

藻菌包埋固定条件优化及对污水中氮磷去除率的影响

李安琦, 马晓君, 安晓倩, 刘志媛, 王永强*

海南大学海洋学院, 海南 海口

收稿日期: 2021年9月14日; 录用日期: 2021年10月14日; 发布日期: 2021年10月22日

摘要

本研究以不同配比的海藻酸钠(SA)和聚乙烯醇(PVA)为复合载体材料制备包埋藻菌的凝胶球, 首先以凝胶球的抗压强度和机械强度为指标筛选最佳配方为PVA 5%:SA 1.5% = 1:1.5。以优选配方包埋热带海域筛选的广盐性小球藻*Chlorella sp.* HNC11和假单胞菌, 以及活性污泥, 测定几种固定化微生物小球对模拟污水中 NH_4^+ -N和TP的去除效率。研究表明, 固定化藻球、固定化菌球和固定化藻-菌复合球在6小时内, 三种固定化小球均显著降低了富氮磷水体中的N/P。配方I (4% PVA和1.5% SA的比例为1:1.5)制备的藻球和配方III (5% PVA和1.5% SA的比例为1:1.5)制备藻-菌球表现出最高的 NH_4^+ -N去除效率, 6小时去除率为8.99%, TP去除效率分别为71.27%和73.02%。以配方I制备的菌球表现了最高的TP去除率, 为73.93%。

关键词

藻菌共生体系, 固定化, 包埋技术, 铵氮去除率, 总磷去除率

Effects of Optimized Encapsulation Formulations of Microalgae and Bacteria on the Nitrogen and Phosphorus Removal from Wastewater

Anqi Li, Xiaojun Ma, Xiaoqian An, Zhiyuan Liu, Yongqiang Wang*

Oceanographic Institute, Hainan University, Haikou Hainan

Received: Sep. 14th, 2021; accepted: Oct. 14th, 2021; published: Oct. 22nd, 2021

*通讯作者。

文章引用: 李安琦, 马晓君, 安晓倩, 刘志媛, 王永强. 藻菌包埋固定条件优化及对污水中氮磷去除率的影响[J]. 水污染及处理, 2021, 9(4): 155-165. DOI: 10.12677/wpt.2021.94019

Abstract

In this study, gel beads for the encapsulation of microalgae were produced using different ratios of sodium alginate (SA) and polyvinyl alcohol (PVA) as composite carrier materials. And the best formulation of PVA 5%:SA 1.5% = 1:1.5 was selected based on the compressive strength and mechanical strength. The formulation was used to encapsulate *Chlorella* sp. HNC11 selected from tropical waters, *Pseudomonas* spp. and activated sludge to determine the efficiency of several embedded microbial beads for the removal of $\text{NH}_4^+\text{-N}$ and TP from simulated wastewater. The results showed that all three types of embedded microbial beads significantly reduced N/P in simulated wastewater within 6 hours. The microalgal beads made by the formulations of PVA 4%:SA 1.5% = 1:1.5 and the microalgae-bacterial beads made by the formulations of PVA 5%:SA 1.5% = 1:1.5 showed the highest removal efficiency, which was 8.99%. And their TP removal efficiencies were 71.27% and 73.02% respectively. Bacterial beads produced by the formulations of PVA 4%:SA 1.5% = 1:1.5 showed the highest removal rate of TP, which was 73.93%.

Keywords

Algae-Bacteria Symbiosis System, Immobilization, Embedding Technology, Removal Rate of Ammonia-Nitrogen, Removal Rate of Total Phosphorus

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

城市生活污水中富含氮磷元素, 如不经处理直接排放, 会导致水体的富营养化, 蓝藻等有毒藻类暴发形成水华[1]。城市污水排放前的处理流程分为三级[2]。一级处理主要采用物理方法, 如利用沉砂池对污水中的悬浮物进行截留, 除去悬浮污染物; 二级处理方法通常采用二次沉淀池或者生物膜装置, 利用化学氧化还原或者微生物的代谢作用, 将污水中的胶体和溶解状态的有机污染物转化为无害物质。一、二级的物理和化学方法往往不能使氮磷达到地表 III 类排放标准, 尚需进一步进行三级处理, 一般采用生物方法进一步处理难以降解的有机物及氨氮和磷等可溶性无机物[3]。

固定化微生物技术是生活污水三级污水处理的主要方法之一[4], 是指用物理或化学方法将游离微生物细胞或酶固定于某一特定固定化载体中, 使微生物能够保持固有的生物活性, 并能被重复和连续使用的技术。采用固定化微生物技术, 有利于提高微生物浓度和纯度, 缩短反应所需的时间, 并有利于二次回收, 不易产生二次污染物[5]。藻菌共生体系是固定化微生物技术具有潜力的生物材料[6], 理论上, 某些好氧硝化细菌与微藻之间有互利共生关系: 好氧硝化细菌吸收氧气, 释放二氧化碳, 有利于微藻光合固碳反应, 同时可将有机氮磷转化为微藻更易吸收的无机营养盐形态; 微藻光合作用则可为好氧硝化细菌提供氧气[7] [8] [9], 同时吸收污水中的 N、P 等无机离子, 并将其以有机物形式储存于藻细胞中[10] [11]。陈丽萍等以活性污泥为菌源, 制备了固定化小球藻菌共生系统, 4 天后, 固定化小球藻菌对污水中 N 和 P 的去除率分别达到 92% 和 100% [12]。Yu Shen 等以海藻酸钠为包埋剂, 氯化钙为固定剂, 以小球藻及污水中的优势菌株作为固定化微生物种类制备固定化小球藻菌来处理污水, 144 个小时后 N、P 去除率达

