

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第33卷 第6期

Vol.33 No.6

2012

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

我国湖泊富营养化效应区域差异性分析 曹金玲,许其功,席北斗,李小平,杨柳燕,江立文,魏自民,吴献花(1777)

基于“源”“汇”景观格局指数的海河流域总氮流失评价 孙然好,陈利顶,王伟,王赵明(1784)

云蒙湖流域土地利用变化对非点源氮污染负荷的影响 孟晓云,于兴修,泮雪芹(1789)

深圳市沿岸表层海水中全氟化合物的残留特征及其分布规律 陈清武,张鸿,柴之芳,沈金灿,杨波(1795)

典型电器工业区河涌沉积物中多环芳烃的分布、来源和潜在生态风险 邓代永,邱孟德,孙国萍,郭俊,张宏涛,张琴,许玫英(1801)

珠江下游河段沉积物中重金属含量及污染评价 谢文平,王少冰,朱新平,陈昆慈,潘德博,洪孝友,尹怡(1808)

扎龙湿地南山湖沉积岩芯重金属污染特征及来源判别 苏丹,臧淑英,叶华香,孙丽,贾晓丹,李苗(1816)

汕头湾沉积物磷的形态分布与季节变化特征研究 赵建刚,乔永民(1823)

氮磷比对东海浮游植物群落生长影响的微宇宙实验 黄伟,朱旭宇,曾江宁,寿鹿,陈全震,江志兵(1832)

春季福建北部海域浙闽沿岸流消亡期浮游桡足类种类组成及其分布 王彦国,林景宏,王春光,林茂(1839)

滩涂红树林种植-养殖耦合系统中多环芳烃含量水平分析 陈冠秋,李耀初,黄晋沐,南燕,林茂宏(1846)

四溴双酚 A 在 5 种巢湖鱼类体内的组织分布与生物浓缩因子研究 杨苏文,王圣瑞,闫振广,张普青(1852)

五氯酚对稀有鮑肌卵黄蛋白原及 p53 的诱导效应 熊力,马永鹏,张晓峥,金帮明,李伟,苏永良,毛思予,刘堰(1858)

全氟辛烷磺酸 (PFOS) 对斑马鱼卵黄蛋白原 mRNA 水平的影响 程艳,崔媛,党志超,谢文平,李海山,殷缓缓,陈会明(1865)

水溶性有机物电子转移能力与荧光峰强度的关系研究 陶亚,袁田,周顺桂,袁勇,庄莉,王辉亮(1871)

MIEX 中试实验对二级出水中有机物去除的 3DEEM 解析 杨建,高金华,常江(1878)

XDLVO 理论解析钙离子对腐殖酸反渗透膜污染的影响机制 姚淑娣,高欣玉,郭本华,包南,谢慧君,梁爽(1884)

栅藻 LX1 在水产养殖废水中的生长、脱氮除磷和油脂积累特性 马红芳,李鑫,胡洪管,于茵,巫寅虎(1891)

氯化铁用于反硝化同步化学生物絮凝工艺研究 王宏杰,董文艺,刘莉莎,韩贵超(1897)

合成氨废水短程反硝化特性研究 李妍,李泽兵,马家轩,王晓毅,赵白航,李军(1902)

基于新型反应器的好氧颗粒污泥的稳定性控制 李志华,杨帆,李胜,谢磊,王晓昌(1907)

采用非生长能量代谢参数表征颗粒污泥稳定性 李志华,吴军,李胜,谢磊,王晓昌(1913)

酸-碱预处理促进剩余污泥厌氧消化的研究 袁光环,周兴求,伍健东(1918)

小回流比条件下污泥浓度分区试验研究 史思,王素兰,李瑞,邢传宏(1923)

非离子表面活性剂对污泥调理脱水效果的影响 侯海攀,濮文虹,时亚飞,于文华,樊明明,刘欢,杨昌柱,李野,杨家宽(1930)

中国空气污染指数变化特征及影响因素分析 李小飞,张明军,王圣杰,赵爱芳,马潜(1936)

南京 3 类不同大气污染过程下气溶胶水溶性无机离子的特征研究 张秋晨,朱彬,苏继峰,王红磊(1944)

深圳市郊区大气中 PM_{2.5} 的特征分析 戴伟,高佳琪,曹罡,欧阳峰(1952)

餐饮业油烟的颗粒物分析 谭德生,邝元成,刘欣,戴飞鸿(1958)

Fe-MnO_x-CeO₂/ZrO₂ 低温催化还原 NO 性能研究 刘荣,杨志琴(1964)

自然型氨基酸及其钾盐的 CO₂ 吸收和再生特性 晏水平,陈竞翔,徐明亮,艾平,张衍林(1971)

耕作方式对紫色水稻土农田生态系统 CH₄ 和 N₂O 排放的影响 张军科,江长胜,郝庆菊,唐其文,程炳红,李辉,陈璐豪(1979)

垄作覆膜条件下田间氨挥发及影响因素 上官宇先,师日鹏,李娜,韩坤,李会科,王林权(1987)

添加不同 N 源条件下典型除草剂对土壤呼吸和 N₂O 排放的影响 孙青,史淳星,石坤,言儒斌,蒋静艳,吴以中(1994)

某石墨阳极法氯碱生产场地二噁英污染特征分析 余立凤,魏文侠,田亚静,吴广龙,李培中,赵丹(2000)

脱硫石膏对酸化森林土壤短期修复效果的研究 罗遥,康荣华,余德祥,谭炳全,段雷(2006)

岩溶山地土壤氧化铁形态及其与成土环境的关系 张治伟,朱章雄,傅瓦利,文志林(2013)

废弃尾矿库 15 种植物对重金属 Pb、Zn 的积累和养分吸收 施翔,陈益泰,王树凤,李江川(2021)

铬胁迫对 3 种草本植物生长及铬积累的影响 王爱云,黄姗姗,钟国锋,徐刚标,刘志祥,申响保(2028)

湘西花垣矿区主要植物种类及优势植物重金属蓄积特征 杨胜香,田启建,梁士楚,周耀渝,邹慧成(2038)

增施 CO₂ 对 C3 和 C4 植物根际氯氰菊酯残留浓度的影响 慕楠,刁晓君,王曙光,王鹏腾,李攀峰(2046)

生物强化去除吡啶的特性及微生物种群动态变化分析 乔琳,赵宏,王建龙(2052)

A/O MBR 处理生活污水效率与菌群多样性的关系 邝斌宇,史青, Montcho Leon Monthero,丁嫚,温东辉(2061)

