

藻菌固定化用于市政污水深度脱氮除磷及藻体产油研究

陈丽萍, 沈俏会, 方文哲, 龚宇鹏, 程丽华

浙江大学环境与资源学院, 杭州 310058

摘要 污水再生利用是解决水资源与能源危机的重要途径, 采用微藻深度处理污水并生产生物质能源是一大热点。针对市政污水深度处理, 以活性污泥为固定化细菌, 采用小球藻和栅藻, 分别比较了固定化藻菌、固定化微藻, 以及悬浮态微藻在藻体生长、污水脱氮除磷和微藻产油方面的差异, 拟实现对市政污水深度脱氮除磷的同时实现微藻油脂的诱导富集。结果表明, 固定化藻菌对氮磷的去除效果优于固定化微藻和悬浮态微藻, 且固定化藻菌中微藻油脂质量分数最高。当市政污水 NH_4^+-N 和 $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ 的初始质量浓度分别为 25 和 3 mg/L 时, 固定化栅藻菌培养 4 d 后能够完全去除水体中的氮磷, 而固定化藻菌中小球藻的油脂质量分数可达到 16.5%。

关键词 微藻; 脱氮除磷; 生物能源

中图分类号 X703

文献标志码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2015.14.011

Removal of nitrogen and phosphorus and the lipid production by co-immobilized microalgae and bacteria in municipal wastewater

CHEN Liping, SHEN Qiaohui, FANG Wenzhe, GONG Yupeng, CHENG Lihua

College of Environmental & Resource Sciences, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China

Abstract The wastewater reuse is an important way out facing the water resource and energy crisis, and the coupled process of the advanced wastewater treatment and the microalgal energy production is an important issue in this respect. In this paper, the activated sludge as the fixing bacteria is immobilized with *Chlorella vulgaris* and *Scenedesmus obliquus*, respectively, for the enhanced municipal wastewater treatment. The microalgal growth, the nitrogen and phosphorus removal and the oil production of the co-immobilized microalgae and bacteria, the immobilized microalgae, and the suspended microalgae are then compared. It is shown that the co-immobilized bacteria and algae are better than the immobilized bacteria and the immobilized algae in their effect on the nitrogen and phosphorus removal, and better than the non immobilized algae and bacteria as well, while the co-immobilized bacteria and algae produce much more lipid. When the concentrations of the NH_4^+-N and $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ in the municipal wastewater are about 25 mg/L and 3 mg/L, the NH_4^+-N and $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ in the wastewater are removed completely by the co-immobilized *Scenedesmus obliquus* and bacteria, whereas the lipid yield of *C. vulgaris* reaches 16.5%.

Keywords microalgae; nitrogen and phosphorus removal; bioenergy

市政污水中氮磷等营养物质的污染问题已经引起普遍关注^[1], 常规的污水生物处理工艺虽然能够去除污水中大部分有机和无机污染物, 但对氮磷营养物质的去除效果较差;

化学法除磷的效果很好, 但药剂成本高, 且使大量的磷从污水中转移到剩余污泥中, 从根本上看仍然不能消除磷对生态环境的影响。利用藻菌共生系统中微藻在生长过程中需要

收稿日期: 2015-05-03; 修回日期: 2015-06-01

基金项目: 国家自然科学基金项目(21106130, 21276221)

作者简介: 陈丽萍, 硕士研究生, 研究方向为固定化藻菌共生系统脱氮除磷及产油, 电子信箱: 21214028@zju.edu.cn; 程丽华(通信作者), 副教授, 研究方向为环境生物技术, 电子信箱: chenglihua@zju.edu.cn

引用格式: 陈丽萍, 沈俏会, 方文哲, 等. 藻菌固定化用于市政污水深度脱氮除磷及藻体产油研究[J]. 科技导报, 2015, 33(14): 65-69.

