recycle; ammonium

我国规模化养猪产业不断发展, 由此产生大量且集中的粪尿和废水难以完全自然消纳, 对周边环境与人体健康造成威胁^[1]. 虽然我国规模化养猪场绝大多数配备了沼气池对养猪废水进行厌氧处理, 但是养猪沼液中仍然存在大量的有机物和氮、磷等营养元素. 目前已有不少针对沼液的处理技术与装置, 例如移动床生物膜反应器 (moving bed biofilm reactor, MBBR)^[2]、膜生物反应器 (membrane bioreactor, MBR)^[3]、微滤 (microfiltration, MF) 和超滤 (ultrafiltration, UF) 膜组件^[4]、序批式反应器

(sequencing batch reactor, SBR)^[5] 处理猪场厌氧消化液. 但是普遍存在高成本、高耗能、占地大等问题^[6], 实际利用效果并不理想. 近年来, 微藻类生物在卫生保健、动物饲料、农业种植等方面得到广泛应用^[7]. 微藻不仅能利用沼液中的氮、磷等营养元素, 而且具有培养周期短、光合效率高、占地面积

收稿日期: 2016-12-19; 修订日期: 2017-01-20

基金项目: 浙江省重大科技专项重点社会发展项目 (2014C03022); 江苏重点研发项目 (BE2015670)

作者简介: 蔡小波 (1991 ~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为水污染防治, E-mail: 664700919@qq.com

* 通信作者, E-mail: liuruitsinghua@163.com

小、不与人争粮、不与粮争地的优势^[8]. 螺旋藻(*Spirulina*)属于微藻类生物,富含氨基酸、维生素、蛋白质和生物活性类物质^[9],对提高生物体免疫力、防治多种疾病有显著辅助作用.

和许多光合微生物不同,螺旋藻具有一定的氨氮耐受和利用能力^[10]. 然而,螺旋藻对氨氮浓度仍较敏感,国青青^[11]发现在氨氮浓度小于 60 mg·L⁻¹时,螺旋藻的生长不会受到抑制,氨氮浓度超过 100 mg·L⁻¹时,随着氨氮浓度的增加抑制越明显. 目前,对于高氨氮沼液养殖螺旋藻的主要处理方式是稀释^[1],但是会消耗大量的净水,与污水处理和资源的再生利用相违背,难以运用到实际生产中.

SBR 是养猪沼液的常用生物处理技术之一,具有工艺简单、运行方式灵活、自动化程度高等优点. 许多研究表明 SBR 对养猪沼液的脱氮效果不够理想^[5, 12, 13],但这恰恰可以为螺旋藻的生长保留足

够氮源. 本研究利用 SBR 工艺降低养猪沼液中氨氮的浓度,通过调控进水化学需氧量(COD)与总氮(TN)的比值(COD/TN),将水中氨氮转为对螺旋藻生长抑制较小的硝态氮和亚硝态氮^[14],同时改善其他水质参数(浊度等),从而优化螺旋藻在沼液中的生存环境,提高产率,实现养猪沼液的资源化利用. 通过对比螺旋藻在不同工况出水中的生长速率得到一组较优的 SBR 运行参数. 同时结合现场 120 L 跑道池培养,研究了螺旋藻在实际场地生长速率和对养藻用水中营养元素的利用情况.

1 材料与方法

1.1 养猪沼液

养猪沼液来自于嘉兴市南湖区某规模化养猪场,日排放废水约 20 t. 废水经沼气池厌氧发酵后形成沼液,沼液水质如表 1 所示,采集后置于 10 ~ 15℃ 环境下保存.

表 1 养猪沼液水质/mg·L⁻¹
Table 1 Water quality of DPW/mg·L⁻¹

COD	TN	NH ₄ ⁺ -N	NO ₂ ⁻ -N	NO ₃ ⁻ -N	TP	pH	碱度 (以 CaCO ₃ 计)
1 544.8 ± 108.7	975.6 ± 119.2	758.0 ± 121.3	≤ 1	≤ 20	44.2 ± 3.8	7.5 ~ 8.2	4 000 ~ 6 000

1.2 试验装置及运行条件

SBR 反应器有效容积 10 L(φ 20 cm × H 45 cm),装置结构参考宋小燕^[15]等 IASBR 装置,如图 1 所示. 反应器由进出水蠕动泵、曝气泵、螺旋桨组成. 系统的进水、搅拌、曝气、出水均由时间控制器自动控制,人工进行排泥. 系统的运行周期为 8 h,其运行模式为:进水 10 min → 搅拌 160 min,曝气 240 min → 静置 60 min → 出水 10 min. 缺氧阶段通过螺旋桨搅拌混合液,使其 DO 小于 0.2 mg·L⁻¹. 好氧阶段采用曝气泵、曝气盘进行微孔曝气,通过转子流量计控制曝气量使混合液 DO 在 2 mg·L⁻¹. 非控温运行,整个试验过程水温为 25 ~ 32℃.

该反应器此前已稳定处理养猪沼液愈 200 d^[13],进水 COD/TN 为 3.0 ± 0.2. 本试验持续运行 135 d,通过向进水(养猪沼液)中投加乙酸钠来调控 COD/TN,从而调节反硝化作用,达到既去除氨氮、又保留硝态氮和亚硝态氮的目的. 以此分为 3 个工况,如表 2 所示.

1.3 螺旋藻的来源及培养方法

钝顶螺旋藻采集于嘉兴某生态塘,在光照恒温培养箱中经稀释沼液驯化一个月筛选得到 SP18.

