

陈坦林,赵薇,朱雪琴,等. CMC-硅藻土复合固定硝化细菌降解养殖水体中的氨氮[J]. 江苏农业科学,2018,46(7):258-262.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2018.07.064

CMC-硅藻土复合固定硝化细菌 降解养殖水体中的氨氮

陈坦林,赵薇,朱雪琴,朱鹏程,熊婷婷

(武汉大学化学与分子科学学院,湖北武汉 430072)

摘要:以羧甲基纤维素钠(carboxy methyl cellulose sodium,CMC)和硅藻土为载体材料,采用包埋法固定硝化菌制备固定化微生物小球降解养殖水体中的氨氮,探索固定化微生物小球的最佳制备条件和小球降解氨氮的最佳使用量,并考察温度、pH 值对固定化微生物小球和游离菌降解氨氮的影响。结果表明,固定化微生物小球的最佳制备条件为 CMC 含量 2.5%、硅藻土含量 3.0%、硝化菌含量 2.5%、交联剂硫酸铝[$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$]溶液的浓度为 1.5%、交联时间 4 h,最佳使用量为每 150 mL 模拟养殖水投入 3 g,小球在 30 ℃、pH 值为 8 时对氨氮的降解率最高。通过不同温度、pH 值下固定化微生物小球和游离菌降解氨氮情况的比较,发现在弱酸弱碱环境下固定化微生物小球比游离菌有更好的效果,在较高或较低的温度下对氨氮的降解效率也高于游离菌。

关键词:CMC-硅藻土;固定化微生物小球;硝化细菌;养殖水体;氨氮

中图分类号:X714 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2018)07-0258-04

氨氮对养殖水体中的鱼、虾及其他一些水生生物有毒害作用^[1]。当氨氮浓度过高时,会使鱼虾等发生病变,对鱼虾的生长繁殖会产生不利影响。因此,寻求合适的方式降低养殖水体中过高的氨氮含量,对提高鱼虾等水产品的产量和质量、促进淡水养殖的健康发展有积极意义。

微生物固定化技术是 20 世纪 60 年代开始发展起来的一项技术,这项技术最开始是被应用在固定大肠杆菌上,后来逐渐被应用在水处理及工业发酵等领域^[2]。它可将目标微生物限定在一定的区域内,使其活性仍能保持并可重复利用,可以增加微生物密度,减少微生物流失,提高微生物对外界不良环境的耐受性,在处理氨氮超标的养殖水体上具有良好的前景^[3-6]。微生物固定化技术中,载体的选择与制备非常重要。目前研究较多的是以聚乙烯醇(PVA)、海藻酸钠(SA)和某些无机材料为载体,而对以羧甲基纤维素钠(carboxymethyl cellulose sodium,CMC)作为载体的研究较少。CMC 廉价易得,对生物和环境无毒害作用,以其为原料制备载体,方法简单,制备过程对环境无污染,而硅藻土有多孔结构,还能增加载体强度。因此,本研究以 CMC 为载体基质,添加一定比例的硅藻土复合包埋硝化细菌制备固定化颗粒,考察不同制备条件下所得的固定化颗粒对氨氮的降解情况以及温度、pH 值和投入量等条件对固定化颗粒降解氨氮的影响,为其实际应用奠定基础。

1 材料与方法

1.1 主要仪器与试剂

收稿日期:2017-09-05

作者简介:陈坦林(1992—),男,湖北武汉人,硕士,主要从事养殖水体治理研究。E-mail:ctanlin@163.com。

通信作者:赵薇,副教授,主要从事生物化学分析、养殖水体治理研究。E-mail:zhaow@whu.edu.cn。

主要仪器:WFZ UV4802 型紫外可见分光光度计[尤尼柯(上海)仪器有限公司];PHS-25A 型数字酸度计(上海大浦仪器有限公司);THZ-22 恒温振荡器(太仓市强乐实验设备有限公司);JJ-1 型精密增力电动搅拌器(常州国华电器有限公司)。