到 100% [13]。

微生物固定化的方法主要有吸附法、包埋法、交联法、复合固定化法等,包埋法是固定化微生物技术中最常用的制备方法,可以有效地将微生物锁定在固定化载体聚合物中,防止微生物的大量扩散,减少二次污染[14] [15],相较于其他三种方法包埋法具有易制备、稳定性高、固定化成本低、微生物流失少、微生物装载容量大等优点[5] [16] [17]。包埋所用载体材料影响固定化小球的耐用性,固定化微生物的生物活性以及净化效率,因此固定化载体材料的选择及配方优化是获得较高应用价值固定化微生物材料的重要前提。

利用包埋法固定微生物这一技术的实用性主要通过固定化小球的性能来决定,包括固定化小球形态、大小和表面积,传质性能,机械强度及稳定性,和小球的使用周期。王昊等人认为固定化微生物技术可以部分解决由于反应器启动时间长造成的菌体易流失的问题,但是仍存在菌体在固定化材料中吸附能力下降的缺陷[18]。晋凯迪等人发现利用 PVA 作为固定化载体材料时,PVA 含量增加,会提高固定化小球的机械强度,也会降低固定化小球的传质性能[19] [20];利用 SA 作为固定化载体材料时,SA 含量提高,会使固定化小球的粘度增大不易成球[21],并且 SA 的过量存在,会影响固定化小球内微生物的生物活性和功能[22];如若添加活性炭作为吸附基质,可以提高固定化微生物的吸附能力,也会使固定化小球的机械强度、粘度和传质性能同时下降[23]。李莹莹等人发现利用 10% PVA 作为包埋材料时,固定化小球可稳定存活 16 d [24]。高华崇等人发现利用 SA 作为包埋材料时,固定化小球可稳定存活 1~2 个月[25]。李宗慧等人利用固定化载体 LQ-1 包埋硝化菌,虽然可以提高固定化小球的使用周期至 45 d,但是成本较高[26]。总的来说,目前关于固定化包埋微生物技术虽然研究成果较多,研究结果显示固定化小球的包埋材料、固定剂和配方虽然多,但仍存在成本较高,固定化小球稳定性差,使用周期短,对微生物吸附能力差和包埋微生物量过少等问题[27] [28] [29]。

本研究选取成本低廉的固定化包埋材料,通过测定不同配比的海藻酸钠和聚乙烯醇作为复合载体材料制备的固定化凝胶小球的性质,优选藻菌共生系统的固定化载体配方,得到了成本低,机械强度高,稳定性高并且使用周期长达 2 个月的固定化载体配方;以海南本地小球藻 *Chlorella* sp. HN11 和活性污泥菌及(施氏假单胞菌)作为微生物材料,采用包埋法分别制备固定化藻球、固定化菌球及固定化藻-菌复合球,测定其 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 TP 的去除效率,以期获得一种高效去除生活污水中氮磷的固定化微生物方法。

2. 材料与方法

2.1. 固定化凝胶小球制备及机械强度测定

2.1.1. 固定化凝胶小球制备

分别以 4%、5%、6%、7%、8% 或 9% 的聚乙烯醇(PVA)和 1%、1.5%、2%、2.5%、3%、4% 或 5% 的海藻酸钠(SA)为载体材料,按照不同比例(PVA:SA = 1:1、2:1、3:1、1:1.5、1:2、1:3)混合两种材料,共制备 42 种直径为 2 mm 的固定化凝胶小球。搅拌均匀后静置交联 6 小时,然后滴加到 2% 氯化钙和饱和硼酸的混合溶液(体积比为 1:1)中,静置硬化 24 小时,获得不同比例的固定化凝胶小球。

2.1.2. 固定化凝胶小球机械强度测定

1) 抗压强度测定:将凝胶小球置于天平上,用平板缓慢按压小球,以小球破碎时电子天平的读数作为压缩强度的指标。每种配方随机取 50 个小球重复测定 50 次取平均值。

2) 力学强度测定:每种配方随机取 30 颗固定化凝胶小球放入蒸馏水中,加水至 40 ml,在室温、3000 r/min 的条件下进行搅拌,测定固定化凝胶小球保留率随搅拌时间的变化,以保留率作为固定化凝胶小球力学强度的指标。

2.2. 藻种与菌种培养

实验藻种小球藻 *Chlorella* sp. HN11, 分离自海南省海口近岸海域。通过抗生素平板分离法获得纯化藻种。

小球藻 *Chlorella* sp. HN11 采用“宁波三号”培养液淡水培养, 培养基配方如下: 乙二酸四乙酸二钠 ($C_{10}H_{16}N_2O_8$) 0.01 g/L, 磷酸二氢钾 (KH_2PO_4) 0.01 g/L, 硫酸亚铁 ($FeSO_4 \cdot 7H_2O$) 2.5 mg/L, 硝酸钠 ($NaNO_3$) 0.1 g/L, 硫酸锰 ($MnSO_4$) 0.25 mg/L, 维生素 (B_{12}) 50 mg/L [30], 培养基灭菌后使用。单藻种无菌静置培养, 培养温度为 $27 (\pm 1)^\circ C$, 光暗周期为 12 h L:12 h D。