吸收氮、磷等营养物质这一特性,可将微藻用于市政污水二级出水的深度脱氮除磷,该系统去除水中的氮和磷具有能耗小的优点^[2],藻类光合作用释放的氧气为微生物的生长提供了丰富的氧源,而微生物代谢所释放出的CO₂成为藻类的主要碳源,又促进了藻类的光合作用。同时微藻与其他生物质资源相比,微藻本身具有光合作用效率高、生长周期短、油脂含量高、不占地等优点^[3],美国一项微藻生产生物柴油的能源计划研发出了由微藻萃取油脂并转化成生物柴油的过程,并指出藻类可累积油脂高达藻体干重的60%,该油脂与高等植物油相似,都属甘油三酯(TAG,又称中性脂,油脂)^[4]。因此在当今各国能源需求日益增加而常规能源面临短缺的背景下^[5],将上述微藻制备油脂与微藻深度脱氮除磷两项技术耦合^[6],可提高整体经济效益,推动其在生活污水处理厂的实际应用^[7,8]。

常规藻菌共生系统存在生物量少、藻类难以收获、水力停留时间长、油脂含量低等问题^[9]。为提高细菌和藻类的质量浓度^[10],De-Bashan等^[11]将巴西固氮菌与微藻包埋在海藻酸钙中用于二级出水脱氮除磷研究,研究了巴西固氮菌与小球藻固定化进行脱氮除磷及产油;Su等^[12]选择了3株绿藻(小球藻(*Chlorella vulgaris*)、栅藻(*Scenedesmus obliquus*)、衣藻(*Chlamydomonas reinhardtii*))处理城市污水厂二级出水,实验表明这3株藻的脱氮除磷能力较高;Feng等^[13,14]利用小球藻进行模拟二级出水的脱氮除磷,2 d后其脱氮除磷率达到94%,油脂含量达到42%。王爱丽等^[15]将活性污泥与小球藻固定化,研究了市政污水的深度脱氮除磷;邢丽贞等^[16]研究了蛋白核小球藻与活性污泥固定化后对氮磷的处理;寇希元等^[16]将海藻酸钠凝胶包埋固定小球藻和活性污泥,对冲厕海水污水中的氮磷污染物进行去除实验,对氮磷的去除率大大提高。国内关于藻菌固定化的研究主要集中于污水的脱氮除磷方面,未见藻菌固定化产油的相关研究。

本研究针对市政污水的二级出水进行深度处理,以活性污泥为固定化细菌,采用小球藻和栅藻,分别比较固定化藻菌、固定化微藻及悬浮态微藻在藻体生长、污水脱氮除磷和微藻产油方面的差异,拟实现对市政污水深度脱氮除磷的同时实现微藻油脂的诱导富集。

1 材料与方法

1.1 实验材料及培养

实验采用的普通小球藻(*Chlorella vulgaris*)和栅藻(*Scenedesmus obliquus*)由中国科学院武汉水生生物研究所提供,培养基均采用SE培养基;实验所用的细菌用活性污泥代替,活性污泥取自临安市市政污水处理厂二沉池,污泥中发挥作用的优势菌主要是硝化细菌、光合细菌和芽孢杆菌^[17]。

藻类的培养:在无菌的紫外超净工作台上用灭菌量筒接种一定量的藻种(使培养基的接种密度为 1×10^6 个/L)于含150 mL SE培养基的250 mL锥形瓶中,振荡混匀,置于恒温