石油污染土壤生物修复过程中氮循环功能基因的动态检测 吴彬彬,卢滇楠,刘铮(2068)

武汉市儿童多途径铅暴露风险评估 郝汉舟,陈同斌,吴基良,雷梅,田辉,祖文普,钟学斌(2075)

电子鼻预处理装置的开发及适用性研究 卜凡阳,文晓刚,万梅,刘锐,陈吕军,张永明(2083)

ToxTell 生物传感器在 Cu²⁺、Cd²⁺ 冲击活性污泥系统分析中的应用 王学江,王鑫,刘免,吴真,杨连珍,夏四清(2090)

环境样品免疫检测基质效应分析与控制 盛建武,何苗,施汉昌(2095)

热等离子体熔融固化模拟医疗废物的研究 张璐,严建华,杜长明,陆胜勇,李晓东(2104)

城市生活垃圾组分低温干燥特性及模型研究 吴亚娟,刘红梅,陆胜勇,严建华,李晓东(2110)

厌氧-准好氧联合型生物反应器填埋场产气规律的研究 韩智勇,刘丹,李启彬(2118)

处理垃圾渗滤液的 Fe/C 空气阴极 MFC 性能研究 唐玉兰,彭漫,于燕,何亚婷,傅金祥,赵玉华(2125)

基于冗余分析的典型喀斯特山区土壤-石漠化关系研究 龙健,廖洪凯,李娟,陈彩云(2131)

北京市能源消费与经济增长关系的协整检验分析 陈操操,张妍,刘春兰,王海华,李铮(2139)

《环境科学》征稿简则(1877) 《环境科学》征订启事(1890) 信息(1822,1857,1896,2138)

栅藻 LX1 在水产养殖废水中的生长、脱氮除磷和油脂积累特性

马红芳^{1,2}, 李鑫², 胡洪营^{2,3*}, 于茵², 巫寅虎²

(1. 华侨大学土木工程学院, 厦门 361021; 2. 清华大学环境学院, 北京 100084; 3. 清华大学深圳研究生院, 深圳 518055)

摘要: 利用高含油脂微藻处理废水, 可以实现废水处理与生物柴油生产的耦合, 已成为废水处理领域新的研究方向. 研究了 1 株高含油脂的淡水栅藻 LX1 (*Scenedesmus* sp. LX1) 在水产养殖废水中的生长、脱氮除磷和油脂积累特性. 结果表明, 栅藻 LX1 在该废水中的内禀生长速率、最大种群密度和最大种群生物量增长速率分别为 0.44 d^{-1} 、 $7.46 \times 10^6 \text{ 个} \cdot \text{mL}^{-1}$ 和 $0.82 \times 10^6 \text{ 个} \cdot (\text{mL} \cdot \text{d})^{-1}$. 培养至稳定期后, 栅藻 LX1 对废水中的氨氮、亚硝态氮、硝态氮和磷的去除率分别为 95.5%、96.3%、85.8% 和 98.8%; 其生物量干重为 $0.38 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$, 单位藻细胞油脂含量高达 31.6%. 因此, 栅藻 LX1 在水产养殖废水的净化和资源化方面具有较大优势, 适于作为耦合工艺的优选藻种.

关键词: 栅藻 LX1; 水产养殖废水; 生长特性; 脱氮除磷; 油脂含量

中图分类号: X714 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2012)06-1891-06

Growth, Removal of Nitrogen and Phosphorus, and Lipid Accumulation Property of *Scenedesmus* sp. LX1 in Aquaculture Wastewater

MA Hong-fang^{1,2}, LI Xin², HU Hong-ying^{2,3}, YU Yin², WU Yin-hu²

(1. College of Civil Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China; 2. School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 3. Graduate School at Shenzhen, Tsinghua University, Shenzhen 518055, China)

Abstract: Treating wastewater by high-lipid-content microalgae, which can couple with wastewater treatment and biodiesel production, has become a new research direction in the wastewater treatment field. A high-lipid-content freshwater microalgae, *Scenedesmus* sp. LX1 was studied concerning its growth, removal efficiencies of nitrogen and phosphorus, and lipid accumulation property while growing in aquaculture wastewater. Results showed that the specific growth rate, maximum population density and maximum population growth rate of *Scenedesmus* sp. LX1 were 0.44 d^{-1} , $7.46 \times 10^6 \text{ cells} \cdot \text{mL}^{-1}$ and $0.82 \times 10^6 \text{ cells} \cdot (\text{mL} \cdot \text{d})^{-1}$, respectively. At stationary phase of training, removal efficiencies of ammonia, nitrite, nitrate and phosphorus by *Scenedesmus* sp. LX1 were 95.5%, 96.3%, 85.8% and 98.8%, respectively. Its biomass [dry weight] was $0.38 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$, algae lipid content was up to 31.6%. In general, *Scenedesmus* sp. LX1 has larger advantage in aquaculture wastewater depuration and resource utilization respect, and it can be used as the preferred algae species for coupling process.

Key words: *Scenedesmus* sp. LX1; aquaculture wastewater; growth property; removal of nitrogen and phosphorus; lipid content

我国是水产养殖大国,产量多年居世界首位.高密度的水产养殖方式满足了人们对水产品不断增长的需求,但产生的富含氮、磷污染物的养殖废水却逐渐成为新的污染源^[1-3].基于水资源短缺和环境污染日趋严重的双重原因,养殖废水的净化处理和资源化利用受到了广泛关注.目前,国内对水产养殖废水的净化和回用尚处于起步阶段,应用较多的是以生物膜法为主体的传统污水处理工艺^[4-6].虽然该类传统工艺能有效地去除悬浮物和有机物,但仍存在处理成本高、氮化合物去除效果有限、除磷率很低、有污泥产生等诸多不足^[7-9].因此,寻求高效、低成本、环境友好的水产养殖废水处理技术具有重要的现实意义.