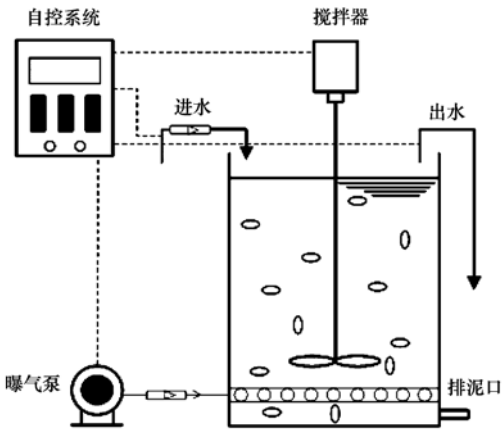


图 1 SBR 装置结构示意图
Fig. 1 Schematic diagram of SBR

培养箱试验环境为:温度 28℃ ± 2℃、光照度 6 000 lx ± 2 000 lx、光暗比(12 h: 12 h).

螺旋藻养殖规模分为 2 种:100 mL、120 L. 其中 100 mL 方法如下:养藻用水经 100 目滤布过滤,去除水中杂质. 由于养藻用水中无机碳含量较低,无法满足螺旋藻生长,因此按照 Zarrouk^[16]培养基补充 NaHCO₃ 16.8 g·L⁻¹,补充适量 K₂HPO₄,使各组别中 P 元素均达到 Zarrouk 水平. 将 100 mL 上述

5 种养藻用水装入 250 mL 玻璃锥形瓶,接入藻种,使其初始 D_{560} 在 0.2 ~ 0.3,置于光照恒温培养箱中,每组 3 个平行样,培养条件同驯化筛选时培养箱试验环境. 每天手动摇匀 2 次,并测定 D_{560} ,连续培养 10 d. 120 L 方法如下:椭圆形跑道池长 2 m,宽 0.4 m,水深 0.15 m,单叶轮慢速连续搅拌,置于室外大棚中,如图 2 所示. 大棚试验环境为:温度 $32^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$ 、自然光光照度 $30\,000\text{ lx} \pm 20\,000\text{ lx}$.

表 2 SBR 运行条件

Table 2 Experimental design and operational conditions of SBR

项目	工况 1	工况 2	工况 3
运行天数/d	5 ~ 46	47 ~ 94	95 ~ 135
HRT/d	3	3	3
进水 COD/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	$1\,613 \pm 102$	$1\,459 \pm 72$	$1\,535 \pm 65$
进水 TN/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	906 ± 76	$1\,093 \pm 35$	$1\,041 \pm 30$
进水 COD/TN	2.26 ± 0.19	2.41 ± 0.11	3.00 ± 0.05
进水氨氮/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	659 ± 49	846 ± 63	832 ± 32
氨氮容积负荷/ $\text{kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$	0.20 ± 0.01	0.28 ± 0.02	0.28 ± 0.01
氨氮污泥负荷/ $\text{kg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$	0.037 ± 0.003	0.045 ± 0.002	0.038 ± 0.001



图 2 跑道池装置

Fig. 2 Picture of the raceway pond

1.4 测定方法

COD、氨氮、亚硝态氮、硝态氮、TN、TP、碱度的分析依据标准方法^[17]. MLSS 依据重量法测定. 总有机碳 (TOC) 采用 TOC 仪 (SHIMADZU CORPORATION, TOC-V_{CSN}) 测定. pH、DO 采用便携式仪器 (DKK-TOA CORPORATION, HM-30P、DO-31P) 测定. 另外,亚硝态氮积累率 (NAR) 用公式 (1) 计算^[18]. 游离氨 (FA) 的质量浓度采用公式 (2) 计算^[19]:

$$\text{NAR} = \frac{c_{\text{NO}_2^- - \text{N}}}{c_{\text{NO}_2^- - \text{N}} + c_{\text{NO}_3^- - \text{N}}} \times 100\% \quad (1)$$

$$\text{FA} = \frac{1.214 \times c_{\text{NH}_4^+ - \text{N}} \times 10^{\text{pH}}}{e^{6.344/(273+T)} + 10^{\text{pH}}} \quad (2)$$

式中, $c_{\text{NH}_4^+ - \text{N}}$ 、 $c_{\text{NO}_2^- - \text{N}}$ 、 $c_{\text{NO}_3^- - \text{N}}$ 分别为氨氮、亚硝态氮和

室外跑道池在使用之前需用 10% 石灰水进行消毒,养藻用水选用工况 3 出水,补充 NaHCO_3 $16.8\text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$,每隔 24 h 观察螺旋藻生长状况,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 10 d 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.

硝态氮质量浓度, $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$; T 为温度, $^{\circ}\text{C}$.

D_{560} 采用 722 s 可见分光光度计在波长 560 nm 下测定^[20]. 螺旋藻干重测定方法为:把一定容积的藻液用 400 目滤布过滤后在 60°C 下烘 4 h,计算单位体积藻丝干重;根据拟合曲线: $Y (\text{g} \cdot \text{L}^{-1}) = 0.449\,1\,D_{560} + 0.000\,8$ ($R^2 > 0.99$),可由 D_{560} 计算螺旋藻干重,再由干重计算产率.

2 结果与讨论

螺旋藻可以利用氨氮作为生命活动所需氮源,但是其对氨氮浓度极其敏感,当氨氮浓度过大时会严重抑制螺旋藻的生长,但是硝态氮的积累不会对其生长产生抑制,在氨氮缺失的情况下,硝态氮可以作为螺旋藻生长所需氮源^[14]. 因此通过 SBR 对沼液进行处理,不仅可以使氨氮转化为对螺旋藻生长没有抑制的硝态氮,而且可以改善水质,使其满足螺旋藻的生长要求,实现废水资源化.