活性污泥菌分离自污水处理厂的活性污泥。取北控水务集团(海南)有限公司白沙门污水处理厂的活性污泥, 加入两倍体积的红糖, 放入 2000 r/min 高速离心机中离心 6 h, 离心后取下层沉淀, 获得复合菌体。活性污泥复合菌株采用 LB 培养液淡水培养, 培养基配方如下: 氯化钠 ($NaCl$) 10 g/L, 胰蛋白胨 10 g/L, 酵母提取物 5 g/L。170 r/min 摇床培养 24 h, 培养温度为 $37 (\pm 1)^\circ C$ [31]。

施氏假单胞菌 *Pseudomonadaceae* 分离自小球藻 *Chlorella* sp. HN11。假单胞菌采用 2216E 培养液海水培养, 盐度为 $10 (\pm 2)\%$, 170 r/min 摇床培养 48 h, 温度为 $37^\circ C$ 。

2.3. 固定化藻菌球制备

取培养至指数生长期的藻液和活性污泥菌液, 离心后收集藻细胞沉淀和菌细胞沉淀。根据抗压强度和力学强度优选固定化凝胶小球配方, 并以此配方分别包埋小球藻、活性污泥和小球藻-活性污泥, 获得固定化藻球(藻细胞沉淀 650 mg)、固定化菌球(菌细胞沉淀 650 mg)和固定化藻-菌复合球(藻细胞沉淀 430 mg + 菌细胞沉淀 220 mg), 测定在 6 小时暗光 ($2.466 \text{ mol/m}^2\text{s}$) 条件下, 其对 25 mg/L NH_4^+-N 的高氮、 10 mg/L TP 的高磷人工污水中氨氮及总磷的去除率, 每个处理重复 3 次。

2.4. 氨氮去除率和总磷去除率的测定

参照国家《地表水环境质量标准》(GB3838-2002) [32], 利用纳氏试剂分光光度法测定氨氮吸收率, 利用钼酸铵分光光度法测定总磷吸收率。

2.5. 数据处理和分析

采用 DPS 数据处理系统对实验数据进行单因素方差分析 [27]。

3. 结果与分析

3.1. 凝胶小球物理性能测定

以凝胶小球的形状、颜色、弹性和硬度作为筛选指标进行初筛(实验数据未列出), 获得 5 种综合性状优良的固定化凝胶小球配方: I, II, III, IV, V (表 1)。

Table 1. The formula of in immobilized gel beads

表 1. 固定化小球配方

I	4	1.5	1:1.5
II	4	1.5	1:2
III	5	1.5	1:1.5
IV	5	1.0	1:2
V	4	1.0	1:1.5

分别以这5种配方制备固定化凝胶小球,测定其强度。结果表明(图1),以1.5%海藻酸钠(SA)制备的小球(I、II、III配方)抗压强度显著高于以1%海藻酸钠(SA)制备的小球(IV、V配方) ($P < 0.05$)。当小球中的SA浓度为1%时,IV、V两种比例的压缩强度范围为130~150 g;当小球中SA浓度为1.5%时,压缩强度承受范围为280~320 g。PVA浓度对小球的压缩强度无显著影响:当SA浓度为1.5%时,PVA浓度为4%的小球与PVA浓度为5%的小球之间的压缩强度无显著差异($P > 0.05$)。

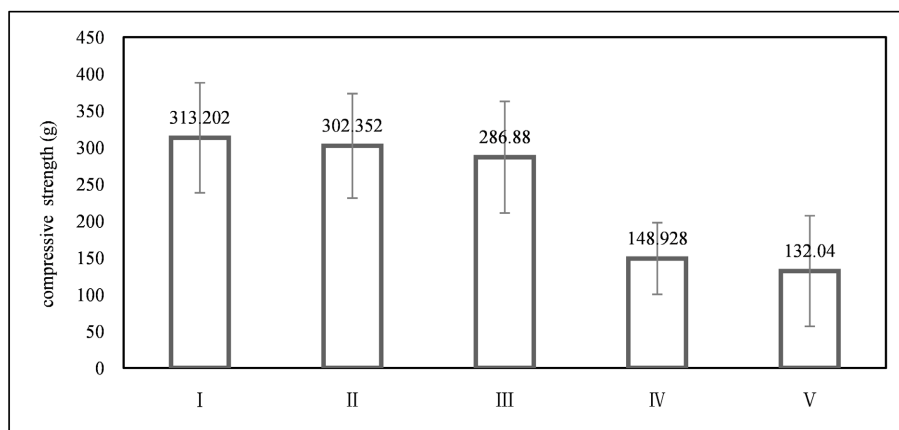


Figure 1. Compressive strength of five kinds of immobilized gel beads

图1. 五种固定化凝胶小球抗压强度

以1% SA (IV、V配方)作为固定化材料时,固定化凝胶小球在3000 r/min高转速下,40 min内全部破碎(图2)。而以1.5% SA (I、II、III配方)作为固定化材料时,固定化凝胶小球具有较强的力学强度,在80~110 min开始大量破碎,在110~120 min全部破碎。其中I、III两种比例的小球在10 min后开始出现少量小球破碎现象,配方III小球在20~60 min内保持稳定状态,60 min后开小球大量破碎现象;配方II小球在100分钟内保持稳定的力学强度。

