

活性炭脱色糖蜜酵母废水混合营养培养蛋白核小球藻净化水质

张会贞, 陈娇敏, 魏东

(华南理工大学食品科学与工程学院, 广东广州 510640)

摘要: 本文研究了活性炭用于糖蜜酵母废水脱色的预处理效果, 结合出水混合营养培养蛋白核小球藻净化水质, 开发了两阶段工艺。经比较八种市售活性炭粉的脱色效果, 证实活性炭 200# 在剂量为 3.0%(m/V)、pH 3.00 时脱色效果最好, 色度去除率高达 98.96%, 同时废水 COD 和 TN 去除率分别达到 54.50%和 46.75%。脱色出水混合营养培养蛋白核小球藻, 8 d 后获得的生物量浓度(2.29 g/L)、COD 和 TP 去除率(72.41%和 79.36%)都显著高于未经预处理的原废水($p < 0.05$)。该两步法整体工艺对废水 COD、TN 和 TP 的总去除率分别高达 87.82%、68.26%和 78.57%。这些结果说明活性炭脱色显著提高了糖蜜酵母废水的透光性、显著降低了废水浓度, 在蛋白核小球藻后续培养过程实现了深度净化。因此, 两阶段工艺是一种能将高效净化废水和生产小球藻生物质结合在一起的优化工艺。

关键词: 酵母废水; 脱色; 蛋白核小球藻; 混养; 去除率

文章篇号: 1673-9078(2017)8-221-227

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2017.8.032

Purification of Molasses Wastewater from the Yeast Industry by Active Charcoal-based Decolorization and Mixotrophic Cultivation of *Chlorella Pyrenoidosa*

ZHANG Hui-zhen, CHEN Jiao-min, WEI Dong

(South China University of Technology, School of Food Science and Engineering, Guangzhou 510640, China)

Abstract: A two-step process for the purification of molasses wastewater from the yeast industry was developed using a combination of active charcoal-based decolorization and mixotrophic cultivation of *Chlorella pyrenoidosa* in the effluent. The color removal effects of eight types of commercial active charcoal powders were compared, and the optimal color removal effect was obtained using No. 200 active charcoal powder at a concentration of 3.0% (m/V) and pH 3.00. The removal rates of color, chemical oxygen demand (COD), and total nitrogen (TN) were high: up to 98.96%, 54.50%, and 46.75%, respectively. The decolorized effluent was then used for mixotrophic cultivation of *C. pyrenoidosa*. The final biomass concentration (2.29 g/L) and the removal rates of COD and total phosphate (TP) (72.41% and 79.36%) after 8 days' cultivation were significantly higher ($p < 0.05$) than those of the original wastewater without pretreatment. The total removal rates of COD, TN, and TP of this two-step process reached 87.82%, 68.26%, and 78.57%, respectively. These results indicate that the decolorization of wastewater by active charcoal can dramatically enhance the transparency and reduce the concentration of wastewater, and deep purification was realized by the subsequent mixotrophic cultivation of *Chlorella pyrenoidosa*. In conclusion, the two-step process developed in the current study is an optimized process combining high-efficiency wastewater purification and *Chlorella* cultivation.

Key words: yeast wastewater; decolorization; *Chlorella pyrenoidosa*; mixotrophic cultivation; removal rate

糖蜜酵母废水是利用糖蜜发酵生产酵母过程中产

收稿日期: 2017-01-03

基金项目: 国家 863 计划项目 (2013AA065802); 国家自然科学基金项目 (31370383); 广东省海洋渔业科技与产业发展专项 (A201401C01); 广东省公益研究与能力建设项目 (2015A020216003、2016A010105001)

作者简介: 张会贞 (1989-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 微藻生物技术
通讯作者: 魏东 (1966-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向: 工业生物技术研究开发

生的高浓度废水, 含有残糖、酵母蛋白质、氨基酸、维生素和胶体等有机物质, 以及铵氮、硫酸盐、磷、钾、钙和镁等无机物, 重金属痕量, 无毒无害。这些残余物质排放后极大污染环境, 却是植物、微生物生长所必需的营养物质, 无疑是大宗可循环利用的资源^[1]。这类废水因含有类黑精、美拉德色素和多酚类等色素而呈深棕色, 多数耐高温和光照, 其色值还可能由于色素物质的再聚合而加深^[2]。废水的深棕色会干