微藻具有低成本高效净化废水的潜能,也是制备生物柴油的理想原料^[10].因此,在生活污水及水产养殖废水的处理^[11-15]和生物柴油的生产中^[16,17],微藻技术受到了越来越多的关注.然而,在利用微藻处理水产养殖废水的已有研究中,未充分考虑收获后藻细胞的利用价值,使净化系统的经济性和环境效益受到抵减.而微藻生物柴油的研究也多是基于利用营养液培养藻细胞的单一系统,存在着高成本、浪费淡水资源等不足^[18].胡洪营等^[19]提

收稿日期: 2011-08-10; 修订日期: 2011-10-11

基金项目: 国家杰出青年科学基金项目(50825801); 华侨大学侨办科研基金项目(10QZR08)

作者简介: 马红芳(1969~),女,硕士,副教授,主要研究方向为水污染控制, E-mail: hf_ma2003@yahoo.com.cn

* 通讯联系人, E-mail: hyhu@tsinghua.edu.cn

出了将微藻脱氮除磷与高价值生物质生产耦合的理念,以污水为基质培养微藻,在净化水质的同时,可获得高价值的藻细胞生物质用以生产生物柴油,从而克服了单一系统的局限性.根据耦合系统对藻种筛选提出的更高要求^[18,19],Li等^[20]分离出1株淡水栅藻 LX1 (*Scenedesmus* sp. LX1).本研究分析了栅藻 LX1 在水产养殖废水中的生长、脱氮除磷特性及油脂积累特性,以考察其在水产养殖废水净化和能

源资源生产耦合中的应用潜力.

1 材料与方法

1.1 试验材料

1.1.1 试验废水

试验废水采自北京市密云县某养鱼场换排废水,经 0.45 μm 滤膜过滤细菌、藻类和其他悬浮固体物后使用,主要水质如表 1 所示.

表 1 试验废水及水质

Table 1 Wastewater samples and related water quality in this study

NH_4^+ -N/mg·L ⁻¹	NO_2^- -N/mg·L ⁻¹	NO_3^- -N/mg·L ⁻¹	PO_4^{3-} -P/mg·L ⁻¹	COD/mg·L ⁻¹	pH
5.75 ± 0.09	0.63 ± 0.01	20.15 ± 0.30	2.86 ± 0.08	26 ± 1.03	7.76 ± 0.19

1.1.2 试验藻种

研究用的栅藻 LX1 藻种由清华大学环境学院环境生物研究所分离获得.藻种保存于稀释 50% 的 BG11 培养基中.接种前将保存的藻种转移到 250 mL 锥形瓶(内有 100 mL 的 mBG11 液体培养基^[21],其中 NaNO_3 91.1 mg·L⁻¹, $\text{K}_2\text{HPO}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ 11.0 mg·L⁻¹) 进行扩大培养,置于温度为 25℃,光照强度 2 000 lx,相对湿度 75%,光暗比 14 h:10 h 的人工气候箱中培养使之处于对数增长期.

1.2 试验方法

1.2.1 藻种接种及培养

向 500 mL 锥形瓶中加入 200 mL 废水.取 5.0 mL 试验藻种接种至废水中,接种藻液密度为 2.3×10^5 个·mL⁻¹,放入人工气候箱培养.培养条件同上,每日人工摇动数次,保证微藻正常生长.试验设 2 个平行样.

1.2.2 藻细胞计数

采用血球计数板计数藻细胞数目,然后换算出培养液中的藻细胞密度.

1.2.3 藻细胞总油脂含量测定

取 40 mL 藻液入 50 mL 离心管,在 12 000 r·min⁻¹ 条件下离心 15 min,弃去上清液,将藻细胞和部分残留上清液转至 10 mL 离心管,继续在 12 000 r·min⁻¹ 条件下离心 15 min 得到浓缩样品,然后按照文献^[22]中的有机溶剂萃取法步骤测定.

1.2.4 藻细胞干重测定

取适量藻液,用经过烘干的 0.45 μm 滤膜过滤,将带有藻体的滤膜放置到烘箱中,115℃ 条件下烘干 24 h,称取滤膜前后质量变化,即藻细胞干重.

1.2.5 水质指标测定

用 0.45 μm 滤膜过滤水样,然后测定滤液中

NH_4^+ -N、 NO_2^- -N、 NO_3^- -N、 PO_4^{3-} -P、pH 和 COD 值.水质指标测定均采用国家环境保护总局颁布的标准方法^[23], NH_4^+ -N 采用纳氏试剂光度法, NO_2^- -N 采用 N-(1-萘基)-乙二胺光度法, NO_3^- -N 采用紫外分光光度法, PO_4^{3-} -P 采用钼锑抗分光光度法,pH 测定采用梅特勒 SG2 型 pH 计,COD 采用重铬酸钾法.

1.3 藻生长特性分析

有限环境下,种群的生物量增长具密度制约性,Logistic 模型是描述该规律的经典模型^[22].

$$N = \frac{K}{1 + e^{a-rt}} \quad (1)$$

$$\ln\left(\frac{K}{N} - 1\right) = a - rt \quad (2)$$

$$\frac{dN}{dt} = rN\left(1 - \frac{N}{K}\right) = rN\left(\frac{K-N}{K}\right) \quad (3)$$

式中, t 为培养时间(d); K 为最大种群密度(个·mL⁻¹); N 为 t 时刻的种群密度(个·mL⁻¹); a 为常数,表示曲线对原点的相对位置; r 为种群的内禀生长速率(d⁻¹),指单个个体潜在的最大增长速率.式(1)表示藻种群生物量随时间的变化;式(2)是式(1)的线性表达式;式(3)表示藻生物量的增长速率随藻密度的变化,当藻密度为最大密度一半时,生物量的增长速率最大,即 $R_{\max} = rK/4$.

每隔一定的时间,测定藻细胞数作为藻的生物量 N ,利用式(2)对数据拟合,求得种群的内禀生长速率 r ,并按照式(3)计算不同时间的藻生物量增长速率 $\frac{dN}{dt}$,绘制藻生物量和藻生物量增长速率随时间的变化曲线.

2 结果与分析

2.1 栅藻 LX1 在水产养殖废水中的生长特性

藻生物量和藻生物量增长速率随时间的变化曲线如图 1 所示. 由图 1 可知, 栅藻 LX1 在培养初

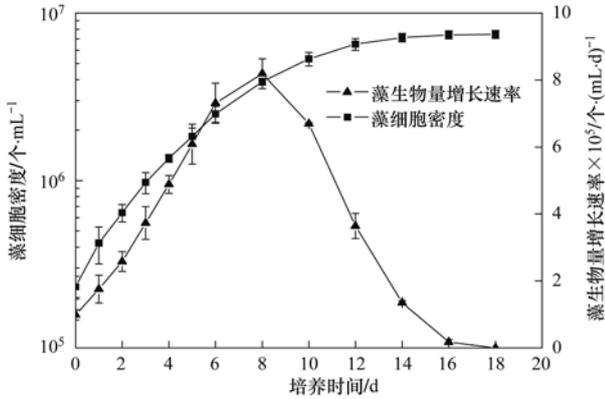


图 1 栅藻 LX1 在废水中的生长特性

Fig. 1 Growth property of *Scenedesmus* sp. LX1 in wastewater

表 2 栅藻 LX1 在水产养殖废水及其它水质中的生长模型参数

Table 2 Growth parameters of *Scenedesmus* sp. LX1 in aquaculture wastewater and other water quality