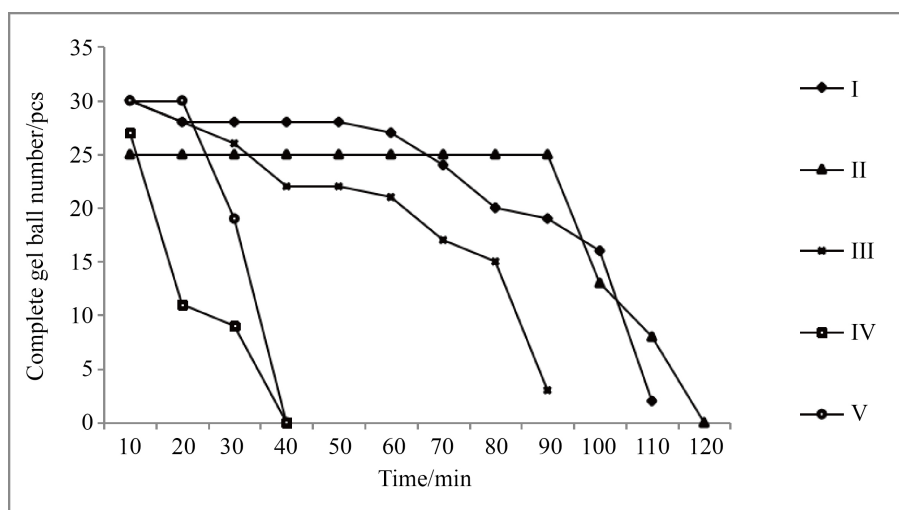


Figure 2. Mechanical strength of five kinds of immobilized gel beads

图2. 五种配方固定化凝胶小球力学强度

通过压缩强度与力学强度测定,选出I、II、III为3种较优配方。

3.2. 凝胶小球生物性能测定

以配方 III 为例, 检测固定化凝胶小球包埋微生物后的性能及对所包埋微生物活性的影响。分别选取悬浮的施氏假单胞菌液体(菌细胞计数 1.4×10^8 个)和离心后的菌泥(菌细胞计数 1.4×10^8 个)作为去除富营养化水体的微生物材料。

与悬浮的施氏假单胞菌铵氮去除效率相比, 固定化包埋后的施氏假单胞菌的铵氮去除效率明显降低, 而总磷去除效率明显升高, 说明微生物经固定化包埋法固定后, 仍然具备微生物活性, 可以有效的提高或降低微生物本身的性质。固定化施氏假单胞菌球在 8 h 后的铵氮去除率和活性磷去除率均高于 4 h, 说明施氏假单胞菌经过固定化包埋法固定后, 微生物在固定化包埋材料里可以正常生长, 随着生物量的积累可以更好的发挥脱氮除磷的性质(表 2)。将使用后的固定化施氏假单胞菌球洗净并存放在 LB 液体培养基中静置, 观察发现固定化施氏假单胞菌球可稳定存在至少 2 个月, 期间小球未出现破碎或细菌溢出固定化凝胶小球的现象。

Table 2. The efficiency of nitrogen removal and phosphorus removal with suspended bacteria fluid and immobilized bacteria spheres

表 2. 悬浮菌液与固定化菌球的脱氮除磷效率

	Suspended bacteria fluid-2 h	Suspended bacteria fluid-5 h	Immobilized bacteria spheres-4 h	Immobilized bacteria spheres-8 h
Removal rate of ammonia-nitrogen	32.67%	73.48%	1.97%	5.75%
Removal rate of total phosphorus	-18.28%	-19.62%	9.70%	11.64%

3.3. 固定化藻菌对氮磷的去除效率

以优选的 I、II、III 三种固定化小球配方制备固定化凝胶小球, 并包埋小球藻和活性污泥菌, 分别获得固定化藻球、固定化菌球和固定化藻-菌复合球(表 3)。测定制备的固定化微生物材料在暗光条件($2.466 \mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$)下, 6 小时内对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 及 TP 的去除率。

Table 3. The formula of microalgae microbial beads, bacterial microalgae beads and microalgae -bacteria microbial beads

表 3. 固定化藻球、固定化菌球和固定化藻-菌复合球制备

No.	Total microalgae dosage (mg)	Total bacterial dosage (mg)
I-C	650	—
II-C	650	—
III-C	650	—
I-B	—	650
II-B	—	650
III-B	—	650
I-CB	430	220
II-CB	430	220
III-CB	430	220

固定化藻球在 6 小时内对 $25 \text{ mg/L } \text{NH}_4^+\text{-N}$ 的去除率为 4.61%~8.99% (图 3)。配方 I 对氨氮去除率为

8.99%，显著高于其他两个配方的藻球。固定化菌球氨氮去除率显著低于固定化藻球，仅为 2.95%~3.25% ($P < 0.05$)。而固定化藻-菌复合球，对氨氮去除率不稳定，配方 III 的效果显著优于其它两种配方，对氨氮去除率达到 8.99%，而配方 II 的菌球仅为 0.76%。结果表明配方 III 制备的藻菌球氨氮吸收率表现相对稳定。