振动光照培养箱中,在温度(25±1)℃,光强2000~4000 lx,连续光照条件下培养。

SE培养基配制方法^[18,19]为:NaNO₃ 0.25 g/L, K₂HPO₄ 0.75 g/L, MgSO₄·7H₂O 0.075 g/L, CaCl₂·2H₂O 0.025 g/L, KH₂PO₄ 0.175 g/L, NaCl 0.025 g/L, FeCl₃·6H₂O 0.025 g/L, EDTA-Fe 1 mL, A₅^{*} 1 mL, 土壤提取液^[20] 40 mL, 蒸馏水 958 mL。其中A₅^{*}溶液(A₅ solution)配制方法:H₃BO₃ 286 mg, MnCl₂·4H₂O 181 mg, ZnSO₄·7H₂O 22.2 mg, CuSO₄·5H₂O 7.9 mg, (NH₄)₆Mo₇O₂₄·4H₂O 3.9 mg及Co(NO₃)₂·6H₂O 4.9 mg,加蒸馏水定容至100 mL。

小球藻^[21],绿球藻目,小球藻科,小球藻属,又可称为普通小球藻,单细胞,球形,壁很薄。色素体杯状,占细胞的大部分。具有1个蛋白核,直径5~10 μm,生殖个体的直径有时可超过20 μm。分布于含有机物质丰富的小型水体中,在水洼、池塘及浅水湖湾中较常见,水边潮湿土壤上有时亦可发现。

栅藻^[21],又称栅列藻,绿藻门绿球藻目。细胞常为椭圆形或纺锤形,以长轴排成1~2列或多列。栅藻是淡水中常见的浮游藻类,极喜在营养丰富的净水中繁殖。

人工污水配置方法:为防止实际污水中一些其他物质干扰测定结果,并保持污水稳定,本实验采用人工污水^[22]。配制方法:柠檬酸 3 mg, FeSO₄·7H₂O 5 mg, EDTA 0.5 mg, Na₂CO₃ 10 mg, A₅^{*} 1 mL, KNO₃ 180.35 mg, KH₂PO₄ 13.2 mg, MgSO₄(痕量), CaCl₂(痕量),加入1000 mL水中。人工污水与市政污水的氮磷质量浓度一致, NH₄⁺-N质量浓度为20~30 mg/L, PO₄³⁻-P质量浓度为2~3 mg/L。

1.2 实验仪器

SPX-G光照培养箱(上海博讯实业有限公司);LDZX-40CI型立式自动电热压力蒸汽灭菌器(上海博讯实业有限公司);721型可见分光光度计(上海精密科学仪器有限公司);CX37型生物显微镜(上海尚光显微镜有限公司);JA2003型电子天平(上海精密科学仪器有限公司);TGL-16G型台式离心机(上海安亭有限公司)

1.3 测定方法

NH₄⁺-N测定采用纳氏试剂分光光度法;PO₄³⁻-P测定采用钼锑抗分光光度法^[23]。

藻体质量的测定,光密度OD₅₄₀/OD₆₈₀^[24]:用分光光度法测定小球藻/栅藻液在540 nm/680 nm波长处的吸光度,间接反应水中悬浮藻类的量。

油脂含量的测定^[25]:取一定量研磨充分的干燥的微藻胶球脱固定化后加蒸馏水配制为稀释藻液,用紫外分光光度计测定其在680 nm处的吸光度,取稀释液3 mL加入一定量的尼罗红染液进行染色,于37℃避光染色10 min,荧光分光光度计测定其荧光度,激发波长480 nm,增益10档。荧光强度/OD₆₈₀带入公式计算藻体油脂含量:

$$Y_N = 0.0033X_N - 0.0042 \quad (1)$$

式中, X_N为藻体的荧光强度, Y_N为油脂质量分数, %

1.4 实验设计与方法

1.4.1 细菌与微藻的固定化及解固定化方法

将进入稳定生长期的微藻离心浓缩,弃去上清液,然后用无氮、磷的培养基悬浮,通过细胞计数及计算后,藻类细胞浓缩液、新鲜活性污泥的浓缩液与预先灭菌的5%的海藻酸钠溶液以1:1:2的体积比混合,搅匀^[21];用7号注射器分别吸取一定量的上述混合液,距离20 cm注入装有预冷的质量分数为5%的CaCl₂溶液的烧杯中,即形成一定数量的小球藻、活性污泥及藻菌固定化胶球,胶球在CaCl₂溶液中静置2 h后备用,胶球直径在3 mm左右^[26]。