培养体系水质	种群内禀生长速率 /d ⁻¹	最大种群密度 K × 10 ⁶ /个·mL ⁻¹	最大生物量增长速率 × 10 ⁶ /个·(mL·d) ⁻¹	文献
水产养殖废水	0.44 ± 0.05	7.46 ± 0.40	0.82 ± 0.19	本研究
模拟城市污水二级出水	0.42 ~ 0.43	7.72 ~ 12.6	0.83 ~ 1.34	[21]
稀释 50% 的 BG11 培养基	0.38	12.0	1.1	[22]

说明栅藻 LX1 在水产养殖废水中也能较好生长.

2.2 栅藻 LX1 对废水中氮磷的去除特性

2.2.1 氮的去除特性

栅藻 LX1 在水产养殖废水的培养过程中, 不同形态氮的浓度变化如图 2 所示, 培养 16 d 后的去除率如表 3 所示.

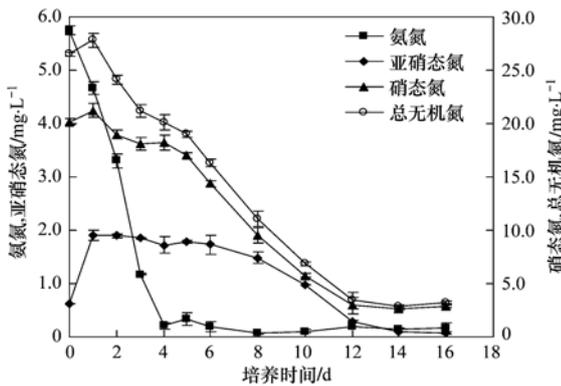


图 2 栅藻 LX1 对废水中不同形态氮的去除特性

Fig. 2 Removal property of different nitrogen in wastewater by *Scenedesmus* sp. LX1

表 3 稳定期栅藻 LX1 对废水中不同形态氮的去除率/%

Table 3 Removal efficiency of ammonia, nitrite, nitrate by

Scenedesmus sp. LX1 at stationary phase of training/%

氨氮	亚硝态氮	硝态氮	总无机氮
95.5	96.3	85.8	88.0

从图 2 可以看出, 氨氮、亚硝态氮、硝态氮的含

期藻细胞增值较慢, 一方面是因为藻细胞基数较小, 另一方面可能由于栅藻对水产养殖废水水质有个适应过程. 随着培养时间的进行, 藻生物量增长速率逐渐增大, 到第 8 d 左右达到最大值, 此后生长速率呈现下降趋势. 数据拟合得到的试验水质条件下栅藻 LX1 的相关生长模型参数如表 2 所示.

从表 2 可看出, 栅藻 LX1 在水产养殖废水中的种群内禀生长速率为 0.44 d⁻¹, 培养至稳定期时, 藻生长达到的最大种群密度为 7.46 × 10⁶ 个·mL⁻¹, 最大种群生物量增长速率为 0.82 × 10⁶ 个·(mL·d)⁻¹. 与模拟城市污水二级出水培养体系相比, 生长参数基本处于或接近该范围, 与稀释 50% 的 BG11 培养基条件相比, 尽管该水产养殖废水的营养含量较低, 但生长参数仍处于同一数量级,

量均呈下降趋势, 说明这 3 种形态的氮都可作为栅藻 LX1 的氮源, 但是其下降表现出不同的变化趋势. 前 4 d 氨氮降解最快, 由最初的 5.75 mg·L⁻¹ 降到第 4 d 的 0.21 mg·L⁻¹, 去除率为 96.4%, 而亚硝态氮和硝态氮的含量变化不明显. 第 4 ~ 8 d 期间, 硝态氮的降解速度明显加快, 至第 8 d 时含量降为 9.56 mg·L⁻¹, 去除率为 52.6%, 亚硝态氮相对而言变化较小. 从第 8 d 开始一直到培养结束, 氨氮含量变化不明显, 而硝态和亚硝态氮却均有较高的去除. 另外, 培养至第 1 d 时, 亚硝态氮的含量明显升高, 由最初的 0.63 mg·L⁻¹ 升高到 1.90 mg·L⁻¹, 之后逐渐下降, 培养至第 12 d 左右, 水中亚硝态氮含量才开始低于初值.

由表 3 可见, 尽管变化趋势不同, 但栅藻 LX1 对不同形态的氮都有较高的去除率. 培养至 16 d 稳定期时, 对氨氮、亚硝态氮和硝态氮的去除率分别为 95.5%、96.3% 和 85.8%, 浓度分别降到 0.16、0.07 和 2.86 mg·L⁻¹. 总无机氮也有 88.0% 的去除率, 浓度由最初的 26.53 mg·L⁻¹ 降为 3.19 mg·L⁻¹.

2.2.2 磷的去除特性

栅藻 LX1 对废水中溶解性磷的去除效果见图 3.

从图 3 可以看出, 在培养前期栅藻 LX1 对溶解磷的去除速率很快, 第 5 d 开始, 当磷降低到 0.5

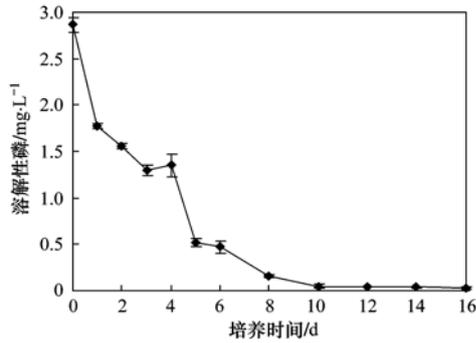


图3 栅藻 LX1 对废水中溶解性磷的去除特性

Fig. 3 Removal property of dissolving phosphate in wastewater by *Scenedesmus* sp. LX1

$\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 以下时,磷的去除速率明显降低. 试验至第 16 d 时,废水中的磷降至 $0.03\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,去除率为 98.8%. 与李鑫等^[21] 和 Li 等^[24,25] 研究结果类似, LX1 对废水中的磷有较好的去除效果.