2.1 SBR 对沼液氨氮的去除与转化

SBR 反应器对氨氮的去除及硝态氮和亚硝态氮保留情况如图 3 所示.

本试验中,工况 1 (5 ~ 46 d),进水 COD/TN 为 2.26 ± 0.19 ,进水氨氮为 $(659 \pm 49)\text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,氨氮污泥负荷 $(0.037 \pm 0.003)\text{ kg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$,出水氨氮的浓度为 $(57.2 \pm 7.9)\text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,氨氮的去除率为 $91.0\% \pm 2.2\%$,而出水亚硝态氮浓度升高至 $(175.7 \pm 28.8)\text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 出水氨氮几乎不变,这是因为 DO

和反应时间充足,进水氨氮负荷基本保持不变,氨氮去除不受进水 COD/TN 影响^[21]. 该工况条件下亚硝态氮出现积累是因为碳源不足,反硝化作用下降,基于同步反硝化理论可以充分解释该现象.

工况 2(47~94 d),进水 COD/TN 增大至 2.41 ± 0.11 ,进水氨氮为 $(846 \pm 63) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,由于进水氨氮浓度迅速上升,氨氮污泥负荷迅速提高至 $(0.056 \pm 0.002) \text{ kg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$,导致出水氨氮浓度上升至 $(188.1 \pm 97.6) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,且出水氨氮出现较大幅度波动,随着污泥浓度上升,氨氮污泥负荷逐渐下降至 $(0.043 \pm 0.001) \text{ kg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$,出水氨氮浓度逐渐下降至 $(122.3 \pm 23.8) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,而此时亚硝态氮依然积累,最高浓度至 $469.4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 游离氨(FA)是氨氧化菌(AOB)的基质,也是亚硝酸盐氧化菌(NO₂⁻)的抑制剂. Anthonisen 等^[22]认为 FA 对 AOB 和 NO₂⁻ 的抑制浓度分别为 $10 \sim 150 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $0.1 \sim 1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,FA 对 NO₂⁻ 的抑制效应明显强于 AOB. 如表 3 所示,FA 由 $(17.4 \pm 1.2) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 上升

至 $(22.3 \pm 1.7) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,表现为对 NO₂⁻ 的抑制,亚硝态氮积累,虽然保留了亚硝态氮,但反应器稳定性下降^[15]. Kuba^[23]认为进水 COD/TN 大于 3.4 时,具有较好的脱氮效果,因此提高进水 COD/TN 有利于硝态氮及亚硝态氮的去除;

工况 3(95~135 d),进水 COD/TN 增大至 3.00 ± 0.05 ,进水氨氮浓度为 $(832 \pm 32) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,污泥浓度上升至 $6.46 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$,氨氮污泥负荷降低至 $(0.038 \pm 0.001) \text{ kg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$,出水氨氮浓度逐渐下降至 $(55.6 \pm 4.0) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 外加碳源充足,FA 下降至 $(11.9 \pm 0.8) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,对 NO₂⁻ 抑制减小,亚硝态氮积累逐渐好转,出水亚硝态氮浓度为 $(134.2 \pm 11.4) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$.

表 3 SBR 反应器中 FA 和 NAR

Table 3 FA and NAR in SBR			
项目	FA/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	NO ₂ ⁻ -N/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	NAR/%
工况 1	17.4 ± 1.2	175.7 ± 28.8	77.1 ± 4.4
工况 2	22.3 ± 1.7	325.3 ± 92.8	81.6 ± 4.2
工况 3	11.9 ± 0.8	134.2 ± 11.4	67.5 ± 9.5

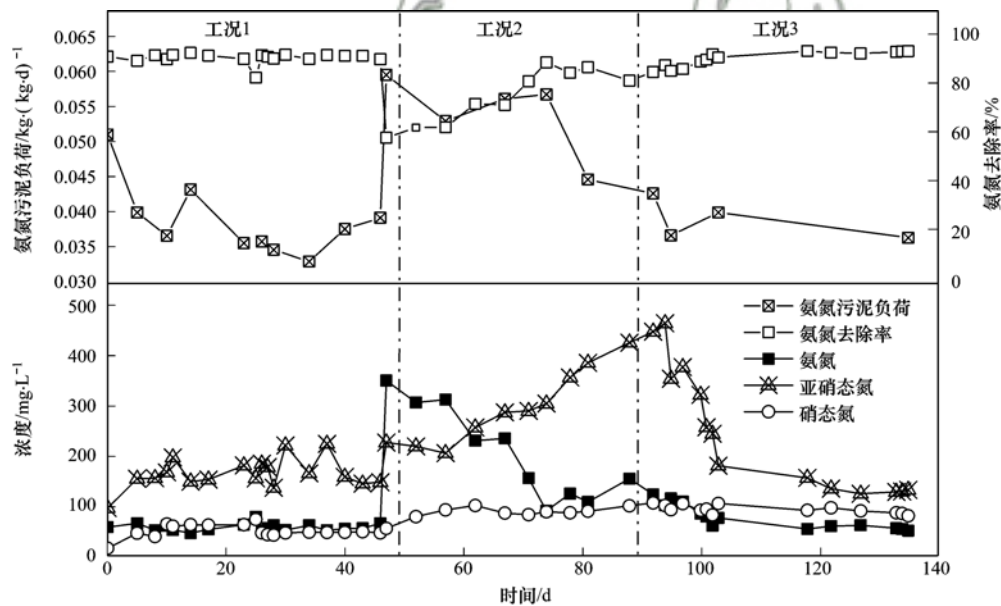


图 3 SBR 的氨氮去除效率及亚硝态氮的累积

Fig. 3 Removal of $\text{NH}_4^+\text{-N}$ and accumulation of $\text{NO}_2^-\text{-N}$ in SBR