在测定固定化藻的生长等生理特性时需先脱固定化,定时取一定体积的废水和一定数量的胶球,废水用于测试氮磷质量浓度,胶球放入加有10 mL 1.5%的柠檬酸钠水解液的离心管中,摇动直至胶球完全溶解或成悬浮态,用于测定藻细胞生物量^[27]。

1.4.2 藻菌混合固定化及对污水的净化

取3个250 mL的锥形瓶,加入经过灭菌的人工污水200 mL,分别放入微藻胶球、藻菌混合的固定化胶球500个,分3组实验。污水以无机碳为碳源,在光照4000 lx、温度(25±1)℃下培养,光照比为12:12。每12 h取水样测定NH₄⁺-N、PO₄³⁻-P的质量浓度和藻体生物量、油脂产量。

2 结果与讨论

2.1 固定化藻菌的藻体生长

图1为小球藻、栅藻的固定化藻菌与固定化微藻、悬浮态微藻的藻体生长的比较。可以看出,固定化藻菌的藻体生长明显高于固定化微藻,悬浮态微藻的藻体生长高于固定化微藻。培养4 d后,固定化小球藻和固定化小球藻菌的生物量分别为0.98和1.05 mg/L,固定化栅藻和固定化栅藻菌的生物量分别为1.11和1.23 mg/L,小球藻与栅藻混合固定化比单一固定化生物量多0.07和0.12 mg/L,而悬浮态小球藻和栅藻的藻体生物量分别为1.05和1.15 mg/L。可见固定化藻菌的藻体生长较固定化微藻和悬浮态微藻更快。

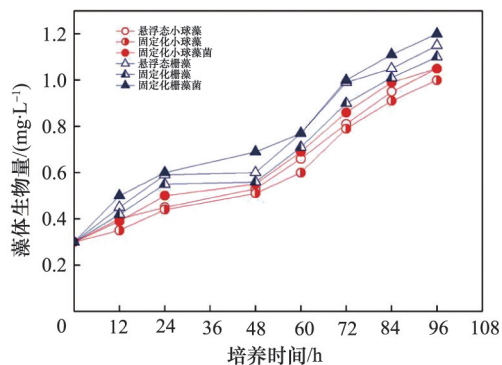


图1 固定化藻菌的藻体生长

Fig. 1 Biomass of co-immobilized microalgae and bacteria

2.2 固定化藻菌脱氮除磷

尽管固定化会阻碍微藻接受阳光以及吸收水体中的营养盐,抑制微藻的生长^[28],如图1所示,固定化小球藻与栅藻的生物量均低于悬浮态,但是采用活性污泥和微藻共固定化,藻与菌两者可以互补。小球藻和栅藻在生长过程中进行光合作用,产生为细菌所利用的氧气同时又能吸收污水中的氮磷;而活性污泥中的细菌代谢过程中产生CO₂供给藻类,结果固定化藻菌可能显示出更高的脱氮除磷作用^[28]。

图2为小球藻和栅藻的固定化藻菌、固定化微藻和悬浮态微藻的脱氮效果对比。由图2可以看出,4 d后,污水中的NH₄⁺-N质量浓度显著降低,其中固定化藻菌的脱氮效果明显高于固定化微藻和悬浮态微藻,而且栅藻的脱氮效果高于小球藻。培养4 d后,空白胶球吸附稳定的水体中NH₄⁺-N质量浓度为22.8 mg/L,可以计算出空白固定化胶球吸附的NH₄⁺-N为2.8 mg/L,固定化细菌吸附稳定的水体NH₄⁺-N的质量浓度为21.9 mg/L,因此固定化细菌胶球吸附的NH₄⁺-N为3.1 mg/L。