要使废水处理和能源资源生产有效耦合,单有高的去除率还不够,能以废水为营养源获得性能优越的产油能源微藻是从事耦合基础研究和规模化生产的关键. 为此,本研究在考察栅藻 LX1 生长和氮磷去除特性的同时还进行了其油脂生产能力的分析.

2.3 栅藻 LX1 的油脂生产能力

微藻的油脂生产能力可用微藻油脂生成总量表征. 而微藻油脂生成总量是由藻细胞生物量和单位藻细胞的油脂含量决定的^[26],即微藻油脂生成总量 = 藻细胞生物量 \times 单位藻细胞油脂含量. 因此,藻生物量的积累量和单位藻细胞的油脂含量是体现产油能源微藻应用价值的 2 个重要指标.

为了解栅藻 LX1 在净化水产养殖废水时的油脂生产能力,在培养 18 d 后,测定了藻生物量干重和油脂总产量,分别为 $0.38\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $0.12\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$,由此计算出单位藻细胞的油脂含量为 31.6%. 一般微藻在培养过程中藻细胞的典型生物量(干质量)范围为 $0.3\sim 0.5\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ ^[18],常见的高含油脂藻种的油脂含量普遍处于 20%~50% 的范围,栅藻 LX1 在生活污水二级处理出水中生长时的油脂含量为 33% 及以上^[19,20,27]. 可以看出,栅藻 LX1 在净化水产养殖废水时,藻生物量的积累量和单位藻细胞的油脂含量均处于较高水平,具备能源资源生产潜力.

3 讨论

3.1 栅藻 LX1 对不同形态氮的去除特性

栅藻 LX1 在净化水产养殖废水时,3 种形态氮的去除有明显的先后特性. 氨氮的含量优先快速下

降,其次为硝态氮,最后是亚硝态氮. 分析原因,一方面可能是栅藻 LX1 对 3 种形态氮的吸收有选择性. 藻细胞优先利用水中的氨氮和其他还原态氮,当氨氮浓度很低时才吸收利用水中的硝态氮^[28~30]. 另一方面,藻类光合作用产生氧气,在亚硝化菌和硝化菌的作用下会促进氨氮转化为亚硝态氮和硝态氮,导致培养初期氨氮含量的快速减少. 尽管试验所用废水经过 $0.45\text{ }\mu\text{m}$ 滤膜过滤,但培养体系仍存在有亚硝化菌和硝化菌的可能. 在本研究培养条件下,3 种形态氮之间的相互转化对其去除有无显著影响,尚待进一步试验验证和探讨.

本研究中,亚硝态氮的含量在第 1 d 明显升高,可能是栅藻对硝态氮的利用形式造成的. 硝态氮在进入藻体后,先由硝酸还原酶还原成亚硝态氮,然后再通过亚硝酸还原酶和谷氨酸合成酶最后合成有机物质,细胞内的一些亚硝态氮会随着藻的生长释放到藻体外. 同时,培养液中的亚硝态氮也会被藻利用进入藻体细胞^[31]. 硝酸还原酶是一种底物诱导酶,当培养液中亚硝态氮浓度较低,而硝态氮浓度相对较高时,可诱导藻的硝酸还原酶活性增加^[32],产生更多的细胞内亚硝态氮进入培养液中,使培养液中的亚硝态氮含量上升. 只有当水中的硝态氮浓度较低时,藻细胞才开始大量利用亚硝态氮. 本试验从第 8 d 开始,随着硝态氮含量的下降,水中亚硝态氮的去除速率明显加快,至第 12 d 左右时低于废水初值.

3.2 栅藻 LX1 处理水产养殖废水的优势

传统的污水处理工艺净化水产养殖废水存在众多不足. 胡海燕^[7] 认为,采用污水处理工艺和设备处理水产养殖废水,没有针对其废水特点,将很多的能量和材料浪费在水体充氧上,导致处理成本偏高. 张寒冰等^[5] 研究也表明,没有曝气条件下生物膜法对氨氮、亚硝酸氮的去除率仅为 35% 和 76%. 方圣琼^[8] 和何洁^[9] 等报道了生物滤池会使水中硝酸盐含量增加,硝酸盐的毒性虽比氨氮和亚硝酸盐低,但过度积累同样会影响鱼类生长. 许多研究均证明了传统的生物膜法工艺除磷率很低或无除磷能力,处理废水进入环境后会造富营养化现象^[4,5,9].

利用微藻净化水产养殖废水具有低成本去除氮磷的优势. 胡海燕^[7] 研究指出,螺旋藻对水产养殖废水氨氮的去除效果优于其他所选藻种,适于低氨氮养殖废水的处理. 栗越妍等^[12] 研究表明蛋白核小球藻、斜生栅藻、月牙藻和螺旋鱼腥藻均可去除水产养殖废水中的无机氮和溶解性磷,最大去除率分别为 51.9%、60.9%、43.3%、30.2% 和 22.7%、

76.1%、54.6%、49.5%,各藻种对硝态氮、氨氮和亚硝态氮的最大去除率分别为 64.8%、15.4% 和 98.3%。陈春云等^[13]也研究了小球藻对水产养殖废水中氮磷的去除,氨氮和磷酸盐的去除率分别达到 80% 和 85% 以上。上述研究虽在水产养殖废水净化方面取得了一定效果,但均没有对产生的藻体价值进行资源化研究,而藻体与污泥一样,排入到环境中易产生二次污染,并没有从根本上消除环境污染,也折扣了净化系统的经济效益。

本研究中,栅藻 LX1 对水产养殖废水中的氮磷都有很好的去除效果,氨氮、亚硝态氮、硝态氮和磷的去除率分别为 95.5%、96.3%、85.8% 和 98.8%,与上述处理方法和藻种比较,具有明显的净化优势。同时,栅藻 LX1 在净化水产养殖废水时,能以废水为营养源积累较高的生物量和油脂含量,藻生物量干重和单位藻细胞的油脂含量分别为 $0.38 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 31.6%,具备能源资源生产潜力。由此可见,栅藻 LX1 适于作为水产养殖废水净化和能源资源生产耦合工艺的优选藻种,同步实现废水治理和能源资源的生产。随着水产养殖业的快速集约发展和能源形势的严峻,栅藻 LX1 处理水产养殖废水具有重要的现实意义和广阔的应用前景。

4 结论

(1) 栅藻 LX1 在水产养殖废水中的种群内禀生长速率为 0.44 d^{-1} ,最大种群密度为 7.46×10^6 个 $\cdot \text{mL}^{-1}$,最大种群生物量增长速率为 0.82×10^6 个 $\cdot (\text{mL} \cdot \text{d})^{-1}$ 。

(2) 栅藻 LX1 对水产养殖废水中的氨氮、亚硝态氮、硝态氮和磷的去除率分别为 95.5%、96.3%、85.8% 和 98.8%,具有很好的脱氮除磷效果。

(3) 栅藻 LX1 净化水产养殖废水时,3 种形态氮的去除具有明显的顺序性,依次为氨氮、硝态氮、亚硝态氮。

(4) 栅藻 LX1 的生物量干重为 $0.38 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$,藻细胞油脂含量为 31.6%,具备能源资源生产潜力。

参考文献:

[1] 杨丹菁,靖元孝. 植物在水产养殖废水处理中的研究进展 [J]. 生态科学, 2008, 27(6): 522-526.