2.2 螺旋藻在不同工况出水中的生长情况

养藻用水有 5 种:工况 1~工况 3 出水、原沼液和稀释 20 倍原沼液(表 4). 取上述 3 工况出水在光照恒温培养箱中同一螺旋藻种 SP18,以原水、稀释 20 倍原水、Zarrouk 培养基为对照组,观察螺旋藻的生长状况,如图 4 所示. 螺旋藻 SP18 在 Zarrouk 培养基中生长速度最快,培养 10 d D_{560} 达到 2.496,产率 $0.112 \text{ g} \cdot (\text{L} \cdot \text{d})^{-1}$, Shi 等^[24]在室内采用 Zarrouk 培养基养殖螺旋藻 10 d,其产率为 0.095

$\text{g} \cdot (\text{L} \cdot \text{d})^{-1}$;工况 1、工况 3 生长较快,培养 10 d D_{560} 达到 2.0,产率 $0.084 \text{ g} \cdot (\text{L} \cdot \text{d})^{-1}$,初始氨氮浓度分别为 $56.4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $51.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$;其次为经稀释的原水,培养 10d D_{560} 达到 1.69,产率为 $0.686 \text{ g} \cdot (\text{L} \cdot \text{d})^{-1}$ 其初始氨氮浓度为 $42.1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$;出水 2 由于氨氮浓度超过 $60 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,螺旋藻生长受到抑制,培养 10 d D_{560} 达到 1.45,产率 $0.049 \text{ g} \cdot (\text{L} \cdot \text{d})^{-1}$;然而螺旋藻无法在原沼液中生长. 国青青等^[11]在探讨氨氮浓度对螺旋藻生长抑制试验中

指出,当氨氮浓度小于 $60\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时螺旋藻能够正常生长,超过 $60\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 螺旋藻生长受到抑制,当氨氮浓度过高时螺旋藻直接死亡^[25],因此在原沼液中无法生长.

对比工况 1、工况 3、稀释 20 倍原水,在 C、P 等元素相差无几的情况下,螺旋藻经 SBR 处理后的出水具有更快的生长速度. 一方面 SBR 对沼液中的重金属具有较好的去除效果,并且可以降解沼液中激素、抗生素等有机污染物^[26],这些污染物会抑制螺旋藻的生长. 另一方面,稀释氨氮的同时对沼液中其他营养元素如磷、钾等营养元素以及锌、镁等微量元素,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进行了稀释^[27],导致螺旋藻营养元素缺失.

表 4 养藻水质/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$

Table 4 Water quality of wastewater for <i>Spirulina</i> cultivation/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$			
项目	氨氮	硝态氮	亚硝态氮
工况 1	56.4	50.5	170.7
工况 2	86.3	89.1	225.3
工况 3	51.2	91.6	213.1
原沼液	842.1	≤ 20	< 1
稀释 20 倍原沼液	42.1	≤ 1	< 0.1

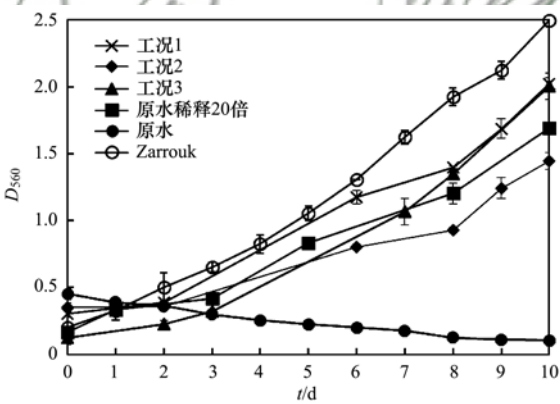


图 4 螺旋藻的生长曲线

Fig. 4 Growth curves of *S. platensis* in different media

2.3 螺旋藻在室外 120 L 跑道池生长曲线及产率分析

选取工况 3 出水作为室外 120 L 跑道池养殖用水,共养殖 2 批次,每批 2 个平行样,螺旋藻生长曲线如图 5 所示. 室外大棚环境下,螺旋藻种 SP18 培养 10 d 两批螺旋藻 D_{560} 分别达到 1.624、1.727,产率分别为 $0.073\text{ 01 g}\cdot(\text{L}\cdot\text{d})^{-1}$ 、 $0.077\text{ 63 g}\cdot(\text{L}\cdot\text{d})^{-1}$,高于李宝玉等^[28]用稀释沼液养殖螺旋藻的产率. 两组螺旋藻蛋白含量均达到 60%.

相比较 100 mL 规模,螺旋藻的产率均下降,这是

因为扩大规模后水深增加导致部分螺旋藻光照不足,降低了螺旋藻的光合作用,导致螺旋藻产率下降.

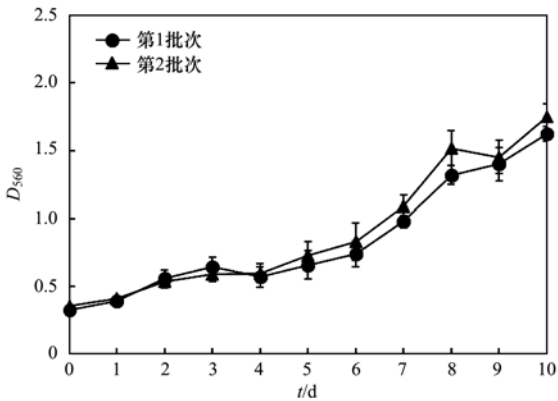


图 5 室外大棚螺旋藻在沼液中的生长曲线

Fig. 5 Growth curves of *S. platensis* in raceway pond

2.4 养藻进出水质对比及氮、磷向藻体细胞转化情况

两批次螺旋藻采收前后水质变化如表 5 所示. 两批次采收前后沼液中的氨氮去除率分别为 99.2%、99.4%,TN 去除率分别为 26%、29.4%,正磷酸盐去除率分别为 7.6%、8.3%.