抗太阳光的吸收,使水体表面光合自养生物的光合作用减弱^[3]。废水中残糖和有机物含量较高,目前采用较多的生化处理对焦糖色素最多只能降解6%~7%,美拉德色素和多酚类化合物基本不能被降解^[4]。为了去除酵母废水中不能被生化降解的物质以及不利于生化降解的物质,往往利用预处理方法以提高酵母废水的可生化性,再进一步对其进行生化降解。目前研究和应用较多的预处理方法有:利用多种化学物质作为絮凝剂的混凝法、利用具有强氧化能力的·OH将难生化降解的有机物分解成小分子有机物以及CO₂和H₂O的化学氧化法和内电解法^[5]。

活性炭是一种具有发达孔隙结构、物理化学性质高度稳定、机械强度高、表面反应活性高以及表面积大的碳质材料,具有很强的吸附能力^[6]。活性炭在饮用水、工业废水、生活废水、地下水、采矿、制药、气体净化和溶剂回收等领域有广泛应用^[7]。另一方面,微藻能够利用废水中的碳、氮和磷进行生长繁殖并产生高营养价值(富含蛋白质、多糖、脂肪和维生素等)的生物物质,同时有效去除废水中的碳、氮和磷。研究表明,蛋白核小球藻能耐受高浓度糖蜜酵母废水并对废水有一定程度的净化效果^[8]。本文首先对不同种类活性炭进行了筛选,研究了优选的活性炭种类对该废水的预处理效果,进而在混养下培养蛋白核小球藻净化废水同时收获生物量。这种两阶段工艺为糖蜜酵母废水的高效净化和深度利用提供了有效方法。

1 材料和方法

1.1 材料与仪器

糖蜜酵母废水由广东五洲药业有限公司提供;八种活性炭粉为市售,编号为303A、303B、200、203、605、208、AK-310和T-80;蛋白核小球藻(*Chlorella pyrenoidosa*)由北京大学陈峰教授惠赠;葡萄糖、硝酸钠、浓盐酸和氢氧化钠等均为分析纯;COD、总氮和总磷试剂购自美国HACH公司。

AL 104型电子天平和SevenEasy型pH计购自瑞士Mettler Toledo公司;RET型磁力搅拌器购自IKA公司;DHG-9123A型电热恒温鼓风干燥箱购自上海一恒科学仪器有限公司;DHZ-DA型恒温摇床购自太仓实验设备厂;BFM-6B II型高压灭菌锅购自英国ASTELL公司;DRB200型数字式消解器和DR2700型便携式分光光度计购自美国HACH公司;HI83200多参数水质分析仪购自意大利HANNA公司。

1.2 实验方法

1.2.1 藻种活化与种子液制备

从保种的蛋白核小球藻斜面挑取一小环藻苔,在已灭菌的含10 g/L葡萄糖的Basal固体培养基平板上划线,置于光照培养箱中,在28℃、2000 lux条件下培养7 d。从平板上挑取一个单藻落,接种到装有100 mL(含10 g/L葡萄糖)Basal培养基的250 mL三角瓶中,在28℃、3000 lux、140 r/min的恒温摇床中连续培养6 d。

1.2.2 活性炭303A、303B、200、203、605和208对酵母废水净化效果

1.2.2.1 六种活性炭粉对糖蜜酵母废水预处理效果评估

将冻藏的4 L废水过夜解冻至室温,搅拌均匀,分装到500 mL烧杯中,装液量200 mL,按4.0%(m/V)剂量分别加入6种活性炭粉,300 r/min搅拌2 h,先用滤纸抽滤除去大部分活性炭,再用0.45 μm滤膜抽滤去除残余活性炭,滤液取样测量色度、COD、TN和TP。

1.2.2.2 活性炭200#不同剂量和吸附时间对废水预处理效果的影响

将解冻废水搅拌均匀,分装到500 mL烧杯中,装液量200 mL。按1.0、2.0、3.0、4.0、5.0%(m/V)剂量加入活性炭200#,300 r/min搅拌2 h,每10 min取样1.5 mL,稀释4倍后过0.45 μm滤膜,滤液在分光光度计下测色度。2 h后先用滤纸抽滤除去大部分活性炭,再用0.45 μm滤膜抽滤去除残余活性炭,滤液取样测量色度、COD、TN和TP。

1.2.2.3 初始pH对活性炭200#废水预处理效果的影响

将解冻废水搅拌均匀,分装到500 mL烧杯中,装液量200 mL。用1 mol/L盐酸或1 mol/L氢氧化钠将废水初始pH分别调至3.00、4.00、5.00、6.00、7.00、8.00、9.00、10.00、11.00和12.00,再按3.0%(m/V)剂量加入活性炭200#,300 r/min搅拌30 min。搅拌完成后,先用滤纸抽滤除去大部分活性炭,再用0.45 μm滤膜抽滤去除残余活性炭,滤液取样测量色度、COD、TN和TP。