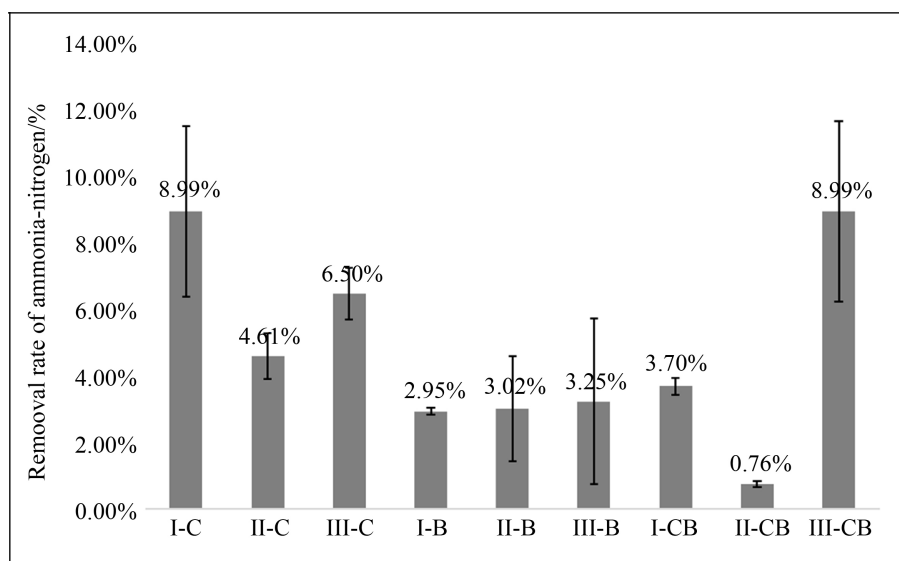


Figure 3. Removal rate of ammonia-nitrogen of immobilized gel beads

图 3. 固定化凝胶小球的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除率

6 个小时内，固定化藻球对 10 mg/L TP 的去除率为 70.61%~72.18% (图 4)；固定化菌球对总磷的去除率与固定化藻球相比无显著差异。配方 I 和 II 的固定化藻-菌复合球对总磷的去除率低于固定化菌球，但配方 III 藻菌球对总磷去除率为 73.02%，与菌球无显著差异。

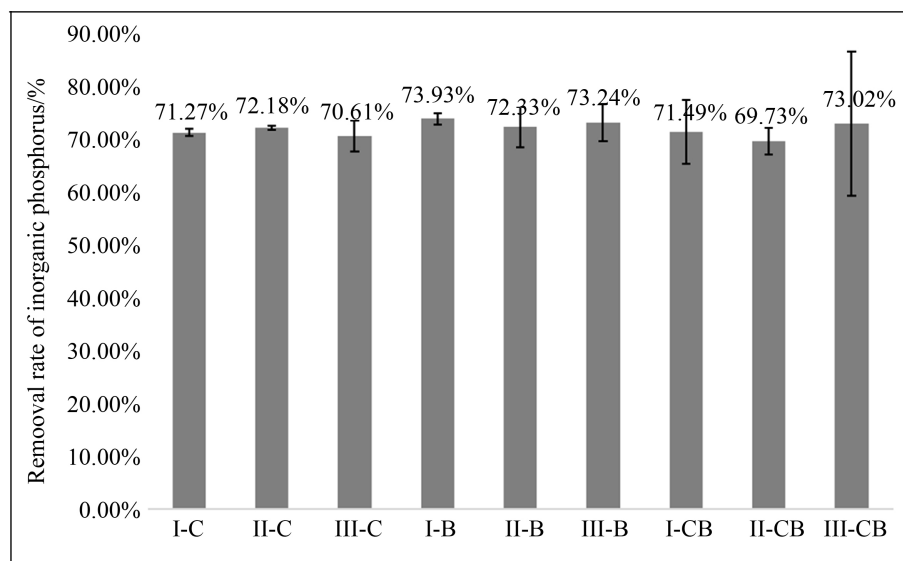


Figure 4. Removal rate of total phosphorus of immobilized gel beads

图 4. 固定化凝胶小球的 TP 去除率

4. 讨论

包埋材料可以分为两大类：一类是天然高分子多糖类，如海藻酸盐、琼脂、明胶等，它们具有固化方便，对微生物毒性小及固定化密度高等优点，但是它们抗微生物分解性能较差，机械强度低[33] [34] [35]。研究表明，海藻酸钠利于小球藻生长，可明显增强强度，但弹性较差，在污水中易被磷酸盐损坏凝胶结构，维持原有形态时间较短[21]。例如，包蔚等人用海藻酸钠包埋菌仅 7 天后，部分固定化小球开始破裂，可能会导致二次污染现象[36]。

另一类是合成高分子化合物，如聚丙烯酰胺、聚乙烯醇(PVA)等[37]。这类交联剂的突出优点是抗微生物分解性能好，机械强度高，化学性能稳定。但是聚合物网络的形成条件比较剧烈，对微生物细胞的损害较大，而且成形的多样性和可控性不好。此外，利用聚乙烯醇作包埋剂时，需利用硼酸做固定剂，而硼酸具有生物毒性，会导致制备的固定化微生物活性降低[38]。而且当聚乙烯醇的浓度为 6% 及以上时，固定化凝胶小球呈现不透明的白色，不利于小球藻等光合微生物的光合作用。

聚乙烯醇浓度过高时，胶体黏度较高，不易成球，并伴随严重的拖尾现象，使得固定化小球团聚[39] [40] [41]；而当海藻酸钠浓度过低时，小球成球率不高，容易形成拖尾团聚现象[42]。张雅婷等人发现使用 10% 聚乙烯醇和 0.5% 海藻酸钠作为复合材料时，若 PVA 浓度较高，当温度超过 15℃ 或者水体环境过酸或过碱时会造成小球性能不稳定[43]。赵群等人利用 4% SA、10% PVA、0.6% CaCl₂ 作为复合材料包埋醋酸菌，随着 PVA 浓度从 8% 升至 12%，小球的硬度升高，进而影响小球的传质性能[44]。因此我们以 PVA 和 SA 为材料进行不同浓度配比的实验，获得了三种物理性状优良，且对包埋微生物无抑制作用的固定化凝胶小球配方(I、II、III)。结果表明 SA 浓度对小球的力学强度有显著影响，PVA 浓度影响小球的弹性，以 SA 与 PVA 为复合载体材料，对小球藻、菌、以及复合藻-菌进行包埋，获得的微生物包埋体能够使微生物长期(至少 45 天)保持活性和对氮、磷的有效去除率。且载体能够完整保存、不致溶出最长可达 2 个月，有效防止二次污染现象所导致的共生传质、藻量暴增、生物氧化等现象，并且保证固定化凝胶小球可有效回收利用。此外，在水质流动较大的情况下，可以保证固定化小球的完整性及微生物活性。