本研究中氨氮去除率很高,一方面是因为螺旋藻优先利用氨氮作为氮源,当没有氨氮时,硝态氮、亚硝态氮可以作为其生长所需氮源^[29],部分氨氮被螺旋藻吸收转化;另一方面,氨氮在碱性条件会吹脱去除. 龚川南等^[30]认为温度、曝气量与氨氮去除成正相关关系,当温度为 30°C ,曝气 4 000 时,氨氮去除率达到 70% 以上. 而本试验中,大棚温度维持在 30°C ,随着螺旋藻生长,pH 不断升高至 9.96,经单叶轮连续搅拌不断与空气接触,氨氮转化为氨气被去除.

表 5 中同时计算了沼液中去除的氮、磷向螺旋藻体中的转化率. 两批次 TN 同化量分别为 $46.0\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $49.5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,正磷酸盐同化量分别为 $6.4\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $6.8\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 两批次 TN 转化率分别为 48.3%、47.2%,正磷酸盐转化率为 84.2%、81.9%. TN 减少量包含两部分:螺旋藻的吸收转化、氨氮的吹脱作用,而吹脱作用去除的氨氮无法准确统计,因此 TN 转化率的计算结果偏低. 正磷酸盐转化率较高,说明 SBR 出水中的磷元素绝大部分能被螺旋藻吸收转化. 但是仍有部分磷被去除但未被转化进藻细胞,这与藻体表面的吸附有关^[11].

以批次 1 为例,养藻出水中硝态氮、亚硝态氮、正磷酸盐浓度分别为 $75.3\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $176.9\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $42.4\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,满足螺旋藻的生长,为今后沼液养殖螺旋藻提供方向:多批次反复利用沼液.

表 5 氮、磷元素资源化利用情况

Table 5 Nutrient removal and recycling to *S. platensis* cells

批次	项目	单位	氨氮	TN	正磷酸盐
1	养藻进水	mg·L ⁻¹	51.2	355.9	50
	养藻出水	mg·L ⁻¹	0.4	260.7	42.4
	去除率	%	99.2	26	7.6
	藻细胞同化量	mg·L ⁻¹	—	46.0	6.4
	氮/磷转化率	%	—	48.3	84.2
2	养藻进水	mg·L ⁻¹	51.2	355.9	50
	养藻出水	mg·L ⁻¹	0.3	251.2	41.7
	去除率	%	99.4	29.4	8.3
	藻细胞同化量	mg·L ⁻¹	—	49.5	6.8
	氮/磷转化率	%	—	47.2	81.9

3 结论

利用 SBR 工艺处理养猪沼液,通过对进水 C/N 的调控,在出水中累积硝态氮、亚硝态氮并用于螺旋藻养殖。100 mL 和 120 L 两种规模的养殖试验表明螺旋藻能有效地利用 SBR 出水中的氮、磷等元素进行生长。与稀释法相比,本方法中螺旋藻产率更高,更符合大规模养殖的要求,为沼液资源化利用提供一种方法。

参考文献:

- [1] 田朝玉,叶晓,华威,等. 基于污水处理的微藻培养研究进展[J]. 环境工程, 2016, **34**(3): 1-5.
Tian C Y, Ye X, Hua W, *et al.* Research progress of microalgae cultivation using wastewater resources [J]. Environmental Engineering, 2016, **34**(3): 1-5.
- [2] 曹玉成,张妙仙,单胜道. MBBR 处理猪场废水厌氧消化液的研究[J]. 环境工程学报, 2008, **2**(5): 591-594.
Cao Y C, Zhang M X, Shan S D. Study on treatment of digested piggery wastewater by moving bed biofilm reactor[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2008, **2**(5): 591-594.
- [3] 孟海玲,董红敏,黄宏坤. 膜生物反应器用于猪场污水深度处理试验[J]. 农业环境科学学报, 2007, **26**(4): 1277-1281.
Meng H L, Dong H M, Huang H K. A membrane bioreactor for swine wastewater advanced treatment [J]. Journal of Agro-environment Science, 2007, **26**(4): 1277-1281.
- [4] Waeger F, Delhay T, Fuchs W. The use of ceramic microfiltration and ultrafiltration membranes for particle removal from anaerobic digester effluents[J]. Separation and Purification Technology, 2010, **73**(2): 271-278.
- [5] 邓良伟,郑平,李淑兰,等. 添加原水改善 SBR 工艺处理猪场废水厌氧消化液性能[J]. 环境科学, 2005, **26**(6): 105-109.
Deng L W, Zheng P, Li S L, *et al.* Performance improvement of sequencing batch reactor (SBR) treating digested piggery wastewater by addition of raw wastewater [J]. Environmental Science, 2005, **26**(6): 105-109.
- [6] 卫丹,万梅,刘锐,等. 嘉兴市规模化养猪场沼液水质调查研究[J]. 环境科学, 2014, **35**(7): 2650-2657.
- Wei D, Wan M, Liu R, *et al.* Study on the quality of digested piggery wastewater in large-scale farms in Jiaxing [J]. Environmental Science, 2014, **35**(7): 2650-2657.
- [7] Kim S K. Handbook of Marine Microalgae: Biotechnology Advances [M]. Academic Press, 2015. 93-240.
- [8] 张聪,谢爽,孟范平. 城市污水厂污泥替代营养盐培养海水小球藻的研究[J]. 环境工程学报, 2010, **4**(5): 1186-1190.
Zhang C, Xie S, Meng F P. Study on chlorella pacifica cultivation based on municipal sewage sludge [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2010, **4**(5): 1186-1190.
- [9] 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.
- [10] Markou G, Depraetere Q, Muyllaert K. Effect of ammonia on the photosynthetic activity of *Arthrospira* and *Chlorella*: a study on chlorophyll fluorescence and electron transport [J]. Algal Research, 2016, **16**: 449-457.
- [11] 国青青,刘锐,罗金飞,等. 沼液养殖钝顶螺旋藻的中试研究[J]. 环境科学, 2014, **35**(9): 3480-3486.
Guo Q Q, Liu R, Luo J F, *et al.* Pilot-Scale cultivation of *Spirulina plantensis* with digested piggery wastewater [J]. Environmental Science, 2014, **35**(9): 3480-3486.
- [12] 王欢,李旭东,曾抗美. 猪场废水厌氧氨氧化脱氮的短程硝化反硝化预处理研究[J]. 环境科学, 2009, **30**(1): 114-119.
Wang H, Li X D, Zeng K M. Nitritation-denitrification process as a pretreatment of ANAMMOX to remove nitrogen from piggery wastewater[J]. Environmental Science, 2009, **30**(1): 114-119.
- [13] 董宝刚,宋小燕,刘锐,等. 间歇曝气 SBR 与传统 SBR 处理养猪沼液的比较研究[J]. 环境科学, 2016, **37**(11): 4309-4316.
Dong B G, Song X Y, Liu R, *et al.* A comparative study on performance of an intermittent aeration SBR and a traditional SBR for treatment of digested piggery wastewater[J]. Environmental Science, 2016, **37**(11): 4309-4316.
- [14] Sassano C E N, Gioielli L A, Almeida K A, *et al.* Cultivation of *Spirulina platensis* by continuous process using ammonium chloride as nitrogen source[J]. Biomass and Bioenergy, 2007, **31**(8): 593-598.
- [15] 宋小燕,刘锐,税勇,等. 间歇曝气 SBR 处理养猪沼液的短