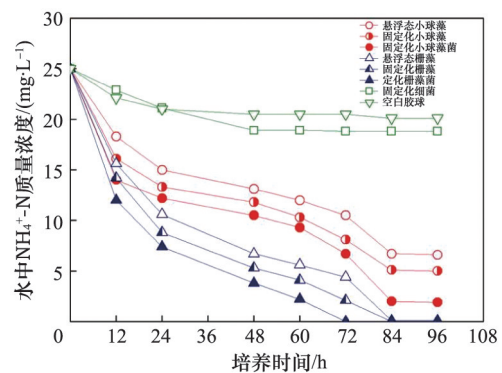


图2 固定化藻菌去除污水中NH₄⁺-N

Fig. 2 Removal by NH₄⁺-N in wastewater with co-immobilized microalgae and bacteria

污水脱氮过程中,扣除固定化胶球吸附的NH₄⁺-N的量,培养4 d后,经固定化栅藻菌处理的污水中NH₄⁺-N质量浓度由初始21.9 mg/L下降到0.1 mg/L,经固定化栅藻处理的污水中NH₄⁺-N质量浓度由初始22.8 mg/L下降到1.3 mg/L,而由悬浮态栅藻脱氮后污水中NH₄⁺-N质量浓度由初始25 mg/L下降到3.6 mg/L。通过比较得出,固定化栅藻菌、固定化栅藻和悬浮态栅藻的藻体处理的NH₄⁺-N分别为21.8、21.5和21.4 mg/L,因此栅藻的脱氮效果为固定化藻菌>固定化微藻>悬浮态微藻。

图3为小球藻和栅藻的固定化藻菌、固定化微藻和悬浮态微藻的除磷效果对比。可以看出,小球藻和栅藻的除磷效果与脱氮效果一致,经过4 d后,污水中的PO₄³⁻-P质量浓度显著降低,但小球藻和栅藻的除磷效果更明显,曲线下降更快;其中固定化藻菌的除磷效果也明显高于固定化微藻和悬浮态微藻,并且栅藻的除磷效果也高于小球藻。培养4 d后,空

白胶球吸附稳定的水体中 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 质量浓度为2.5 mg/L, 计算出空白固定化胶球吸附的 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 为0.5 mg/L; 固定化细菌吸附稳定的水体中 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 的质量浓度为2.4 mg/L, 固定化细菌胶球吸附的 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 质量浓度为0.6 mg/L。同样在除磷过程中, 扣除固定化胶球吸附的 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 的量, 培养1 d后, 经处理的污水中固定化栅藻菌、固定化栅藻和悬浮态栅藻的藻体处理的 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 分别为2.5、2.4和2.3 mg/L, 4 d后污水中的磷完全去除。因此栅藻的除磷效果与脱氮效果一致, 表现为固定化藻菌 > 固定化微藻 > 悬浮态微藻。

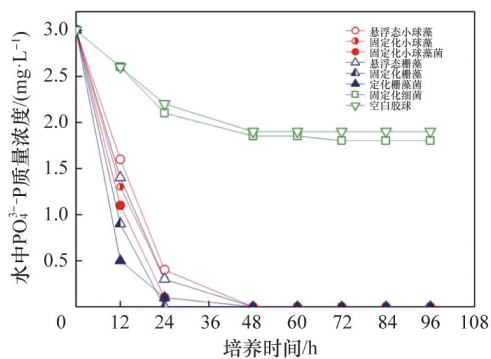


图3 固定化藻菌去除污水中 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$
Fig. 3 Removal of $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ in wastewater by co-immobilized microalgae and bacteria