1.2.3 活性炭AK-310和T-80对酵母废水净化效果

1.2.3.1 两种活性炭剂量对酵母废水脱色效果的影响

将解冻废水搅拌均匀,分装到250 mL三角瓶中,装液量100 mL。按1.0、1.5、2.0、2.5、3.0%(m/V)剂量分别加入活性炭AK-310和T-80,300 r/min搅拌30 min。搅拌完成后,先用滤纸抽滤除去大部分活性炭,再用0.45 μm滤膜抽滤去除残余活性炭,滤液取样测

量色度。

1.2.3.2 活性炭 T-80 不同剂量对酵母废水预处理效果影响

将解冻废水搅拌均匀,分装到 250 mL 三角瓶中,装液量 100 mL。按 1.5、2.0、2.5、3.0%(m/V)剂量分别加入活性炭 AK-310 和 T-80,300 r/min 搅拌 30 min。搅拌完成后,先用滤纸抽滤除去大部分活性炭,再用 0.45 μm 滤膜抽滤去除残余活性炭,滤液取样测定 COD、TN、NH₃-N 和 PO₄³⁻。

1.2.3.3 初始 pH 对活性炭 T-80 废水预处理效果的影响

将解冻废水搅拌均匀,分装到 250 mL 烧杯中,装液量 100 mL。用 1 mol/L 盐酸或 1 mol/L 氢氧化钠将废水初始 pH 分别调至 3.00、3.50、4.00、4.50、5.00、5.50 和 6.00,再按 3.0%(m/V)剂量加入活性炭 T-80,300 r/min 搅拌 30 min。搅拌完成后,先用滤纸抽滤除去大部分活性炭,再用 0.45 μm 滤膜抽滤去除残余活性炭,滤液取样测量色度、COD、TN、NH₃-N 和 PO₄³⁻。

1.2.4 预处理废水中蛋白核小球藻的生长和废水净化效果

预处理废水实验组:按初始 pH 3.00、3.0%(m/V)剂量加入活性炭 200#预处理废水 30 min,经滤纸抽滤和 0.45 μm 膜过滤后得到预处理废水。将预处理废水 pH 调至 6.10,分装到 250 mL 三角瓶中,装液量为 100 mL,在 121 °C 下灭菌 15 min。

原废水实验组:将解冻废水搅拌均匀,经滤纸抽滤和 0.45 μm 膜过滤后得到原废水,调节 pH 至 6.10,分装到 250 mL 三角瓶中,装液量为 100 mL,在 121 °C 下灭菌 15 min。

将灭菌冷却后的预处理废水和原废水在生物安全柜内接种蛋白核小球藻种子液,接种量为 10%(V/V),在光照强度 8083±102 Lux、28 °C、160 r/min 条件下进行混养振荡培养,培养 7 d。每天取样 4 mL,在已称重的 2 mL Eppendorf 管中 12000 r/min 离心 5 min,吸取上清液用于水质分析,藻泥用无菌水反复洗涤 3

次,60 °C 烘干至恒重后称干重。

1.3 分析测试

1.3.1 酵母废水色度、COD、总氮及总磷浓度

按照参考文献 9 测量色度(OD₄₇₅)并计算脱色率。使用 HACH 公司的专用试剂盒,按照试剂盒操作步骤,样品稀释到测量范围,加入试剂后在不同温度下于消解器 DRB 200 上进行消解,消解完全并冷却后,在 DR 2700 分光光度计中读数。

1.3.2 酵母废水 NH₃-N 及 PO₄³⁻浓度

使用意大利哈纳公司的多参数水质分析仪进行测定。按照仪器操作说明,样品稀释到测定范围,加样品和相应试剂于比色皿中,置于仪器中进行测定并读数。

1.3.3 小球藻生物量干重

小球藻生物量的测定采用干重法。吸取藻液 4 mL,在已称重的 2 mL Eppendorf 管中 12000 r/min 离心 5 min,藻泥用无菌水反复洗涤 3 次,60 °C 烘干至恒重后,用电子天平称量并计算差值,每个样品 3 个平行样,以平均值±标准差表示。

1.4 数据分析

采用 Microcal Origin 8.0 Software 对数据进行处理和统计。

2 结果与讨论

2.1 活性炭 303A、303B、200、203、605 和 208 对酵母废水净化效果

2.1.1 六种活性炭对酵母废水预处理效果的评估

糖蜜酵母废水原水的性质如表 1 所示,剂量为 4.0% (m/V)的六种活性炭对酵母废水(pH 4.35)的预处理效果如表 2 所示,脱色效果如图 1 所示。

表 1 原酵母废水的水质特性

Table 1 Water quality of original yeast wastewater

参数	COD/(mg/L)	TN/(mg/L)	TP/(mg/L)	色度(OD ₄₇₅)	pH
数值	23200±800	2293±130	416±35	4.98±0.25	4.35