- 程脱氮性能[J]. 环境科学, 2016, **37**(5): 1873-1879.
- Song X Y, Liu R, Shui Y, *et al.* Stability of short-cut nitrification nitrogen removal in digested piggery wastewater with an intermittently aerated sequencing batch reactor [J]. Environmental Science, 2016, **37**(5): 1873-1879.
- [16] 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) Geitler [D]. Paris: University of Paris, 1966.
- [17] 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.
- [18] 李建政, 孟佳, 赵博玮, 等. 养猪废水厌氧消化液 SBR 短程硝化系统影响因素[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2014, **46**(8): 27-33.
- Li J Z, Meng J, Zhao B W, *et al.* Main influence factors for shortcut nitrification in a SBR treating anaerobic digested piggery wastewater[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2014, **46**(8): 27-33.
- [19] Ge S J, Wang S Y, Yang X, *et al.* Detection of nitrifiers and evaluation of partial nitrification for wastewater treatment: a review[J]. Chemosphere, 2015, **140**: 85-98.
- [20] 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.
- [21] 郭英. SBR 生物脱氮过程进水 C/N 及 FA 对微生物硝化特性影响试验研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2013.
- [22] Anthonisen A C, Loehr R C, Prakasam T B S. Inhibition of nitrification by ammonia and nitrous acid[J]. Journal—Water Pollution Control Federation, 1976, **48**(5): 835-852.
- [23] Kuba T, van Loosdrecht M C M, Heijnen J J. Phosphorus and nitrogen removal with minimal COD requirement by integration of denitrifying dephosphatation and nitrification in a two-sludge system[J]. Water Research, 1996, **30**(7): 1702-1710.
- [24] Shi W Q, Li S D, Li G R, *et al.* Investigation of main factors affecting the growth rate of *Spirulina* [J]. Optik-International Journal for Light and Electron Optics, 2016, **127**(16): 6688-6694.
- [25] Cai T, Ge X M, Park S Y, *et al.* Comparison of *Synechocystis* sp. PCC6803 and *Nannochloropsis salina* for lipid production using artificial seawater and nutrients from anaerobic digestion effluent[J]. Bioresource Technology, 2013, **144**: 255-260.
- [26] 郑金聪, 宁海丽. 多级生化法处理抗生素制药废水的中试研究[J]. 给水排水, 2007, **33**(S1): 255-257.
- Zheng J C, Ning H L. Research of effect factors on the treatment of antibiotic pharmaceutical wastewater by multilevel biochemistry treatment [J]. Water & Wastewater Engineering, 2007, **33**(S1): 255-257.
- [27] 夏旗. 钝顶螺旋藻对沼液的处理与利用[D]. 重庆: 西南大学, 2011.
- [28] 李玉宝, 郑江, 黎中宝, 等. 利用沼气废液培养螺旋藻[J]. 安徽农业科学, 2011, **39**(22): 13668-13670.
- Li Y B, Zheng J, Li Z B, *et al.* Cultivation of spirulina in biogas wastewater[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2011, **39**(22): 13668-13670.
- [29] 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.
- [30] 龚川南, 陈玉成, 黄磊. 曝气吹脱法用于牛场沼液污染物的去除[J]. 环境工程学报, 2016, **10**(5): 2291-2296.
- Gong C N, Chen Y C, Huang L. Pollutants removal characteristics by air stripping with aeration treating biogas slurry of cattle manure [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2016, **10**(5): 2291-2296.