主要试剂:硝化菌(碧沃丰生物科技股份有限公司);CMC(国药集团化学试剂有限公司);硅藻土(国药集团化学试剂有限公司);模拟养殖水[1.00 L 水中含 10.00 mg $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ (即 38.19 mg NH_4Cl)、10.00 mg $\text{K}_2\text{HPO}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ 、2.00 mg $\text{MnSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 、2.00 mg $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 、100.00 mg NaCl 、0.50 mg $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 、50.00 mg 葡萄糖]。

1.2 固定化微生物小球的制备

取一定质量的 CMC 在 50 ℃水浴条件下缓慢加入去离子水中,边加边搅拌,充分溶解后自然冷却至室温,再依次加入硅藻土和硝化细菌混匀,用挤压滴落法将混合液滴入到一定质量分数的硫酸铝[$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$]溶液中,交联数小时得到直径 3 mm 左右的固定化微生物小球,用去离子水洗净,置于 4 ℃冰箱中保存备用。制备的固定化微生物小球在进行试验时须先活化处理,即将制得的固定化微生物小球按一定比例投入到装有模拟养殖水的锥形瓶中,置于恒温摇床中,在 30 ℃、120 r/min 条件下,每 24 h 换 1 次水,培养 72 h,得到活化的固定化微生物小球,洗净备用^[7-8]。

1.3 制备条件的单因素试验

在制备过程中主要考察以下 5 个因素对固定化微生物小球性能的影响:CMC 的含量、硅藻土的含量、硝化菌的含量、交联剂 $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ 溶液的浓度、交联时间。

1.3.1 CMC 含量对固定化微生物小球性能的影响 在选取合适的 CMC 含量时,以固定化微生物小球制作时成型的难易、机械强度为指标,不考虑其对固定化微生物小球降解氨氮性能的影响,因此固定化微生物小球不包埋硝化菌。

依据韩亚红等的研究^[9]及前期试验,按如下条件制备固定化微生物小球:CMC 的含量分别取 1.5%、2.0%、2.5%、3.0%,固定硅藻土含量为 3.0%、硝化菌含量为 2.0%、交联剂 $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ 溶液的浓度为 3.0%、交联时间为 6 h。并根据前面所述的 2 个指标确定合适的 CMC 含量。固定化微生物小球制作成型的难易:以是否易于滴落固化为规则球形为标准;固定化微生物小球机械强度的评判:将制备的固定化微生物小球取 20 颗加入到装有 50 mL 水的 500 mL 烧杯中,使用电动搅拌器以 1 000 r/min 对其搅拌 1 min,设置 3 组平行试验。计算固定化微生物小球的完整率,完整率越高则固定化微生物小球的机械强度越大,完整率 = 保持完好的固定化微生物小球的个数/固定化微生物小球总个数 $\times 100\%$ 。

1.3.2 硅藻土含量对固定化微生物小球性能的影响 按如下条件制备固定化微生物小球:硅藻土含量分别取 1.0%、2.0%、3.0%、4.0%、5.0%,固定 CMC 含量为 2.5%、硝化菌含量为 2.0%、交联剂 $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ 溶液的浓度为 3.0%、交联时间为 6 h。

1.3.3 硝化菌含量对固定化微生物小球性能的影响 按如下条件制备固定化微生物小球:硝化菌含量分别取 0.5%、1.0%、2.0%、3.0%、4.0%,固定 CMC 含量为 2.5%,硅藻土含量为 3.0%、交联剂 $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ 溶液的浓度为 3.0%、交联时间为 6 h。

1.3.4 交联剂 $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ 溶液的浓度对固定化微生物小球性能的影响 按如下条件制备固定化微生物小球:交联剂 $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ 溶液的质量分数分别取 1.0%、2.0%、3.0%、4.0%、5.0%。固定 CMC 含量为 2.5%、硅藻土含量为 3.0%、硝化菌含量为 2.0%、交联时间为 6 h。

1.3.5 交联时间对固定化微生物小球性能的影响 按如下条件制备固定化微生物小球:交联时间分别取 2、4、6、8、10 h,固定 CMC 含量为 2.5%、硅藻土含量为 3.0%、硝化菌含量为 2.0%、交联剂 $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ 溶液的浓度为 2.0%。