表 2 剂量为 4.0% (m/V) 的六种活性炭对酵母废水(pH 4.35)净化效果的影响

Table 2 Effects of six types of active charcoals on the purification of yeast wastewater at a concentration of 4.0% (m/V)

活性炭种类	COD 去除率/%	TN 去除率/%	TP 去除率/%	脱色率/%
303A	34.02±0.64	14.53±0.60	-44.71±0.93	81.63±0.10
303B	50.10±0.82	35.47±0.78	-27.44±0.73	81.84±0.31

转下页

接上页

200	54.75±0.72	38.95±0.49	-15.10±0.32	91.08±0.61
203	27.99±0.54	31.10±0.85	0.61±0.03	-49.05±0.72
605	6.17±0.32	21.51±0.45	-5.00±0.08	-73.99±0.98
208	53.14±0.40	40.12±0.99	-42.69±1.02	79.68±0.16



图1 剂量为4.0% (m/V) 的六种活性炭对酵母废水 (pH 4.35) 脱色效果的影响

Fig.1 Effects of six types of active charcoals on the color removal of yeast wastewater at a concentration of 4.0% (m/V)

由表 2 和图 1 可知, 剂量为 4.0% (m/V) 的六种活性炭对酵母废水 (pH 4.35) 的处理效果存在显著差异。除了活性炭 203# 对酵母废水的 TP 有微量的去除效果之外, 其他活性炭处理过的废水 TP 均会增加。活性炭 200# 和 303B# 对酵母废水 COD、TN 和色度的去除效果最好, 而活性炭 200# 对废水 TP 的增加量低于活性炭 303B#。综合考虑, 活性炭 200# 对废水处理效果最好, 对 COD、TN 去除率以及脱色率分别达到了 54.75%、38.95% 和 91.08%, 且 TP 含量增加幅度较小 (15.10%)。由此可知, 活性炭 200# 能吸附废水中的物质、降低酵母废水浓度和色度。故选定活性炭 200# 用于废水预处理。

活性炭具有比表面积大、微孔体积大和吸附快的特点, 能同时有效吸附阳离子和阴离子物质, 达到净化废水的目的^[10]。不同种类活性炭的吸附能力相差较大, Dinesh Mohan 等人比较了由椰壳、椰壳纤维和米糠为原料制备的活性炭对废水处理的能力, 发现三种活性炭对废水 COD、镁和锌等物质的去除效率不同^[11]。由图 1 可以很直观的看出, 剂量为 4.0% (m/V) 的六种活性炭对酵母废水 (pH 4.35) 预处理后的颜色变

化, 脱色效果最好的是活性炭 200#, 废水由棕黑色变为了淡黄色, 说明对废水中类黑精等色素物质的吸附能力最好。

由表 2 可知, 经活性炭预处理的废水, TP 都有不同程度的增加。在活性炭制备过程的化学活化步骤中, 会将活性炭制备原料与化学活化剂按一定比例混合浸渍一段时间, 在惰性气体保护下将炭化和活化同时进行, 让化学试剂镶嵌入炭颗粒内部结构中作用而开创出丰富的微孔。磷酸活化法是比较成熟的制备工艺。磷酸活化后, 活性炭的表面基团中会生成磷酸基团^[12]。因此, 在废水预处理中, 活性炭表面磷酸基团和废水中的负离子发生了交换而得到释放, 导致酵母废水中磷酸根浓度增加, 从而使废水中总磷含量增加。

2.1.2 活性炭 200# 不同剂量和吸附时间对废水预处理效果的影响

活性炭 200# 剂量对酵母废水 (pH 4.35) 中 COD、TN、TP 和色度的去除率如表 3 所示, 脱色率随时间的变化结果如图 2 所示。

由表 3 可知, 随着活性炭 200# 剂量增加, 废水 COD、TN 和色度的去除率相应增加, TP 也随之增加。在活性炭浓度较低时, 相对于废水中可被吸附的物质, 活性炭的微孔和表面活性位点都处于短缺状态, 提高活性炭剂量能增加对废水中物质的吸附量。结合酵母废水的 TP 增加情况, 选择 3.0% (m/V) 为合适的活性炭用量。

活性炭的吸附能力和吸附速度是衡量活性炭吸附过程的主要指标^[13]。由图 2 所示, 活性炭 200# 对废水中色素物质的吸附速度较快, 混合 10 min 内几乎完成了整个脱色吸附过程, 即使增加活性炭剂量、继续延长时间, 脱色效果也变化不明显。