CONTENTS

Marine Aerosol Using On-board Aerosol Mass Spectrometry	YAN Jin-pei, CHEN Li-qi, LIN Qi, <i>et al.</i> (2629)
Analysis of Spatio-temporal Distribution and Variation Characteristics of Aerosol Optical Depth over the Northwest of China by MODIS C6 Product	ZHAO Shi-wei, GAO Xiao-qing (2637)
Sources and Characteristics of Regional Background PM ₁ in North China During the Autumn and Winter Polluted Period ...	ZHANG Zhou-xiang, ZHANG Yang-mei, ZHANG Xiao-ye, <i>et al.</i> (2647)
Pollution Characteristics and Light Extinction Contribution of Water-soluble Ions of PM _{2.5} in Hangzhou	WU Dan, LIN Shao-long, YANG Huan-qiang, <i>et al.</i> (2656)
Formation and Size Distribution of the Secondary Aerosol Inorganic Ions in Different Intensity of Haze in Qingdao, China	XIE Dan-dan, QI Jian-hua, ZHANG Rui-feng (2667)
Comparison of Characteristics and Reactive Oxidative Species of PM _{2.5} in Xi'an, China During Haze and Clean Days	WANG Kun, HAN Yong-ming, Ho Steven Sai Hang, <i>et al.</i> (2679)
Seasonal Variation and Sources of Dicarboxylic Acids and Related Compounds in PM ₁₀ from Mt. Huangshan	MENG Jing-jing, HOU Zhan-fang, ZHANG Er-xun, <i>et al.</i> (2688)
Composition Characteristics and Sources Apportionment of Lanthanoid in PM _{2.5} of Quanzhou	ZHANG Yun-feng, YU Rui-lian, HU Gong-ren, <i>et al.</i> (2698)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Hazardous Air Pollutants in the Surroundings of Three Petrochemical Industries in Northwest China	XU Ya-xuan, LI Xiao-min, YU Hua-tong, <i>et al.</i> (2707)
VOCs Characteristics and Sources Apportionment in Yixing City During the G20 Summit	ZHANG Lin, ZHANG Xiang-zhi, QIN Wei, <i>et al.</i> (2718)
Agricultural Ammonia Emission Inventory and Its Spatial Distribution in Sichuan Province from 2005 to 2014	FENG Xiao-qiong, CHEN Jun-hui, JIANG Tao, <i>et al.</i> (2728)
Air Pollutant Emission Inventory of Non-road Machineries in Typical Cities in Eastern China	LU Jun, HUANG Cheng, HU Qing-yao, <i>et al.</i> (2738)
Estimation of Health Risk and Enaction of Safety Standards of <i>N</i> -nitrosodimethylamine (NDMA) in Drinking Waters in China	ZHANG Qiu-qiu, PAN Shen-ling, ZHANG Yu, <i>et al.</i> (2747)
Comparison and Analysis of the Quantitative Methods for Pollutant Sources Load in Groundwater Contamination Risk Assessment	ZHAO Peng, HE Jiang-tao, WANG Man-li, <i>et al.</i> (2754)
Distribution and Sources of <i>n</i> -alkanes in Surface Seawater of Jiaozhou Bay	ZHANG Qian, SONG Jin-ming, PENG Quan-cai, <i>et al.</i> (2763)
Spatial Variations of CO ₂ Degassing Across Water-air Interface and Its Impact Factors in Summer in Guijiang River, China	ZHANG Tao, LI Jian-hong, PU Jun-bing, <i>et al.</i> (2773)
Spatial Distribution Characteristics and Potential Ecological Risk of Antimony and Selected Heavy Metals in Sediments of Duliujiang River	NING Zeng-ping, XIAO Qing-xiang, LAN Xiao-long, <i>et al.</i> (2784)
Distribution Characteristics and Potential Risk of Bisphenol Analogues in Surface Water and Sediments of Lake Taihu	CHEN Mei-hong, GUO Min, XU Huai-zhou, <i>et al.</i> (2793)
Characteristics of Water Extractable Organic Nitrogen from Erhai Lake Sediment and Its Differences with Other Sources	LI Wen-zhang, ZHANG Li, WANG Sheng-rui, <i>et al.</i> (2801)
High-resolution Distribution Characteristics of Phosphorous, Iron and Sulfur Across the Sediment-Water Interface of Aha Reservoir ...	SUN Qing-qing, CHEN Jing-an, WANG Jing-fu, <i>et al.</i> (2810)
Distribution Characteristics of Drugs of Abuse and Their Metabolites in Aqueous Environment of Beijing, China	ZHANG Yan, ZHANG Ting-ting, CHEN Wei-ping, <i>et al.</i> (2819)
Impacts of Rainfall Characteristics and Occurrence of Pollutant on Effluent Characteristics of Road Runoff Pollution	CHEN Ying, WANG Zhao, WU Ya-gang, <i>et al.</i> (2828)
Inhibition of Internal Phosphorus Release in the Black-Odor Channel Under Different Adding Methods of CaO ₂	XU Yao, LI Da-peng, HAN Fei-er, <i>et al.</i> (2836)
Transport of Nitrogen and Phosphorus from Sloping Farmland with Thin Purple Soil Overlying Rocks	XIAN Qing-song, TANG Xiang-yu, ZHU Bo (2843)
Purification of Slightly Salt-alkaline Water Bodies by Microorganism Enhanced Combined Floating Bed	CHEN You-yuan, WU Ya-dong, SUN Ping, <i>et al.</i> (2850)
MgO-Biochar for the Adsorption of Phosphate in Water	WANG Bin-bin, LIN Jing-dong, WAN Shun-li, <i>et al.</i> (2859)