将上述“1.3.1”至“1.3.5”中制备的固定化微生物小球活化后分别称取 3 g 投入到装有 150 mL 模拟养殖水的 250 mL 锥形瓶中,置于恒温摇床中,在 30 ℃、120 r/min 条件下培养,于 12 h 取样,过滤后测定水样中的氨氮含量,计算固定化微生物小球对氨氮的去除率。每个试验设置 3 组平行。

1.4 制备条件的正交试验

考虑到各因素间的交互影响,进一步优化固定化微生物小球的制备条件,根据单因素试验结果,设计正交试验。试验选取硅藻土含量、硝化菌含量、交联剂浓度、交联时间 4 个因素,各因素分别取 3 个水平,如表 1 所示。按 $L_9(3^4)$ 正交表设计试验。根据表 1 制备固定化微生物小球,投入 3 g 活化后的固定化微生物小球到装有 150 mL 模拟养殖水的 250 mL 锥形瓶中,置于恒温摇床中,30 ℃、120 r/min 条件下进行反应。12 h 后取样,过滤后测氨氮含量,并计算去除率。设置 3 组平行试验。

表 1 固定化微生物小球最佳制备条件筛选的正交试验因素水平

水平	硅藻土含量 (%)	硝化菌含量 (%)	交联剂浓度 (%)	交联时间 (h)
1	2.5	1.5	1.5	3
2	3.0	2.0	2.0	4
3	3.5	2.5	2.5	5

1.5 固定化微生物小球用量与氨氮降解情况的关系

根据试验确定的最佳条件制备固定化微生物小球,活化后分别称取 1.0、1.5、2.0、2.5、3.0、3.5、4.0 g 投入到装有 150 mL 模拟养殖水的 250 mL 锥形瓶中,置于恒温摇床中,在 30 ℃、120 r/min 条件下培养,于 12 h 取样,过滤后测定水样中的氨氮含量,并计算固定化微生物小球对氨氮的去除率。每个试验设置 3 组平行。

1.6 不同应用条件下游离菌和固定化微生物小球降解氨氮的情况

温度以及 pH 值会影响微生物的生长和代谢,通过试验分别考察这 2 个因素对游离硝化菌以及包埋固定化后的硝化菌的具体影响。为确保条件一致,游离菌在试验前进行与固定化微生物小球活化步骤相同的处理。

1.6.1 不同温度下游离菌和固定化微生物小球降解氨氮的情况 分别取 3 g 活化后的固定化微生物小球投入到装有 150 mL 模拟养殖水的锥形瓶中,并以与固定化微生物小球包菌量相等的游离菌为对照,均置于 30 ℃、120 r/min 的摇床中反应,模拟养殖水的 pH 值分别调节为 5、6、7、8、9。于 12 h 取样,过滤后测定水样中的氨氮含量,并计算氨氮的去除率。每个试验设置 3 组平行。

1.6.2 不同 pH 值下游离菌和固定化微生物小球降解氨氮的情况 分别取 3 g 活化后的固定化微生物小球投入到装有 150 mL pH 值为 7 的模拟养殖水的锥形瓶中,并以与固定化微生物小球包菌量相等的游离菌为对照组,均置于 120 r/min 的摇床中反应,摇床温度分别设定为 15、20、25、30、35、40 ℃。于 12 h 取样,过滤后测定水样中的氨氮含量,并计算氨氮的去除率。每个试验设置 3 组平行。