表 3 活性炭 200# 剂量对酵母废水 (pH 4.35) 净化效果的影响

Table 3 Effects of concentration of active charcoal No. 200 on the purification of yeast wastewater

剂量/(g/100mL)	COD 去除率/%	TN 去除率/%	TP 去除率/%	脱色率/%
1.0	22.82±1.07	6.67±0.12	-8.08±0.04	57.32±0.43
2.0	40.07±1.42	23.70±1.34	-11.11±0.53	86.14±0.11
3.0	45.99±0.89	30.69±0.11	-14.85±0.54	95.28±0.09
4.0	49.50±0.45	39.18±0.39	-31.61±0.16	97.95±0.08
5.0	52.71±0.93	44.98±0.95	-34.83±1.08	98.63±0.13

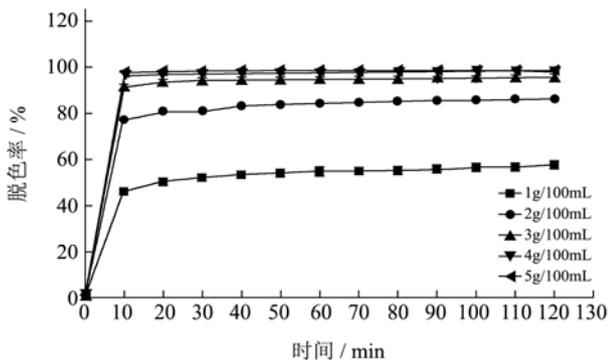


图2 活性炭 200#不同剂量下脱色率随时间变化曲线

Fig.2 Curve of color removal rate with different concentrations of active charcoal No. 200 over time

2.1.3 初始 pH 对剂量为 3.0%(m/V)的活性炭 200#净化废水效果的影响

不同初始 pH 下,剂量为 3.0%(m/V)的活性炭 200#净化酵母废水的效果见表 4。由表 4 可知,与碱性条件(pH 8.00~12.00)和中性条件(pH 7.00)相比,在酸性条件(pH 3.00~6.00)下对酵母废水 COD 去除率较高,但差异不显著($p>0.05$)。在 pH 3.00 时,剂量为 3.0%

(m/V)的活性炭 200#对酵母废水 COD 去除效率最高,为 54.50%。不同 pH 下剂量为 3.0% (m/V)的活性炭 200#对酵母废水 TN 去除率没有统一规律,虽然当 pH 4.00~7.00 时 TN 去除率低于碱性条件下,但 pH 3.00 时 TN 去除率仍为 46.75%。随着 pH 升高脱色率降低,在 pH 3.00 时最高,达到 98.96%。

当 pH 为酸性和中性条件时,剂量为 3.0%(m/V)的活性炭 200#处理过的废水 TP 增加,碱性条件下废水 TP 去除率在 94%以上,pH 12.00 时 TP 去除率最高,达到 97.91%。这种现象的可能原因是:酵母废水中含有大量钙、镁离子。在碱性条件下,磷酸根和镁、钙离子形成沉淀,并被活性炭吸附。前人研究中也发现 pH 升高到碱性时,废水中的磷酸根会以沉淀的形式去除^[14]。虽然在碱性条件下 TP 去除率可以达到 97.91%,但去除了废水中可供小球藻生长利用的磷酸根,不利于小球藻的生长。在 pH 3.00 时能获得最高的 COD 去除率和脱色率,同时能获得较高的 TN 去除率,故确定 pH 3.00 为活性炭 200#预处理酵母废水的初始 pH。

表 4 初始 pH 对剂量为 3.0% (m/V)的活性炭 200#净化酵母废水效果的影响

Table 4 Effect of initial pH on the purification of yeast wastewater pretreated with active charcoal No. 200 at a concentration of 3.0%

pH	COD 去除率/%	TN 去除率/%	TP 去除率/%	脱色率/%
3.00	54.50±0.12	46.75±1.40	-13.7±0.14	98.96±0.14
4.00	51.03±0.39	35.06±0.62	-16.44±0.97	97.98±0.33
5.00	51.03±0.41	33.77±0.23	-18.72±0.76	96.95±0.45
6.00	49.84±0.10	36.36±0.67	-13.24±0.39	95.82±1.02
7.00	46.80±0.11	31.17±0.57	-7.31±0.23	94.98±0.94
8.00	47.13±0.41	44.16±0.81	94.13±0.26	94.48±0.87
9.00	48.32±0.49	49.35±0.91	96.41±0.02	92.28±1.03
10.00	47.78±0.87	42.86±0.23	97.46±0.04	89.12±0.98
11.00	45.61±1.20	42.86±0.93	97.72±0.14	85.96±0.49
12.00	43.88±0.01	57.14±1.21	97.91±0.14	83.55±0.42