[2] 孟睿,何连生,席北斗,等. 芽孢杆菌与硝化细菌净化水产养殖废水的试验研究 [J]. 环境科学与技术, 2009, 32(11): 28-31.

[3] Van Rijn J, Tal Y, Schreier H J. Denitrification in recirculating systems: theory and applications [J]. Aquacultural Engineering, 2006, 34(3): 364-376.

[4] 张海歌,马绍赛,李秋芬,等. 循环水养殖系统 (RAS) 生物载体上微生物群落结构变化分析 [J]. 环境科学, 2011, 32(1): 231-239.

[5] 张寒冰,黄凤莲,周艳红,等. 生物膜法处理养殖废水的研究 [J]. 生态环境, 2005, 14(1): 26-29.

[6] 张文香,王志敏,张卫国. 海水鱼类工厂化养殖的现状与发展趋势 [J]. 水产科学, 2005, 24(5): 50-53.

[7] 胡海燕. 水产养殖废水氨氮处理研究 [D]. 青岛: 中国海洋大学, 2007. 1-142.

[8] 方圣琼,胡雪峰,巫和听. 水产养殖废水处理技术及应用 [J]. 环境污染治理技术与设备, 2004, 5(9): 51-55.

[9] 何洁,刘长发,王海,等. 3 种载体生物滤器对养殖废水处理效果 [J]. 中国水产科学, 2003, 10(3): 241-245.

[10] Behzadi S, Farid M M. Review: examining the use of different feedstock for the production of biodiesel [J]. Asia-Pacific Journal of Chemical Engineering, 2007, 2(5): 480-486.

[11] Marinho-Soriano E, Azevedo C A A, Trigueiro T G, et al. Bioremediation of aquaculture wastewater using macroalgae and *Artemia* [J]. International Biodeterioration & Biodegradation, 2011, 65(1): 253-257.

[12] 栗越妍,孟睿,何连生,等. 净化水产养殖废水的藻种筛选 [J]. 环境科学与技术, 2010, 33(6): 67-70.

[13] 陈春云,庄源益,方圣琼. 小球藻对养殖废水中 N、P 的去除研究 [J]. 海洋环境科学, 2009, 28(1): 9-11.

[14] Wang J K. Conceptual design of a microalgae-based recirculating oyster and shrimp system [J]. Aquacultural Engineering, 2003, 28(1-2): 37-46.

[15] Aslan S, Kapdan I K. Batch kinetics of nitrogen and phosphorus removal from synthetic wastewater by algae [J]. Ecological Engineering, 2006, 28(1): 64-70.

[16] Mata T M, Martins A A, Caetano N S. Microalgae for biodiesel production and other applications: a review [J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2010, 14(1): 217-232.

[17] Brennan L, Owende P. Biofuels from microalgae-A review of technologies for production, processing, and extractions of biofuels and co-products [J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2010, 14(2): 557-577.

[18] 胡洪营,李鑫. 利用污水资源生产微藻生物柴油的关键技术及潜力分析 [J]. 生态环境学报, 2010, 19(3): 739-744.

[19] 胡洪营,李鑫,杨佳. 基于微藻细胞培养的水质深度净化与高价值生物质生产耦合技术 [J]. 生态环境学报, 2009, 18(3): 1122-1127.

[20] Li X, Hu H Y, Yang J. Lipid accumulation and nutrient removal properties of a newly isolated freshwater microalga, *Scenedesmus* sp. LX1, growing in secondary effluent [J]. New Biotechnology, 2010, 27(1): 59-63.

[21] 李鑫,胡洪营,甘柯. 氮元素对贫营养型二形栅藻 LX1 生长及去除氮磷特性的影响研究 [A]. 见: 中国环境科学学会水环境分会. 2008 中国水环境污染控制与生态修复技术高级研讨会论文集 [C]. 广州: 中国环境科学学会水环境分会, 2008. 936-948.

[22] 李鑫,胡洪营,杨佳. LED 红光/蓝光对栅藻 LX1 生长及产

- 油特性的影响 [J]. 环境科学, 2010, **31**(2): 513-519.
- [23] 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.
- [24] Li X, Hu H Y, Gan K, *et al.* Effects of different nitrogen and phosphorus concentrations on the growth, nutrient uptake, and lipid accumulation of a freshwater microalga *Scenedesmus* sp. [J]. *Bioresource Technology*, 2010, **101**(14): 5494-5500.
- [25] Li X, Hu H Y, Gan K, *et al.* Growth and nutrient removal properties of a freshwater microalga *Scenedesmus* sp. LX1 under different kinds of nitrogen sources [J]. *Ecological Engineering*, 2010, **36**(4): 379-381.
- [26] 李涛, 李爱芬, 桑敏, 等. 富油能源微藻的筛选及产油性能评价 [J]. 中国生物工程杂志, 2011, **31**(4): 98-105.
- [27] 李鑫, 胡洪营, 张玉平. 无机碳源对栅藻 LX1 生长及油脂积累特性的影响 [J]. 环境科学, 2011, **32**(8): 2260-2266.
- [28] Hyenstrand P, Burkert U, Pettersson A, *et al.* Competition between the green alga *Scenedesmus* and the cyanobacterium *Synechococcus* under different modes of inorganic nitrogen supply [J]. *Hydrobiologia*, 2000, **435**(1-3): 91-98.
- [29] 马沛明, 况琪军, 刘国祥, 等. 底栖藻类对氮、磷去除效果研究 [J]. 武汉植物学研究, 2005, **23**(5): 465-469.
- [30] 马冬冬. 基于微藻的光-膜组合式生物反应器处理海水养殖业废水 [D]. 青岛: 中国海洋大学, 2005. 24-29.
- [31] 陈卫民. 亚硝酸盐对铜绿微囊藻生理特性的影响 [D]. 天津: 南开大学, 2009. 13-47.
- [32] 王金花, 唐洪杰, 杨茹君, 等. 氮磷营养盐对中肋骨条藻生长及硝酸还原酶活性的影响 [J]. 海洋科学, 2008, **32**(12): 64-68.