1.7 分析方法

氨氮含量采用纳氏试剂分光光度法测定。

2 结果与分析

2.1 固定化微生物小球制备条件的优化

2.1.1 制备条件的单因素试验

2.1.1.1 CMC 含量的确定 试验结果表明,在制备固定化微生物小球时,过高或过低的 CMC 含量都会导致固定化微生物小球难以成型。图 1 所示是 CMC 含量分别为 1.5%、2.0%、2.5%、3.0% 时所制得的固定化微生物小球。当 CMC 含量为 1.5% 时,制得的固定化微生物小球易粘连;CMC 含量为 2.0% 和 2.5% 时,固定化微生物小球成型良好,大小较为均一;CMC 含量为 3.0% 时,固定化微生物小球明显拖尾。因此,在测定固定化微生物小球机械强度时只考察 CMC 质量分数为 2.0% 和 2.5% 的固定化微生物小球,完整率分别为 61.67%、90.00%,后者的机械强度明显较大。故 CMC 的最佳含量确定为 2.5%。

2.1.1.2 硅藻土含量、硝化菌含量、交联剂浓度和交联时间对固定化微生物小球降解氨氮的影响 添加硅藻土可以改善固定化微生物小球的传质性和通透性,而且硅藻土本身具有良好的吸附性能^[10-11]。同时,硅藻土能提高固定化微生物小球的沉降性,使固定化微生物小球在制备和应用时更加方便;但硅藻土含量过高也会使固定化微生物小球孔隙过大,导致菌体流失。从图 2-a、图 2-b 可以看出,硅藻土含量为 3.0%、