表 5 原酵母废水的水质特性

Table 5 Water quality of original yeast wastewater

参数	COD/(mg/L)	NH ₃ -N/(mg/L)	TN/(mg/L)	PO ₄ ³⁻ /(mg/L)	TP/(mg/L)	色度(OD ₄₇₅)	pH
数值	17740±60	1057±3	1800±20	0	39.0±1.2	3.77±0.05	3.63

表 6 两种活性炭剂量对酵母废水 (pH 3.63) 脱色效果的影响

Table 6 Effects of concentration of two types of active charcoals on color removal rate in yeast wastewater

剂量/(g/100 mL)	AK-310 脱色率/%	T-80 脱色率/%
1.0	55.99±0.62	69.96±0.42
1.5	57.02±0.60	84.95±0.21
2.0	69.37±0.43	92.55±0.10
2.5	77.57±0.32	96.39±0.05
3.0	82.86±0.24	97.85±0.03

2.2 活性炭 AK-310 和 T-80 对酵母废水净化效果

2.2.1 两种活性炭剂量对酵母废水脱色效果的影响

糖蜜酵母废水原水的性质以及两种活性炭剂量对酵母废水脱色效果的影响分别见表 5 和表 6。

由表 6 可知:活性炭 T-80 对酵母废水(pH 3.63)

脱色效果显著优于活性炭 AK-310, 之后选用活性炭 T-80 进行进一步优化研究。

2.2.2 活性炭 T-80 不同剂量对酵母废水预处理效果影响

活性炭 T-80 剂量对酵母废水(pH 3.63)中 COD、TN、NH₃-N 去除率及 PO₄³⁻含量的影响见表 7。由表 7 可知, 随着活性炭剂量增加, 废水 COD、TN 和 NH₃-N 的去除率相应增加, PO₄³⁻含量也随之增加, 表明提高

活性炭剂量能增加对废水中物质的吸附量。活性炭 T-80 与上述活性炭 200#相同, 都是通过磷酸活化法制备, 因此活性炭 T-80 预处理废水中 PO₄³⁻含量有明显增加。由表 5 可知原废水中没有 PO₄³⁻, TP 含量也较低, 经活性炭预处理废水中 PO₄³⁻含量的增加可以为小球藻生长提供磷源, 更加适合小球藻的生长。结合活性炭对酵母废水色度去除率以及预处理废水 PO₄³⁻含量增加的情况, 选择 3.0%(m/V)为合适的活性炭用量。

表 7 活性炭 T-80 剂量对酵母废水 (pH 3.63) 净化效果的影响

Table 7 Effects of concentration of active charcoal T-80 on the purification of yeast wastewater (pH 3.63)

剂量/(g/100 mL)	COD 去除率/%	TN 去除率/%	NH ₃ -N 去除率/%	PO ₄ ³⁻ 含量/(mg/L)
1.5	43.74±0.21	25.56±0.40	29.14±0.12	505±21.21
2.0	46.48±1.38	31.66±0.29	30.65±1.0	735±35.36
2.5	50.90±0.01	36.11±0.22	35.81±0.06	860±14.14
3.0	56.09±0.13	39.46±1.41	36.85±0.48	1085±7.07

2.2.3 初始 pH 对剂量为 3.0%(m/V)的活性炭 T-80 净化废水效果的影响

不同初始 pH 下, 剂量为 3.0%(m/V)的活性炭 T-80 净化酵母废水的效果见表 8。由表 8 可以看出, 在 pH 3.00~6.00 之间, 随着 pH 的升高, 废水 COD 去除率和脱色率逐渐降低, pH 3.00 时 COD 去除率和脱色率

最高, 分别为 55.69%和 98.12%; TN 和 NH₃-N 去除率随 pH 变化没有明显规律, 但在 pH 3.00 条件下最高, 分别达到 39.44 和 37.80%; 不同初始 pH 对废水中 PO₄³⁻含量没有显著影响, 因此确定 pH 3.00 为活性炭 T-80 净化酵母废水的初始 pH。