国内外学者们利用固定化微生物处理生活污水已做了许多工作，并取得了显著效果。Luz E. de-Bashan 等以多聚糖凝胶为载体材料，利用固定化小球藻处理流动生活污水，3 天后，其对 N 的去除率达 95% 以上，对 P 的去除率则为 99% [45]。Travieso 等利用固定化小球藻处理 0.5 L 下水道污染物，初始 NH₄⁺-N 浓度为 31 mg/L，TP 浓度为 6 mg/L，7 天后，其对 N 的去除率达 100%，对 P 的去除率达 71% [46]。严青等利用海藻酸钠制备固定化活性污泥和小球藻的藻菌球，在流动污水(起始 NH₄⁺-N 浓度为 19.1 mg/L)条件下，发现 10 天后，固定化藻菌球对 NH₄⁺-N 的去除率为 60% [47]。

然而前人多倾向于测定固定化微生物在 3 天以上的氮磷去除效率[48]。而在实际应用中，减少小球对污水的处理时间将有利于降低成本，提高效率。因此本实验缩短处理时间，并模拟实验污水处理的弱光环境，测定了 6 小时内固定化微生物对氨氮及总磷的去除率。结果表明，6 小时内氨氮去除效率表现最高的是配方 I 的固定化藻球和配方 III 的藻菌球，去除率均为 8.99%。其对去除率分别为到 71.27% 和 73.02%；固定化菌球对总磷的去除率 6 小时内达到 73.93%。

由实验结果可以看出，对于 NH₄⁺-N 的去除率，固定化小球藻优于固定化菌系统，而对 TP 的去除率则菌系统优于藻系统。当菌藻复合理时，由于两种微生物之间的相互作用，以凝胶小球建立的新环境对微生物的影响，使共生系统对氮磷的去除率因凝胶球的结构不同而异，配方 III 包埋的藻-菌共生系统对氮磷的去除率综合表现最优，其对 TP 的去除率显著高于藻球，与菌球无显著差异，而 NH₄⁺-N 的去除率与去除率最高的配方 I 藻球无显著差异，显著高于其他固定化微生物小球。但是在本实验条件下，小球

藻与活性污泥菌之间的协同共生作用似乎没有表现。与前人研究相比,本实验反应时间仅为6小时,且是基于弱光条件下(2.466 mol/m²s)处理,小球藻的生长状况未达到最佳状态,因此固定化藻球及固定化藻-菌复合球对氨氮的去除率未达到最佳值。此外,所包埋的菌为复合菌,与藻的协同性不明。因此,需进一步筛选出能与小球藻生长互利的菌株,提高藻菌共生系统对氨氮的去除率,得到利于菌藻共生系统构建的固定化微生物技术。

我国制定的《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB18918-2002)中规定城市污水在排放前需经过处理达到标准,其中一级标准的B标准中规定氨氮含量不得超过8.0 mg/L,总磷的含量不超过1.0~1.5 mg/L,二级标准中规定氨氮含量不得超过25.0 mg/L,总磷的含量不超过3.0 mg/L。因此本实验中使用固定化凝胶藻球、固定化菌球和固定化藻-菌球的铵氮去除效率均达到二级标准,总磷的去除效率达到了一级标准的B标准[32]。

5. 结论

综上所述,利用固定化技术包埋藻或藻菌,处理生活污水,具有较大发展空间,是一种效率高、能耗低、能够连续运行、循环利用的污水净化方法,具有实际应用意义。且固定化凝胶小球外形美观,在实际的应用中能够达成观赏性与实用性并行的处理系统,构建具有处理污水能力的小型景观。随着更加高效、可规模化运行的生物反应器的出现,未来固定化藻球以及固定化藻-菌复合球可大规模应用于污水处理领域。