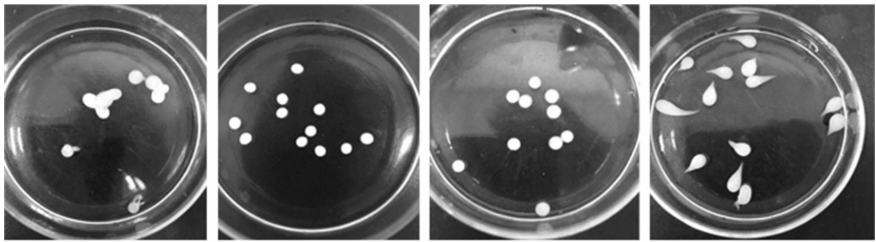


图1 不同 CMC 含量的固定化微生物小球

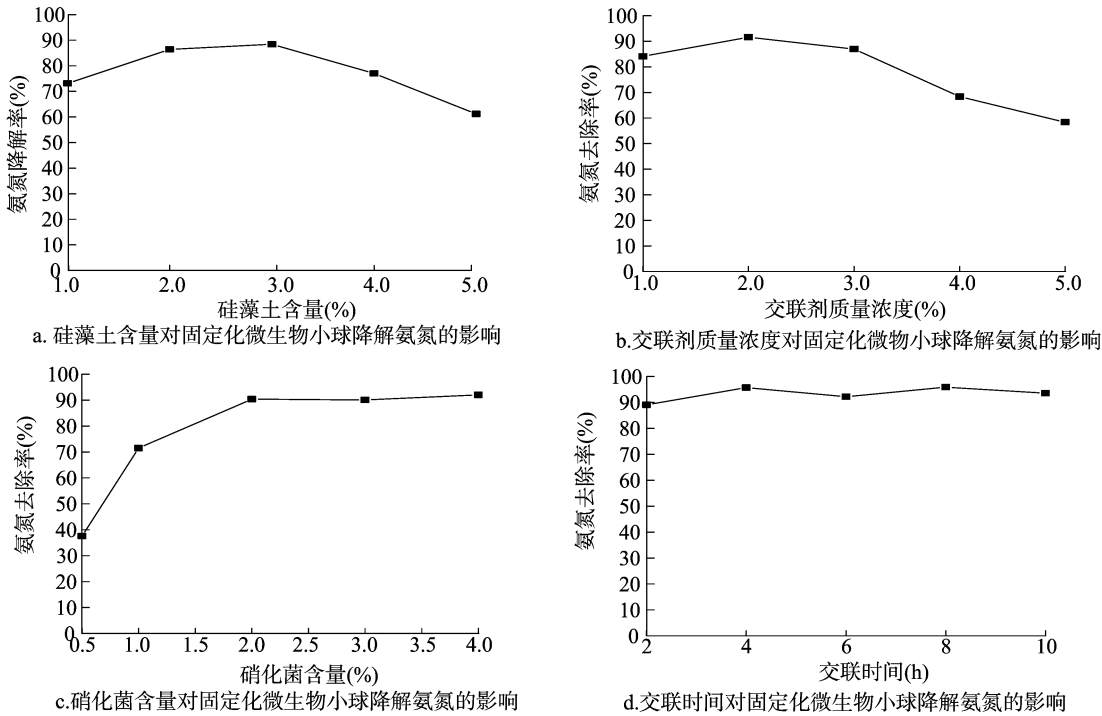


图2 硅藻土含量、硝化菌含量、交联剂的质量浓度和交联时间对小球降解氨氮的影响

交联剂浓度为 2% 时,氨氮的降解率最高,故在正交试验中将硅藻土含量水平选取为 2.5%、3.0%、3.5%,交联剂浓度水平选取为 1.5%、2.0%、2.5%。

由图 2 - c 可以看出,随着硝化菌用量增加,氨氮降解率有升高的趋势,但硝化菌含量超过 2.0% 时,氨氮的降解率没有明显提高;图 2 - d 显示,交联时间在 4 h 时,固定化微生物小球降解氨氮的效果较好。据此在正交试验中将硝化菌含量水平选取为 1.5%、2.0%、2.5%;交联时间水平选取为 3、4、5 h。

2.1.2 制备条件的正交试验 表 2 是正交试验结果,可以看出硝化菌含量对固定化微生物小球降解氨氮的性能影响最大,这与单因素试验的结果也比较相符。结合单因素试验及正交试验结果,固定化微生物小球的最优制备条件确定为 CMC 含量 2.5%、硅藻土含量 3.0%、硝化菌含量 2.5%、交联剂浓度 1.5%、交联时间 4 h。

2.1.3 固定化微生物小球的微观形貌 图 3 是最优条件下制备的固定化微生物小球的截面和表面的扫描电镜图,可以看出固定化微生物小球的内部有丰富的孔结构,这可以为微生物提供较大的表面以附着生长,同时也有利于微生物代谢物质的输出和所需物质的输入。固定化微生物小球的表面有

表 2 固定化微生物小球最佳制备条件正交试验结果

序号	硅藻土含量 (%)	硝化菌含量 (%)	交联剂浓度 (%)	交联时间 (h)	氨氮降解率 (%)
1	2.5	1.5	1.5	3	81.83
2	2.5	2.0	2.0	4	91.81
3	2.5	2.5	2.5	5	92.67
4	3.0	1.5	2.0	5	83.10
5	3.0	2.0	2.5	3	90.64
6	3.0	2.5	1.5	4	95.30
7	3.5	1.5	2.5	4	83.05
8	3.5	2.0	1.5	5	85.58
9	3.5	2.5	2.0	3	86.14
均值 1	88.77	82.66	90.44	86.20	
均值 2	89.68	89.34	87.01	90.05	
均值 3	84.92	91.37	88.79	87.11	
极差	4.76	8.71	3.43	3.85	