表 8 初始 pH 对剂量为 3.0%(m/V)的活性炭 T-80 净化酵母废水效果的影响

Table 8 Effect of initial pH on the purification of yeast wastewater pretreated with active charcoal T-80 at a concentration of 3.0% (m/V)

pH	COD 去除率/%	TN 去除率/%	NH ₃ -N 去除率/%	PO ₄ ³⁻ 含量/(mg/L)	脱色率/%
3.00	55.69±0.59	39.44±0.17	37.80±0.32	1150±14.14	98.12±0.01
3.50	54.00±0.06	36.11±0.22	36.42±0.39	1125±21.21	97.41±0.02
4.00	53.83±0.02	33.89±0.25	34.67±0.46	1155±35.36	97.12±0.04
4.50	53.67±0.58	32.23±0.51	35.67±0.14	1105±21.21	96.53±0.02
5.00	52.37±0.01	31.66±0.29	34.86±0.19	1080±14.14	96.35±0.03
5.50	51.52±0.07	31.11±0.49	35.43±0.34	1125±7.07	96.45±0.02
6.00	50.96±0.08	31.69±2.85	34.44±0.81	1085±7.07	95.89±0.01

综合上述研究结果, 剂量为 3.0%(m/V)的活性炭 200#和活性炭 T-80 在初始 pH 3.00 条件下对酵母废水均有较好的净化效果, 废水脱色率均可达到 98%以上, 但是活性炭 T-80 对废水中总氮去除率(39.44%)不及活性炭 200#(46.75%), 且用活性炭 T-80 预处理的废水中 PO₄³⁻含量较高, 不利于废水 TP 去除率, 故后续研究中采用初始 pH 3.00、剂量 3.0%(m/V)的活性炭 200#对酵母废水进行预处理。

2.3 活性炭预处理废水中蛋白核小球藻的生长和废水净化效果

初始 pH 3.00、3.0%(m/V)剂量的活性炭 200#预处理过的废水和原废水的性质如表 9 所示。活性炭预处理后 COD 和 TN 去除率分别为 55.86%和 57.39%, 对 TP 增加率为 3.81%, 脱色率为 98.15%。

表 9 酵母废水水质特性

Table 9 Water quality of yeast wastewater

	COD/(mg/L)	TN/(mg/L)	TP/(mg/L)	色度(OD ₄₇₅)
原酵母废水	26,280±83	2,300±61	294.0±5.67	5.41±0.47
预处理废水	11,600±100	980±29	305.2±8.10	0.10±0.01

采用预处理废水和原废水为培养基混养培养蛋白核小球藻,生长曲线如图3所示。前2 d内小球藻的生长较快,之后小球藻细胞进入稳定期,说明在前2 d内,小球藻能同时利用酵母废水中的有机物和无机物进行混合营养生长;而2 d后有机碳源被利用完,小球藻只能进行光合作用,由于缺乏碳源(只用空气中的CO₂)补充,生长较慢。活性炭预处理废水中小球藻最高生物量为2.29 g/L,极显著高于原废水培养的2.11 g/L ($p < 0.01$),说明活性炭预处理废水脱色后更利于小球藻生长,一方面可能是降低了酵母废水的色度,增加了培养液透光性,更利于小球藻进行光合作用;另一方面可能是除去了酵母废水中的小球藻生长抑制物。

在两种废水中培养蛋白核小球藻后 COD、TN 和 TP 的去除率见表 10。小球藻在活性炭预处理废水中生长速率更快,获得的生物量更高,对酵母废水 COD 和 TP 的去除能力更好,说明活性炭预处理提高了酵母废水的可生化利用度。结合活性炭预处理效果(表 9)和小球藻生长对酵母废水的净化效果(表 10),整个两阶段过程对酵母废水 COD、TN 和 TP 的去除效率分别达到 87.82%、68.26%和 78.57%。

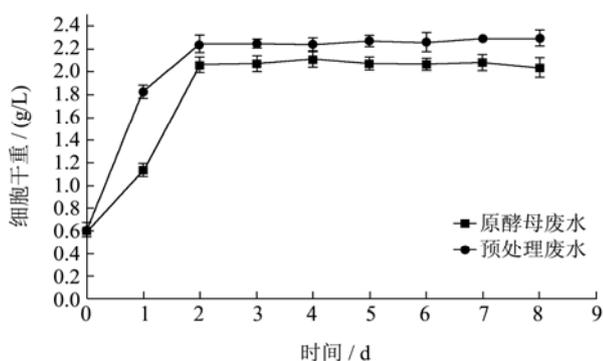


图3 蛋白核小球藻在原废水和预处理出水中的混合营养生长曲线

Fig.3 Growth curve of *C. pyrenoidosa* in original and pretreated yeast wastewaters under mixotrophic cultivation

表 10 蛋白核小球藻混养生长对原废水和预处理酵母废水的净化效果

Table 10 Purification of original and pretreated yeast wastewaters by mixotrophic cultivation of *C. pyrenoidosa*