基金项目

海南大学教育教学改革研究项目(项目编号:hdjy2065)。

参考文献

- [1] 杨军, 张晓雪, 寇晓宇. 城市生活污水处理技术现状及发展趋势研究[J]. 石化技术, 2017, 24(4): 63.
- [2] 蒋惠忠. 污水处理流程优化动态规划[J]. 环境保护, 1998(12): 15-17.
- [3] 田凤梅. 浅谈城市污水处理[J]. 才智, 2010(17): 47.
- [4] Rajasulochana, P. and Preethy, V. (2016) Comparison on Efficiency of Various Techniques in Treatment of Waste and Sewage Water—A Comprehensive Review. *Resource-Efficient Technologies*, 2, 175-184. <https://doi.org/10.1016/j.refit.2016.09.004>
- [5] 夏冰, 赵全升, 曲洋. 固定化微生物技术及其载体在污水处理中的研究进展[J]. 科技信息, 2010(1): 306-307.
- [6] Subashchandrabose, S.R., Ramakrishnan, B., Megharaj, M., Venkateswarlu, K. and Naidu, R. (2011) Consortia of Cyanobacteria/Microalgae and Bacteria: Biotechnological Potential. *Biotechnology Advances*, 29, 896-907. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2011.07.009>
- [7] 王起华, 张岚翠, 王冰. 固定化藻类细胞去除污水中氮、磷的研究进展[J]. 工业水处理, 2005, 25(6): 6-8.
- [8] 张国海, 庄惠如, 赵圣炜, 翁金兰. 一株饵料微藻与益生菌混合固定化培养条件的优化[J]. 生物技术, 2008, 18(6): 74-78.
- [9] 甄静, 王继雯, 李冠杰, 刘莹莹, 陈国参, 杨文玲. 海藻酸钠固定化包埋对枯草芽孢杆菌有机磷降解效果的影响[J]. 中国农学通报, 2014, 30(18): 84-88.
- [10] Muñoz, R. and Guieysse, B. (2006) Algal-Bacterial Processes for the Treatment of Hazardous Contaminants: A Review. *Water Research*, 40, 2799-2815. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2006.06.011>
- [11] Unnithan, V.V., Unc, A. and Smith, G.B. (2014) Minireview: A Priori Considerations for Bacteria-Algae Interaction in Algal Biofuel Systems Receiving Municipal Wastewaters. *Algal Research*, 4, 35-40. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2013.11.009>
- [12] Chang, I.S., Kim, C.I. and Nam, B.U. (2005) The Influence of Poly-Vinyl-Alcohol(PVA) Characteristics on the Physical Stability of Encapsulated Immobilization Media for Advanced Wastewater Treatment. *Process Biochemistry*, 40, 3050-3054. <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2005.02.009>

- [13] Shen, Y., Gao, J. and Li, L. (2017) Municipal Wastewater Treatment Viaco-Immobilized Microalgal-Bacterial Symbiosis: Microorganism Growth and Nutrients Removal. *Bioresource Technology*, **243**, 905-913. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.07.041>
- [14] Sheldon, R.A. and Pelt, S.V. (2013) Enzyme Immobilisation in Biocatalysis: Why, What and How. *Chemical Society Reviews*, **42**, 6223-6235. <https://doi.org/10.1039/C3CS60075K>
- [15] 黄真真, 陈桂秋, 曾光明, 宋忠贤, 左亚男, 郭志, 谭琼. 固定化微生物技术及其处理废水机制的研究进展[J]. 环境污染与防治, 2015, 37(10): 77-85
- [16] Bohdziewicz, J. and Kowalska, M. (2003) Biodegradation of Phenols and Cyanides Using Membranes Obtained by Chemical Immobilization. *Environment Protection Engineering*, **29**, 33-44.
- [17] Jeon, C., Park, J.Y. and Yoo, Y.J. (2002) Novel Immobilization of Alginate Acid for Heavy Metal Removal. *Biochemical Engineering Journal*, **11**, 159-166. [https://doi.org/10.1016/S1369-703X\(02\)00020-7](https://doi.org/10.1016/S1369-703X(02)00020-7)
- [18] 王昊, 赵霞, 李博文, 张娇娇, 谢华. 微生物吸附固定化技术在污水处理中的研究进展[J]. 应用化工, 2020, 49(9): 2341-2345. <https://doi.org/10.16581/j.cnki.issn1671-3206.20200804.002>
- [19] 张磊. 微生物固定化技术在废水处理中的应用[J]. 农业与技术, 2021, 41(14): 139-141.
- [20] Wang, J., et al. (2020) Granule-Based Immobilization and Activity Enhancement of Anammox Biomass via PVA/CS and PVA/CS/Fe Gel Beads. *Bioresource Technology*, **309**, 123448.
- [21] Long, Z.E., Huang, Y.H., Cai, Z.L., Cong, W. and Ouyang, F. (2004) Immobilization of *Acidithiobacillus ferrooxidans* by a PVA-Boric Acid Method for Ferrous Sulphate Oxidation. *Process Biochemistry*, **39**, 2129-2133. <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2003.11.004>
- [22] Coleman, N.P., Crofcheck, C.L., Nokes, S.E. and Knutson, B. (2009) Effects of Growth Media pH and Reaction Water Activity on the Conversion of Acetophenone to (S)-1-Phenylethanol by *Saccharomyces Cerevisiae* Immobilized on Celite 635 and in Calcium Alginate. *Transactions of the American Society of Agricultural and Biological Engineers*, **52**, 665-671. <https://doi.org/10.13031/2013.26805>
- [23] 晋凯迪, 于鲁冀, 陈慧敏, 李廷梅. 亚硝化细菌吸附——包埋固定化方法的优化及其脱氮性能[J]. 水处理技术, 2015, 41(7): 57-60+64.
- [24] 李莹莹. 固定化微生物技术最佳包埋条件研究[J]. 市政技术, 2016, 34(4): 141-144.
- [25] 高华崇, 乔丽丽, 尹莉, 乔瑞平, 耿翠玉, 迟娟, 王玉慧. 包埋微生物固定化载体的结构性能研究[J]. 能源环境保护, 2017, 31(1): 29-33.
- [26] 李宗慧, 刘金泉, 赵雪莲, 屈佳玉, 孟胜. 包埋微生物载体的结构与性能研究[J]. 现代化工, 2012, 32(11): 45-47.
- [27] Cassidy, M.B., Lee, H. and Trevors, J.T. (1996) Environmental Applications of Immobilized Microbial Cells: A Review. *Journal of Industrial Microbiology & Biotechnology*, **16**, 79-101. <https://doi.org/10.1007/BF01570068>
- [28] Ignacio, M.G. (2008) Microalgae Immobilization: Current Techniques and Uses. *Bioresource Technology*, **99**, 3949-3964. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2007.05.040>
- [29] Hua, X., Du, G. and Xu, Y. (2019) Cost-Practical of Glycolic Acid Bioproduction by Immobilized Whole-Cell Catalysis Accompanied with Compressed Oxygen Supplied to Enhance Mass Transfer. *Bioresource Technology*, **283**, 326-331. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.03.094>
- [30] 成永旭. 生物饵料培养学[M]. 第2版. 北京: 中国农业出版社, 2005.
- [31] 陈玲, 白洁, 赵阳国, 田伟君, 张颖, 党佳佳, 李岩然. 分离于河口区芦苇湿地 1 株好氧反硝化菌的鉴定及其反硝化特性[J]. 微生物学报, 2016, 56(8): 1314-1325.
- [32] 中国环境科学研究院. GB3838-2002. 地表水环境质量标准[S]. 北京: 国家环境保护总局, 国家质量监督检验检疫总局, 2002.
- [33] Dikshit, P.K. and Moholkar, V.S. (2016) Optimization of 1,3-Dihydroxyacetone Production from Crude Glycerol by Immobilized *Gluconobacter oxydans* MTCC 904. *Bioresource Technology*, **216**, 1058-1065. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.01.100>
- [34] Dikshit, P.K. and Moholkar, V.S. (2016) Kinetic Analysis of Dihydroxyacetone Production from Crude Glycerol by Immobilized Cells of *Gluconobacter oxydans* MTCC 904. *Bioresource Technology*, **216**, 948-957. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.06.042>
- [35] 魏志莹, 叶愉群, 杨秀雯, 宋金诺, 陈立斌. 溶藻菌固定技术在除藻中的应用研究进展[J]. 绿色科技, 2020(20): 135-139.
- [36] 包蔚, 杨兴明, 吴洪生, 徐阳春, 沈其荣. 海藻酸钠固定化包埋对氨氧化细菌除氨效果的影响[J]. 土壤学报, 2009, 46(6): 1083-1088.