一定的孔结构,但相对于内部而言孔隙率较低,这可以减少包埋菌体的流失。

2.2 固定化微生物小球用量与氨氮降解情况的关系

固定化微生物小球的用量与氨氮降解情况的关系见图 4。开始,氨氮的降解率随着固定化微生物小球用量的增加而

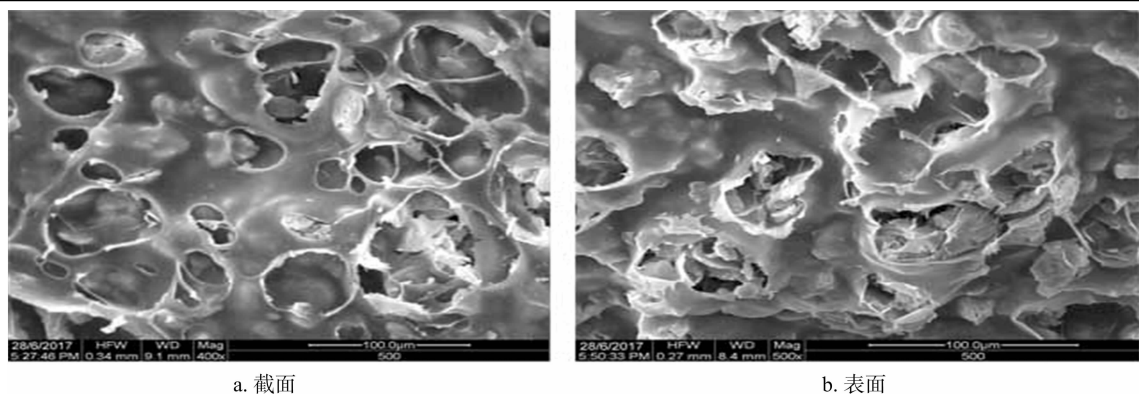


图3 固定化微生物小球扫描电镜图

提高,但提高的速率在变慢,当固定化微生物小球用量达到每 150 mL 模拟养殖水中投入 3.0 g 时,氨氮降解率达到最大,再增加小球用量,氨氮的降解率略有下降。下降的原因有可能是固定化微生物小球加入过多时,菌体无法得到充足的养分和氧气,使其代谢变慢,甚至部分死亡。故固定化微生物小球用量确定为每 150 mL 模拟养殖水投入 3.0 g。

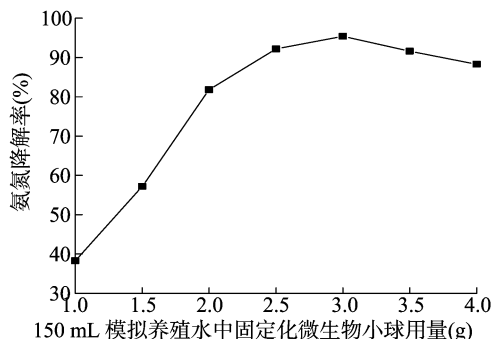


图4 固定化微生物小球用量与氨氮降解率的关系

2.3 不同应用条件下游离菌和固定化微生物小球降解氨氮的情况

2.3.1 不同温度下游离菌和固定化微生物小球降解氨氮的情况 温度的变化可以影响菌体内一些酶的活性,引起菌体生长代谢的变化。图 5 是温度变化对固定化微生物小球和游离菌降解氨氮的影响。可以看出,在低温条件下,菌体固定后对氨氮的降解效率明显较高。低温下,微生物细胞内酶的活性会降低,细胞的新陈代谢减慢,细胞增殖速度减缓,对氨氮的降解效率也会降低,而固定化载体有一定的隔热保温作用,可避免菌体直接暴露于低温环境下,从而缓冲过低的温度对菌体的影响,使其能更好地适应温度的变化。而且多孔的固定化载体可以为菌体提供附着的位置,这有利于其生长增殖。

2.3.2 不同 pH 值下游离菌和固定化微生物小球降解氨氮的情况 从图 6 可以看出,固定化微生物小球和游离菌都是在中性及弱碱性条件下对氨氮的降解效果比较好,但在弱酸弱碱性环境下,固定化微生物小球对氨氮的降解情况明显好于游离菌。