	COD 去除率/%	TN 去除率/%	TP 去除率/%
原废水	33.33±0.94	29.57±0.79	70.00±1.32
预处理废水	72.41±1.02	25.51±0.83	79.36±1.49

3 结论

本研究通过筛选活性炭种类和优化预处理条件,建立了糖蜜酵母废水优化的预处理方法。经过活性炭

预处理的糖蜜酵母废水更利于蛋白核小球藻的混养生长,两步法工艺不仅能获得较高的生物量浓度,同时也提高了对酵母废水的净化效果,是酵母废水资源化利用的一种有效方法。研究中获得的小球藻生物量浓度仍然较低,最终出水的浓度依然较高。通过调配酵母废水中的营养元素比例、补充碳源和利用藻菌共生系统等方法,有望进一步提高小球藻对酵母废水的净化能力,值得深入研究。

参考文献

- [1] 陈书勤,廖福真,黄巧萍,等.酵母废水资源化与能源化综合治理的研究进展[J].轻工科技,2013,9:101-104
CHEN Shu-qin, LIAO Fu-zhen, HUANG Qiao-ping, et al. Advances in the comprehensive treatment of transforming yeast wastewater into resource and energy [J]. Light Industry Science and Technology, 2013, 9: 101-104
- [2] Thodoros I Liakos, Nikolaos K Lazaridis. Melanoidins removal from simulate and real wastewaters by coagulation and electroflotation [J]. Chemical Engineering Journal, 2014, 242(15): 269-277
- [3] Erhan Gengec, Mehmet Kobya, Erhan Demirbas, et al. Optimization of baker's yeast wastewater using response surface methodology by electrocoagulation [J]. Desalination, 2012, 286: 200-209
- [4] Rufian-Henares J A, Morales F J. Microtiter plate-based assay for screening antimicrobial activity of melanoidins against *E.coli* and *S.aureus* [J]. Food Chemistry, 2008, 111(4): 1069-1074
- [5] Shi Y, Liu H, Zhou X, et al. Mechanism on impact of internal electrolysis pretreatment on biodegradability of yeast wastewater [J]. Chinese Science Bulletin, 2009, 54(5): 655-661
- [6] Mohd Adib Yahya, Z Al-Qodah, C W Zanariah Ngah. Agricultural bio-waste materials as potential sustainable precursors used for activated carbon production: A review [J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2015, 46: 218-235
- [7] 李艳芳,孙仲超.国内外活性炭产业现状及我国活性炭产业的发展趋势[J].新材料产业,2012,11:4-9
LI Yan-fang, SUN Zhong-chao. Research in active carbon industrialization at home and abroad and trend to national active carbon industrialization [J]. Advanced Materials Industry, 2012, 11: 4-9
- [8] 魏东,陈娇敏,巴音克西克.两种微藻对高浓度酵母发酵废水中细胞耐受能力的比较[J].现代食品科技,2013,29(12):

- 2839-2843
- WEI Dong, CHEN Jiao-min, BAYINKe-xi-ke. Comparison of cell tolerance capacity of two microalgae species to high concentration wastewater from yeast fermentation [J]. Modern Food Science and Technology, 2013, 29(12): 2839-2843
- [9] Zhen Liang, Yan-xin Wang, Yu Zhou, et al. Stoichiometric relationship in the coagulation of melanoidinsdominated molasses wastewater [J]. Desalination, 2010, 250(1): 42-48
- [10] Chahrazed Djilani, Rachida Zaghoudi, Faycal Djazi, et al. Adsorption of dyes on activated carbon prepared from apricot stones and commercial activated carbon [J]. Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers, 2015, 53: 112-121
- [11] Dinesh Mohan, Kunwar P Singh, Vinod K Singh. Wastewater treatment using low cost activated carbons derived from agricultural byproducts-A case study [J]. Journal of Hazardous Materials, 2008, 152(3): 1045-1053
- [12] 赵丽媛,吕剑明,李庆利,等.活性炭制备及应用研究进展[J]. 科学技术与工程,2008,8(11):2915-2919
- ZHAO Li-yuan, LV Jian-ming, LI Qing-li, et al. Present situation and process in preparation of active carbon [J]. Science Technology and Engineering, 2008, 8(11): 2915-2919
- [13] 郭慧,郭兆学.活性炭处理工业废水的应用[J].科技信息, 2008,14:361-362
- GUO Hui, GUO Zhao-xue. Application of activated carbon treatment of industrial wastewater [J]. Science and Technology Information, 2008, 14: 361-362
- [14] Yakup Nurdogan, William J Oswald. Enhanced nutrient removal in high-rate ponds [J]. Water Science and Technology, 1995, 31(12): 33-43