由图2和图3可以看出, 在氮和磷的初始质量浓度分别为25和3 mg/L时, 栅藻的固定化藻菌在培养4 d后能够完全去除水体中的磷, 氮的质量浓度也下降到0.1 mg/L。王爱丽等^[15]对小球藻与活性污泥的固定化研究发现, 在氮磷初始质量浓度分别为20~30和2~3 mg/L时, 经固定化胶球处理4 d后污水中的氮磷含量分别为12~18和1~1.2 mg/L。可见本研究效果优于王爱丽等的研究。这可能与本研究的栅藻与小球藻藻体的脱氮除磷差异有关, 以及栅藻培养到代谢最旺盛的时期进行脱氮除磷有关。

2.3 固定化藻菌产油

图4是固定化藻菌与固定化微藻、悬浮态微藻产油的比较。通常认为, 微藻产油发生在环境条件抑制, 如氮、磷不足的情况下。固定化容易形成氮、磷抑制, 进而促进油脂含量上升, 具体的量化条件有待于进一步研究。从图4可以看出, 微藻的油脂含量不断上升, 与脱氮除磷趋势(图2和图3)相反, 而且固定化藻菌的产油效果明显高于固定化微藻和悬浮态微藻。由于藻体本身的差异, 小球藻的油脂产量明显高于栅藻。由于微藻和细菌在固定化过程中可以改善藻体自身的代谢调控, 能够提升藻细胞自身的产油功能。

培养4 d后, 小球藻的固定化藻菌、固定化和悬浮态的油脂质量分数为16.5%、14.1%和13%, 而栅藻的固定化藻菌、固定化和悬浮态的油脂质量分数为8.3%、7.9%和7.25%。由图4可以看出, 固定化活性污泥与小球藻在培养4 d后藻体中的油脂质量分数高于固定化小球藻和悬浮态小球藻的; De-

Bashan等^[11]将巴西固氮菌与小球藻UTEX2714固定化, 培养10 d后, 藻体的油脂质量分数比之前增大了4倍。由于本实验模拟的市政污水与De-Bashan研究所需的二级污水在氮磷质量浓度, 固定化细菌等方面存在差异, 因此导致藻体的油脂质量分数不同。

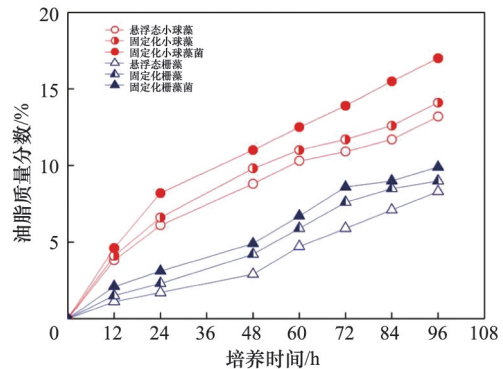


图4 固定化藻菌产油效果
Fig. 4 Lipid content of co-immobilized microalgae and bacteria

综上所述, 固定化藻菌对氮磷的去除效果优于固定化微藻和悬浮态微藻, 且固定化藻菌中藻体油脂含量最高。

3 结论

研究了小球藻与栅藻的固定化藻菌在藻体生长、脱氮除磷和产油等方面的特点与优势:

- 1) 固定化藻菌能够促进藻体生长, 小球藻与栅藻的固定化藻菌的藻体生长明显高于固定化小球藻和固定化栅藻。
- 2) 固定化藻菌对氮磷的去除效果优于固定化微藻和悬浮态微藻, 培养4 d后, 固定化小球藻菌处理的污水中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 质量浓度由初始分别为25和3 mg/L下降到2和0 mg/L, 固定化栅藻菌完全去除水体中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 。
- 3) 固定化藻菌中微藻油脂质量分数最高。小球藻和栅藻的固定化藻菌的油脂质量分数分别为16.5%和8.2%, 小球藻在产油方面较栅藻具有很大优势。

固定化藻菌可以同时解决藻菌共生系统中生物量少、藻类难以收获等缺点, 大大提高了藻菌质量浓度, 达到很好的脱氮除磷效果^[3], 该研究表明固定化藻菌在市政污水深度脱氮除磷及资源化利用方面具有一定的应用潜力。