Degradation of <i>N</i> -nitrosodimethylamine by Palladium/ Iron Bimetallic Composite Catalytic Fiber	ZHANG Huan, FU Min, WEI Jun-fu, <i>et al.</i> (2868)
Effects of Goethite, Magnetite and Gypsum on the Anaerobic Degradation of 2,4-Dichlorophenol	KONG Dian-chao, ZHOU Yue-fei, CHEN Tian-hu, <i>et al.</i> (2875)
Transformation of Disinfection Byproduct Precursors During the Wastewater Regeneration Processes	HAN Hui-hui, MIAO Heng-feng, ZHANG Ya-jing, <i>et al.</i> (2883)
Treatment of PTA Wastewater by Modified Anode Microbial Fuel Cell	SUN Jing-yun, FAN Meng-jie, CHEN Ying-wen, <i>et al.</i> (2893)
Selective Inhibition of Rice Straw Extract on Growth of Cyanobacteria and Chlorophyta	SU Wen, CHEN Jie, ZHANG Sheng-peng, <i>et al.</i> (2901)
Cultivation of <i>Spirulina platensis</i> in Digested Piggery Wastewater Pretreated by SBR with Operating Conditions Optimization	CAI Xiao-bo, YU Qiang-qiang, LIU Rui, <i>et al.</i> (2910)
Nitrogen Removal Performance of ANAMMOX Process with K ⁺ Addition in Saline Surroundings	WU Guo-dong, YU De-shuang, LI Jin, <i>et al.</i> (2917)
Efficient and Stable Operation of Shortcut Nitrification by Entrapping Ammonia Oxidizing Bacteria	YU Meng-yu, LIU Yi, TIAN Yu-bin, <i>et al.</i> (2925)
Fast Start-up of ANAMMOX and the Spatial Distribution of EPS in ANAMMOX Granules	LI Hui-juan, PENG Dang-cong, CHEN Guo-yan, <i>et al.</i> (2931)
Ammonia Oxidation with Potential Electron Acceptor in ANAMMOX Sludge	LI Xiang, LIN Xing, WANG Fan, <i>et al.</i> (2941)
Ammoniac Waste Gas in-situ Treatment Based on ANAMMOX Process	LIN Xing, WANG Fan, YUAN Yan, <i>et al.</i> (2947)
Extensive Green Roof Substrate Composition Based on Sludge Recycling	SHEN Qing-ran, LI Tian, CAO Yi, <i>et al.</i> (2953)
Short-term Effect of Roxithromycin on Abundance and Diversity of Ammonia-Oxidizing Microorganisms in Activated Sludge	GAO Jing-feng, SUN Li-xin, FAN Xiao-yan, <i>et al.</i> (2961)
Influence of Salinity on Microbial Community in Activated Sludge and Its Application in Simulated Dye Wastewater Treatment	ZHOU Gui-zhong, XU Shuo, YAO Qian, <i>et al.</i> (2972)
Shift of Microbial Communities During the CO ₂ -Brine-Sandstone Interaction Process	WANG Bo-qiang, LI Chen-yang, LU Wei, <i>et al.</i> (2978)
Response of Soil Respiration and Heterotrophic Respiration to Returning of Straw and Biochar in Rape-Maize Rotation Systems	TIAN Dong, GAO Ming, HUANG Rong, <i>et al.</i> (2988)
Effect of Simulated Climate Warming on Microbial Community and Phosphorus Forms in Wetland Soils	TENG Chang-yun, SHEN Jian-guo, WANG Zhong, <i>et al.</i> (3000)
Patterns of Bacterial Community Through Soil Depth Profiles and Its Influencing Factors Under <i>Betula albosinensis</i> Burkill in the Xinjiashan Forest Region of Qinling Mountains	DU Can, XU Chen-yang, WANG Qiang, <i>et al.</i> (3010)
Effects of Microbial Activities on Mercury Methylation in Farmland near Mercury Mining Area	JIA Qin, ZHU Xue-mei, WANG Qi, <i>et al.</i> (3020)
Effect of Sepiolite Application on the Migration and Redistribution of Pb and Cd in Soil Rice System in Soil with Pb and Cd Combined Contamination	FANG Zhi-ping, LIAO Min, ZHANG Nan, <i>et al.</i> (3028)
Application of Amphoteric-Cationic Combined Modification on Phenol Adsorption of Yellow Brown Soil	LIU Wei, MENG Zhao-fu, REN Shuang, <i>et al.</i> (3036)
Bioaccumulation of Heavy Metals in Twigs and Leaves of <i>Abies fabri</i> at Mount Gongga in China; A Comparison Study Between 1999 and 2014	LI Fen, WANG Xun, LUO Ji, <i>et al.</i> (3045)
Subcellular Distribution and Chemical Forms of Heavy Metals in Three Types of Compositae Plants from Lead-Zinc Tailings Area	ZHU Guang-xu, XIAO Hua-yun, GUO Qing-jun, <i>et al.</i> (3054)
Effects of Bentonite Amendment on Detoxification, Heavy Metal Passivation and Estrone Elimination of Sewage Sludge Compost	ZHOU Li-na, CAI Han-zhen, LI Rong-hua, <i>et al.</i> (3061)
Mesophilic and Thermophilic Anaerobic Co-Digestion of Food Waste and Straw	GUO Xiang-lin, ZUO Jian-e, SHI Xu-chuan, <i>et al.</i> (3070)
Basic Features of Combustible Rural Garbage Component and Its Spatial-temporal Difference in China	YAN Zhuo-yi, YUE Bo, GAO Hong, <i>et al.</i> (3078)
Optimization of Promoter and Support for Co-based/zeolites Catalysts in Catalytic Reduction of NO _x by CH ₄	PAN Hua, JIAN Yan-fei, CHEN Ning-na, <i>et al.</i> (3085)