3 结论

CMC 和硅藻土作为复合载体包埋硝化菌降解氨氮有很好的效果。固定化微生物小球的最佳制备条件为 CMC 含量

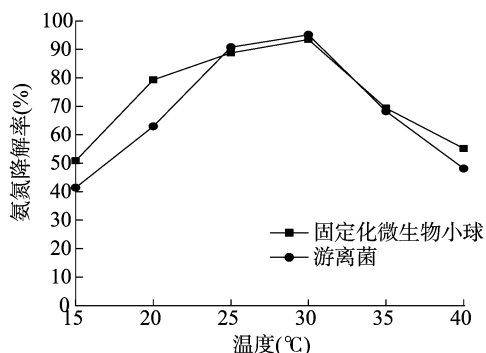


图5 不同温度下游离菌和固定化小球降解氨氮的情况

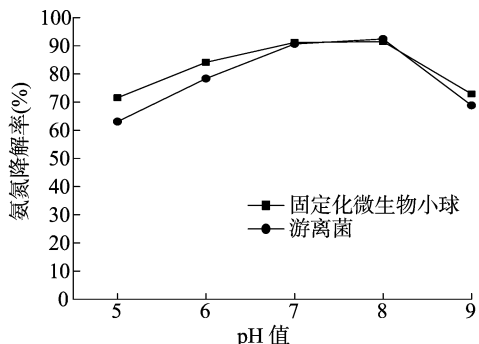


图6 不同 pH 下游离菌和固定化微生物小球降解氨氮的情况

2.5%、硅藻土含量 3.0%、硝化菌含量 2.5%、交联剂浓度 1.5%、交联时间 4 h。

固定化微生物小球的最佳应用条件为用量每 150 mL 模拟养殖水中投入 3 g、水体温度为 30 ℃、pH 值为 7。

菌体经固定后对水体温度和 pH 值的变化比游离菌有更好的适应性,在弱酸弱碱性的环境下和温度较高较低时对氨氮的降解效果比游离菌要好。

参考文献:

- [1] 郭国强,孙红飞,张永耀. 分子氨对草鱼种红细胞渗透脆性的影响[J]. 水产科学,2010,29(8):489-491.
- [2] 杨旭俊,蔡冠竟,郑伟,等. 固定化微生物技术在受污养殖水体和水华水域生物修复中的应用[J]. 微生物学通报,2015,42(4):712-720.
- [3] 申婷婷,李小明,岳秀. 微生物固定化技术的研究及应用[J]. 广州化工,2011,39(20):3-5.

吴昊,管永祥,左文刚,等. 生活污水对新围垦滩涂土壤肥力驱动及田菁生长的影响[J]. 江苏农业科学,2018,46(7):262-266.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2018.07.065

生活污水对新围垦滩涂土壤肥力驱动 及田菁生长的影响

吴昊¹, 管永祥², 左文刚³, 黄顾林⁴, 柏彦超³

(1. 江苏省互联网农业发展中心, 江苏南京 210036; 2. 江苏省耕地质量与农业环境保护站, 江苏南京 210036; 3. 扬州大学环境科学与工程学院 / 江苏省有机固体废弃物资源化协同创新中心, 江苏扬州 225127; 4. 江苏省镇江市耕地质量保护站, 江苏镇江 212009)

摘要:中国东部沿海滩涂改良后作为重要后备耕地资源,可有效缓解耕地资源紧缺的现状。符合国家农用标准(GB/T 24600—2009《城镇污水处理厂污染处置 土地改良用泥质》)的生活污泥产量大且有机质含量高,可作为滩涂土壤快速改良的有机肥源。探讨了应用不同用量(0、30、75、150、300 t/hm²)生活污泥作为“原始肥力驱动剂”对新围垦滩涂土壤理化性状的持续影响,及其对第2季绿肥植物田菁的生长、养分及重金属吸收的影响。结果表明,施用生活污泥降低了滩涂土壤盐分、pH值,提高了滩涂土壤有机质含量及N、P养分的供应,促进了绿肥植物田菁的生长,提高了其生物量及其对N、P养分的吸收。施用生活污泥增加了田菁植株地上部Cd、Mn、Zn含量及根系Cr、Zn含量。

关键词:沿海滩涂;土壤改良;生活污泥;绿肥;土壤肥力;田菁

中图分类号: S156;X703 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2018)07-0262-05

随着人口不断增长,工矿、交通、城市建设用地不断增加,我国人均耕地在快速减少,严重威胁了国家的粮食安全^[1]。中国东部沿海滩涂土地资源总面积约为217.04万hm²,主要分布在北起辽宁、南至广东、广西和海南的海滨地带,其改良后可作为重要的后备耕地资源^[2]。近50年来,滩涂围垦作为实现“耕地占补平衡”的有效手段得到了迅速发展,我国通过滩涂围垦新增了110万~120万hm²土地^[3]。按照目前我国入海河流泥沙的淤积速率,到2050年可再围垦100万~150万hm²土地。然而,新围垦滩涂土壤盐分含量高^[4],土壤