参考文献 (References)

- [1] 黄晟, 吴慧英, 陈建红. 城市污水除磷中的有关问题[J]. 重庆环境科学, 2001, 23(5): 5-9.
Huang Sheng, Wu Huiying, Chen Jianhong. Discussion on phosphorus removal in the wastewater of the city[J]. Chongqing Environmental Science, 2001, 23(5): 5-9.
- [2] 郑兴灿. 城市污水生物除磷脱氮工艺方案的选择[J]. 给水排水, 2000, 26(5): 115-118.

- Zheng Xingcan. The process scheme selection of biological removal of nitrogen and phosphorus in city sewage[J]. Water Supply Drainage, 2000, 26(5): 115-118.
- [3] 邢丽贞, 张向阳, 张波, 等. 藻菌固定化去除污水中氮磷营养物质的初步研究[J]. 环境科学与技术, 2006, 29(1): 33-35.
Xing Lizhen, Zhang Xiangyang, Zhang Bo, et al. Preliminary study on removal of nitrogen and phosphorus with co-immobilized microalgae and bacteria[J]. Environmental Science and Technology, 2006, 29(1): 33-35.
- [4] Mata T M, Martins A A, Csetano N S. Microalgae for biodiesel production and other applications: A review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2010, 14(1): 217-232.
- [5] Huang G H, Chen F, Wei D, et al. Biodiesel production by microalgal biotechnology[J]. Applied Energy, 2010, 87(1): 38-46.
- [6] Pittman J K, Dean A P, Osundeko O. The potential of sustainable algal biofuel production using wastewater resources[J]. Bioresource Technology, 2011, 102(1): 17-25.
- [7] 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.
Hu Hongying, Li Xin, Yang Jia. Purification and high value of coupling technique of deep water biomass production based on microalgae cultivation[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2009, 18(3): 1122-1127.
- [8] 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在分析[J]. 生态环境学报, 2010, 19(3): 739-744.
Hu Hongying, Li Xin. The key technology of utilization of sewage resources in the production of microalgal biodiesel and potential analysis [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2010, 19(3): 739-744.
- [9] Converti A, Casazza A A, Oriz E Y, et al. The effect of temperature and nutrient concentration on the growth, nutrient uptake, and lipid accumulation of a freshwater microalgae *Scenedesmus* sp.[J]. Bioresource Technology, 2010, 101(14): 5494-5500.
- [10] Hu H H, Gao K S. Response of growth and fatty acid compositions of *Nannochloropsis* sp. to environmental factors under elevated CO₂ concentration[J]. Biotechnology Letters, 2006, 28(13): 987-992.
- [11] De-Bashan L E, Hernandez J P, Bashan Y. Microalgae growth-promoting bacteria as "helpers" for microalgae: A novel approach for removing ammonium and phosphorus from municipal wastewater[J]. Water Research, 2004, 38(19): 466-474.
- [12] Su Y, Mennerich A, Urban B. Comparison of nutrient removal capacity and biomass settleability of four highpotential microalgal species[J]. Bioresource Technology, 2012, 124: 157-162.
- [13] Li X, Hu H Y, Yang J. Lipid accumulation and nutrient removal properties of a newly isolate freshwater microalgae, *Scenedesmus* sp. LX1 growing in secondary effluent[J]. New Biotechnology, 2010, 27(1): 59-63.
- [14] Feng Y J, Li C, Zhang D W. Lipid production of *Chlorella vulgaris* cultured in artificial wastewater medium[J]. Bioresource Technology, 2011, 102(1): 101-105.
- [15] 王爱丽, 宋志慧, 王福明. 藻菌混合固定化及其对污水的净化[J]. 环境污染与防治, 2005, 27(9): 654-657.