- [37] Mallick, N. (2006) Immobilization of Microalgae. In: Guisan J.M., Ed., *Immobilization of Enzymes and Cells*, Humana Press, Totowa, 373-391. https://doi.org/10.1007/978-1-59745-053-9_33
- [38] 茆云汉, 王建龙. 聚乙烯醇固定化微生物新方法的研究[J]. 环境科学报, 2013, 33(2): 370-376.
- [39] Gao, D., Zhou, X., Gao, Z.H., Shi, X., Wang, Z., Wang, Y., *et al.* (2018) Preparation and Characterization of Silver Sulfadiazine Loaded Polyvinyl Alcohol Hydrogels as an Antibacterial Wound Dressing. *Journal of Pharmaceutical Sciences*, **107**, 2377-2384. <https://doi.org/10.1016/j.xphs.2018.04.027>
- [40] 李沁华, 李慧, 黄雷. 聚乙烯醇-海藻酸钙组织工程复合支架的性能[J]. 中国组织工程研究与临床康复, 2010, 14(51): 9527-9530.
- [41] Drury, J.L., Boonthekul, T. and Mooney, D.J. (2005) Cellular Cross-Linking of Peptide Modified Hydrogels. *Journal of Biomechanical Engineering*, **127**, 220-228. <https://doi.org/10.1115/1.1865194>
- [42] Martínez-Gómez, F., Guerrero, J., Matsuhira, B. and Pavez, J. (2017) *In Vitro* Release of Metformin Hydrochloride from Sodium Alginate/Polyvinyl Alcohol Hydrogels. *Carbohydrate Polymers*, **155**, 182-191.
- [43] 张雅婷, 熊慧, 羊晨, 梁国辉, 魏宝阳, 李立恒. 除磷微生物固定化处理工艺的优化[J]. 安徽农业科学, 2020, 48(13): 93-95+99.
- [44] 赵群, 李静, 窦召语, 代静静, 谭海刚. 海藻酸钠-聚乙烯醇复合固定醋酸菌研究[J]. 中国调味品, 2019, 44(12): 35-38.
- [45] de-Bashan, L.E. and Bashan, Y. (2004) Recent Advances in Removing Phosphorus from Wastewater and Its Future Use as Fertilizer (1997-2003). *Water Research*, **38**, 4222-4246. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2004.07.014>
- [46] Travieso, L., Benitez, F., Weiland, P., Sánchez, E., Dupeyrón, R. and Dominguez, A.R. (1996) Experiments on Immobilization of Microalgae for Nutrient Removal in Wastewater Treatments. *Bioresource Technology*, **55**, 181-186. [https://doi.org/10.1016/0960-8524\(95\)00196-4](https://doi.org/10.1016/0960-8524(95)00196-4)
- [47] 严清, 孙连鹏. 固定化菌藻系统及对污水中氮磷营养盐的净化效果[J]. 生态环境学报, 2009, 18(6): 2086-2090.
- [48] 张瑞斌, 潘卓兮, 王乐阳, 张燕, 奚道国. 固定化菌藻填料强化人工湿地脱氮除磷效果研究[J]. 环境工程技术学报, 2021, 11(1): 91-96.