水分和盐分的运动非常活跃^[5],不适合开展农业生产。此外,新围垦滩涂土壤层次发育不全,耕作层次尚未形成,有机质含量极低,养分种类少、供应能力差^[6-7]。滩涂土壤快速改良的关键环节是大量增加其有机质含量。土壤有机质可促进土壤团聚体形成,改变盐分运动状况,抑制返盐,促进脱盐,从而减轻盐分对作物的危害,提高作物产量,达到改良滩涂土壤的目的^[8]。土壤有机质是土壤肥力物质,与土壤养分含量的增加有密切的联系,可不断地供给作物所需的各种营养、改善作物营养水平^[9]。

随着我国生活污水处理率的不断提高,生活污泥产生量也急剧增加,亟待无害化处置和资源化利用^[10-11]。大量研究表明,施用适量生活污泥可明显增加土壤有机质含量,有效改善土壤结构性、水力学性质等,由此带来的土壤理化性状的改善将对农业生产起积极作用^[12-16]。然而,前人对污泥农用的研究主要集中于一般农田,对利用生活污泥改良滩涂土壤的应用效果及作用机理研究较少。本研究拟在重金属总量控制的前提下,采用符合农用标准的生活污泥一次性施用作为“原始肥力驱动剂”,使原本几乎没有肥力的滩涂土壤迅速获得支撑绿肥植物生长的能力,使绿肥生物量得以大量积累,经原地还田腐解后形成土壤有机质,如此循环往复,可迅速提升

收稿日期:2016-10-28

基金项目:江苏省农业三新工程(编号: SXGC(2015)291、SXGC[2016]277);江苏省农业科技自主创新资金[编号: CX(15)1005];江苏省扬州市环保项目(编号: YHK1414);江苏省双创人才计划。

作者简介:吴昊(1978—),男,江苏盐城人,高级农艺师,主要从事农业资源与环境保护工作研究。E-mail: njwh2001@163.com。

通信作者:管永祥,研究员,主要从事耕地质量与农业环境保护工作研究。E-mail: gyx5598@126.com;柏彦超,博士,副教授,主要从事有机固废资源化与滩涂土壤改良工作研究。E-mail: ycbai@yzu.edu.cn。

[4] Cao G M, Zhao Q X, Sun X B, et al. Characterization of nitrifying and denitrifying bacteria immobilized in PVA and kinetics model of biological nitrogen removal by immobilized cells [J]. Enzyme and Microbial Technology, 2002, 30(8): 49-55.

[5] 王静萱, 李军, 张振家, 等. 固定化包埋颗粒对二级出水深度脱氮特性研究[J]. 环境科学学报, 2013, 33(2): 389-394.

[6] Zhang X Y, Zhu F, Chen L, et al. Removal of ammonia nitrogen from wastewater using an aerobic cathode microbial fuel cell [J]. Bioresource Technology, 2013, 146(10): 161-168.

[7] Dong Y W, Zhang Y Q, Tu B J, et al. Immobilization of ammonia-

oxidizing bacteria by calcium alginate [J]. Ecological Engineering, 2014, 73: 809-814.

[8] 陈杰, 汪霞, 赵彬, 等. *A. faecalis* strain NR的包埋固定及其氨氮降解性能[J]. 环境工程学报, 2016, 10(6): 3303-3311.

[9] 韩亚红, 王红, 段炼, 等. CMC-膨润土固定高效菌降解对硝基苯酚的研究[J]. 非金属矿, 2015, 38(5): 64-66.

[10] 何边阳, 郑婷婷, 王丰喜, 等. 纤维素/硅藻土复合气凝胶的吸附性能[J]. 环境工程学报, 2016, 10(6): 3005-3011.

[11] 乔楠, 高明星, 张彦福, 等. 改性硅藻土负载混合微生物处理染料废水的研究[J]. 硅酸盐通报, 2015, 34(12): 3451-3455.