Wang Aili, Song Zhihui, Wang Fuming. Phycomycete mixed immobilization and purification of sewage[J]. Environmental Pollution and Control, 2005, 27(9): 654-657.
- [16] 寇希元, 张晓青, 张雨山, 等. 固定化藻菌去除海水冲厕污水中氮磷的实验研究[J]. 环境工程学报, 2011, 5(12): 2703-2706.
Kou Xiyuan, Zhang Xiaoqing, Zhang Yushan, et al. Experimental study on the removal of nitrogen and phosphorus in seawater toilet flushing sewage with immobilized microalgae and bacteria[J]. Journal of Environmental Engineering, 2011, 5(12): 2703-2706.
- [17] 范唯. 固定化藻菌系统处理焦化废水的模拟研究[D]. 武汉: 武汉科技大学, 2008.
Fan Wei. Simulation study on treatment of coking wastewater by immobilized algae and bacteria[D]. Wuhan: Wuhan University of Science and Technology, 2008.
- [18] Battistoni P, Pavan P, Cecchi. EPhosphate removal in real anaerobic supematants modelling and performance of a fluidized bed reactor[J]. Water Science and Technology, 1998, 38(1): 275-283.
- [19] Lind B B, Banz, Byden S. Nutent recovery from human urine by struvite crystallization with ammonia adsorption on zeoliteand wollastonite[J]. Bioresources Technology, 2000, 73(2): 169-174.
- [20] Kazuyoshi S, Yasuo T, Takashi O, et al. Removal of phosphate magnesium and calcium from swine wasterwater through crystallization enhanced by aeration[J]. Water Research, 2002, 36(12): 2991-2998.
- [21] 余雄奎. 固定化藻菌生物修复富营养化水体的模拟研究[D]. 武汉: 武汉科技大学, 2008.
Yu Xiongkui. Simulation study of biological remediation of eutrophic water with immobilized microalgae and bacteria[D]. Wuhan: Wuhan University of Science and Technology, 2008.
- [22] 邢丽贞. 固定化藻类去除污水中氮磷及其机理的研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2005.
Xing Lizhen. Study on the removal of nitrogen and phosphorus with immobilized algae[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2005.
- [23] 国家环境保护局. 水和废水监测分析方法[M]. 第3版. 北京: 中国环境科学出版社, 1989: 254-286.
Environmental Protection Administration of China. Water and wastewater monitoring method[M]. 3rd ed. Beijing: Chinese Environment Science Press, 1989: 254-286.
- [24] 刘学铭, 于若黔, 梁世中. 分批异样培养小球藻光密度值与干重关系[J]. 微生物学通报, 1999, 5(5): 339-341.
Liu Xueming, Yu Ruoqian, Liang Shizhong. Optical density and dry weight relationship of batch strange cultured *Chlorella*[J]. Journal of Microbiology, 1999, 5(5): 339-341.
- [25] Feng G D, Zhang F, Cheng L H, et al. Evaluation of FT-IR and Nile Red methods for microalgal lipid characterization and biomass composition determination[J]. Bioresource Technology, 2013, 128: 107-112.
- [26] 王秀, 张小平. 固定化藻菌流化床光生物反应器处理饮料废水[J]. 环境科学与技术, 2009, 32(4): 137-140.
Wang Xiu, Zhang Xiaoping. The beverage wastewater treatment with immobilized algae and bacteria fluidized photobioreactor[J]. Environmental Science and Technology, 2009, 32(4): 137-140.
- [27] Takagi M, Karseno K, Yoshida T. Effect of salt concentration on intracellular accumulation of lipids and triacylglyceride in marine microalgae *dunaliella* cells[J]. Journal of Bioscience and Bioengineering, 2006, 101(3): 223-226.
- [28] Feng Y J, Li C, Zhang D W. Lipid production of *Chlorella vulgaris* cultured in artificial wastewater medium[J]. Bioresource Technology, 2011, 102(1): 101-105.

(责任编辑 王媛媛)