《环境科学》多项引证指标名列前茅

2011年12月2日,中国科学技术信息研究所在中国科技论文统计结果发布会上公布了2010年度中国科技论文统计结果.统计结果显示2010年度《环境科学》多项引证指标位居环境科学技术、安全科学技术类科技期刊前列.

综合评价总分86.5,排名第一(排名前三名的期刊分别是《环境科学》86.5,《中国环境科学》77.9,《环境科学学报》77.3).

总被引频次5197,排名第一(排名前三名的期刊分别是《环境科学》5197,《环境科学学报》3914,《农业环境科学学报》3700).

影响因子1.125,排名第三(排名前三名的期刊分别是《环境科学研究》1.531,《中国环境科学》1.457,《环境科学》1.125).

综合评价总分是根据中国科技期刊综合评价指标体系,计算多项科学计量指标(总被引频次、影响因子、他引率、基金论文比、引文率等),采用层次分析法确定重要指标的权重,分学科对每种期刊进行综合评定,计算出每个期刊的综合评价总分.这项指标屏蔽了各个学科之间总体指标背景值的差异,使科技期刊可以进行跨学科比较.根据发布的统计结果,2010年度《环境科学》综合评价总分86.5,在被统计的1998种核心期刊中名列第27位,在被统计的36种环境科学技术、安全科学技术类期刊中名列第一.

CONTENTS

Regional Heterogeneity of Lake Eutrophication Effects in China	CAO Jin-ling, XU Qi-gong, XI Bei-dou, <i>et al.</i> (1777)
Correlating Landscape Pattern with Total Nitrogen Concentration Using a Location-weighted Sink-source Landscape Index in the Haihe River Basin, China	SUN Ran-hao, CHEN Li-ding, WANG Wei, <i>et al.</i> (1784)
Impact of the Land-use Change on the Non-point Source Nitrogen Load in Yunmeng Lake Watershed	MENG Xiao-yun, YU Xing-xiu, PAN Xue-qin (1789)
Residue Characteristics and Distributions of Perfluorinated Compounds in Surface Seawater Along Shenzhen Coastline	CHEN Qing-wu, ZHANG Hong, CHAI Zhi-fang, <i>et al.</i> (1795)
Distribution and Potential Ecological Risk of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Sediments from Typical Electronics Industrial Zone	DENG Dai-yong, QIU Meng-de, SUN Guo-ping, <i>et al.</i> (1801)
Residues and Potential Ecological Risk Assessment of Metal in Sediments from Lower Reaches and Estuary of Pearl River	XIE Wen-ping, WANG Shao-bing, ZHU Xin-ping, <i>et al.</i> (1808)
Character and Sources Identification of Heavy Metals Contamination in Sediment from the Core Sediment in Nanshan Lake, the Zhalong Wetland	SU Dan, ZANG Shu-ying, YE Hua-xiang, <i>et al.</i> (1816)
Distribution Characteristics of Phosphorus Forms in Surface Sediments of the Shantou Bay in China	ZHAO Jian-gang, QIAO Yong-min (1823)
Microcosm Experiments on the Influence of Different N/P Ratios on Phytoplankton Community Growth in the East China Sea	HUANG Wei, ZHU Xu-yu, ZENG Jiang-ning, <i>et al.</i> (1832)
Species Composition and Distribution Characteristics of Pelagic Copepods in the Northern Sea of Fujian During Withdraw of Zhe-Min Coastal Current	WANG Yan-guo, LIN Jing-hong, WANG Chun-guang, <i>et al.</i> (1839)
PAHs Concentrations in Aquatic Products and Food Safety Evaluation in the Coupled Mangrove Planting-Aquaculture Ecological System	CHEN Guan-qiu, LI Yao-chu, HUANG Jin-mu, <i>et al.</i> (1846)
Tissue Distribution and Bioconcentration Factors of Tetrabromobisphenol A in Five Fishes in Lake Chaohu	YANG Su-wen, WANG Sheng-rui, YAN Zhen-guang, <i>et al.</i> (1852)
Induction Effects of Pentachlorophenol on Vitellogenin and p53 in Chinese Rare Minnow (<i>Gobiocypris rarus</i>)	XIONG Li, MA Yong-peng, ZHANG Xiao-zheng, <i>et al.</i> (1858)
Effects of Perfluorooctane Sulfonate (PFOS) Exposure on Vitellogenin mRNA Level in Zebrafish (<i>Brachydanio rerio</i>)	CHENG Yan, CUI Yuan, DANG Zhi-chao, <i>et al.</i> (1865)
Relationship Between Electron Transfer Capacity and Fluorescence Characteristics of Dissolved Organic Matter	TAO Ya, YUAN Tian, ZHOU Shun-gui, <i>et al.</i> (1871)
Characterization of the Change in DOM During Municipal Secondary Effluent Treatment with Magnetic Ion Exchange Resin by 3DEEM	YANG Jian, GAO Jin-hua, CHANG Jiang (1878)
Reverse Osmosis Membrane Fouling by Humic Acid Using XDLVO Approach; Effect of Calcium Ions	YAO Shu-di, GAO Xin-yu, GUO Ben-hua, <i>et al.</i> (1884)
Growth, Removal of Nitrogen and Phosphorus, and Lipid Accumulation Property of <i>Scenedesmus</i> sp. LX1 in Aquaculture Wastewater	MA Hong-fang, LI Xin, HU Hong-ying, <i>et al.</i> (1891)
Iron Chloride for Simultaneous Denitrification and Chemical-Biological Flocculation Process	WANG Hong-jie, DONG Wen-yi, LIU Li-sha, <i>et al.</i> (1897)
Characteristic Research of Shortcut Denitrification in Synthetic Ammonia Industrial Wastewater Treatment Process	LI Yan, LI Ze-bing, MA Jia-xuan, <i>et al.</i> (1902)
Stability Control of Aerobic Granules Using an Innovative Reactor	LI Zhi-hua, YANG Fan, LI Sheng, <i>et al.</i> (1907)
Description of the Stability of Granules Using Nongrowth-related Parameters	LI Zhi-hua, WU Jun, LI Sheng, <i>et al.</i> (1913)
Enhancement of Anaerobic Digestion of Excess Sludge by Acid-Alkali Pretreatment	YUAN Guang-huan, ZHOU Xing-qiu, WU Jian-dong (1918)
Pilot Validation of Sludge Concentration Partition at Small Reflux Ratio Condition	SHI Si, WANG Su-lan, LI Rui, <i>et al.</i> (1923)
Influence of Non-ionic Surfactants on Sludge Dewaterability	HOU Hai-pan, PU Wen-hong, SHI Ya-fei, <i>et al.</i> (1930)
Variation Characteristics and Influencing Factors of Air Pollution Index in China	LI Xiao-fei, ZHANG Ming-jun, WANG Sheng-jie, <i>et al.</i> (1936)
Characteristics of Aerosol Water-Soluble Inorganic Ions in Three Types Air-Pollution Incidents of Nanjing City	ZHANG Qiu-chen, ZHU Bin, SU Ji-feng, <i>et al.</i> (1944)
Characterization of Atmospheric PM _{2.5} in the Suburb of Shenzhen	DAI Wei, GAO Jia-qi, CAO Gang, <i>et al.</i> (1952)
Analysis on Oil Fume Particles in Catering Industry Cooking Emission	TAN De-sheng, KUANG Yuan-cheng, LIU Xin, <i>et al.</i> (1958)
Low-Temperature Catalytic Reduction of NO over Fe-MnO _x -CeO ₂ /ZrO ₂ Catalyst	LIU Rong, YANG Zhi-qin (1964)
CO ₂ Absorption and Regeneration Performance of a Natural Amino Acid and Its Potassium Salt	YAN Shui-ping, CHEN Jing-ao, XU Ming-liang, <i>et al.</i> (1971)
Effects of Tillage-Cropping Systems on Methane and Nitrous Oxide Emissions from Agro-Ecosystems in a Purple Paddy Soil	ZHANG Jun-ke, JIANG Chang-sheng, HAO Qing-ju, <i>et al.</i> (1979)
Factors Influencing Ammonia Volatilization in a Winter Wheat Field with Plastic Film Mulched Ridges and Unmulched Furrows	SHANGGUAN Yu-xian, SHI Ri-peng, LI Na, <i>et al.</i> (1987)
Effects of Typical Herbicides on Soil Respiration and N ₂ O Emissions from Soil Added with Different Nitrogen Fertilizers	SUN Qing, SHI Chun-xing, SHI Kun, <i>et al.</i> (1994)
Analysis of Characteristics of Dioxin Contamination in the Chlor-alkali Site that Uses Graphite Anode for Production	YU Li-feng, WEI Wen-xia, TIAN Ya-jing, <i>et al.</i> (2000)
Effect of Flue Gas Desulfurization Gypsum Application on Remediation of Acidified Forest Soil	LUO Yao, KANG Rong-hua, YU De-xiang, <i>et al.</i> (2006)
Morphology of Soil Iron Oxides and Its Correlation with Soil-Forming Process and Forming Conditions in a Karst Mountain	ZHANG Zhi-wei, ZHU Zhang-xiong, FU Wa-li, <i>et al.</i> (2013)
Pb, Zn Accumulation and Nutrient Uptake of 15 Plant Species Grown in Abandoned Mine Tailings	SHI Xiang, CHEN Yi-tai, WANG Shu-feng, <i>et al.</i> (2021)
Effect of Cr(VI) Stress on Growth of Three Herbaceous Plants and Their Cr Uptake	WANG Ai-yun, HUANG Shan-shan, ZHONG Guo-feng, <i>et al.</i> (2028)
Bioaccumulation of Heavy Metals by the Dominant Plants Growing in Huayuan Manganese and Lead/Zinc Mineland, Xiangxi	YANG Sheng-xiang, TIAN Qi-jian, LIANG Shi-chu, <i>et al.</i> (2038)
Effect of CO ₂ Fertilization on Residual Concentration of Cypermethrin in Rhizosphere of C3 and C4 Plant	MU Nan, DIAO Xiao-jun, WANG Shu-guang, <i>et al.</i> (2046)
Bioaugmented Removal of Pyridine and the Microbial Community Dynamic Analysis	QIAO Lin, ZHAO Hong, WANG Jian-long (2052)
Relationship Between Sewage Treatment Efficiency and Bacterial Community Diversity in an A/O MBR	KUANG Bin-yu, SHI Qing, Montcho Leon Monthero, <i>et al.</i> (2061)
Dynamic Changes in Functional Genes for Nitrogen Cycle During Bioremediation of Petroleum-Contaminated Soil	WU Bin-bin, LU Dian-nan, LIU Zheng (2068)
Risk Assessment of Lead Exposure from Different Intake Pathways for Children in Wuhan City	HAO Han-zhou, CHEN Tong-bin, WU Ji-liang, <i>et al.</i> (2075)
Implementation of a Pretreatment Device for an Electronic Nose	BU Fan-yang, WEN Xiao-gang, WAN Mei, <i>et al.</i> (2083)
Copper and Cadmium Toxicities to Activated Sludge Investigated with ToxTell Biosensor	WANG Xue-jiang, WANG Xin, LIU Mian, <i>et al.</i> (2090)
Matrix Effect and Control of Immunoassay for Environmental Samples	SHENG Jian-wu, HE Miao, SHI Han-chang (2095)
Study on Vitrification of Simulated Medical Wastes by Thermal Plasma	ZHANG Lu, YAN Jian-hua, DU Chang-ming, <i>et al.</i> (2104)
Study on the Low Temperature Drying of Components of Municipal Solid Waste and Its Model Analysis	WU Ya-juan, LIU Hong-mei, LU Sheng-yong, <i>et al.</i> (2110)
Aerogenesis Evolution of the Anaerobic-semiaerobic Bioreactor Landfill	HAN Zhi-yong, LIU Dan, LI Qi-bin (2118)
Performance of Microbial Fuel Cells with Fe/C Catalyst Carbon Felt Air-Cathode for Treating Landfill Leachate	TANG Yu-lan, PENG Man, YU Yan, <i>et al.</i> (2125)
Relationships Between Soil and Rocky Desertification in Typical Karst Mountain Area Based on Redundancy Analysis	LONG Jian, LIAO Hong-kai, LI Juan, <i>et al.</i> (2131)
Energy Consumption and GDP Growth in Beijing: Cointegration and Causality Analysis	CHEN Cao-cao, ZHANG Yan, LIU Chun-lan, <i>et al.</i> (2139)

《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)

2012年6月15日 33卷 第6期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 33 No. 6 Jun. 15, 2012

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: 70.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行