复合除油微生物菌剂的油脂去除特性

凌 玲[1,2,3]，李秀芬[*1,2,3]

（1. 江南大学 环境科学与工程学院，江苏 无锡 214122；2. 江苏省 厌氧生物技术重点实验室，江苏 无锡 214122；3. 江苏省 水处理技术与材料协同创新中心，江苏 苏州 215009）

摘要：为扩大油脂降解的菌种库资源，提高餐厨垃圾中油脂的生物转化效率，作者以所在实验室自行保藏的4株微生物菌株为油脂降解菌，通过等比例复配获得研究用复合除油微生物菌剂，研究了影响菌剂除油效果的因素及组成菌株产脂肪酶的能力。结果表明，复合除油微生物菌剂在温度为25~55 ℃、pH为4~9、盐质量浓度为5~90 g/L、油脂体积分数1%~5%、接种体积分数1%~9%时，均具有一定的除油能力，除油率最高可达84.75%。单一菌株实验结果表明，菌株B501所产脂肪酶的酶活最高，而菌株009所产脂肪酶处于高酶活的持续时间较长，因此除油能力也最强。此外，复合菌剂的除油效果优于单一菌株。

关键词：餐厨垃圾；复合除油菌剂；油脂降解；脂肪酶酶活

中图分类号：X172　**文章编号：**1673-1689(2023)08-0031-07　**DOI：**10.3969/j.issn. 1673-1689.2023.08.004

Study on the Grease Removal Characteristics of the Compound Degreasing Microbial Agent

LING Ling[1,2,3]，*LI Xiufen*[*1,2,3]

（1. School of Environmental Science and Engineering, Jiangnan University, Wuxi 214122, China; 2. Key Laboratory of Anaerobic Biotechnology of Jiangsu Province, Wuxi 214122, China; 3. Jiangsu Water Treatment Technology and Material Collaborative Innovation Center, Suzhou 215009, China）

Abstract: To expand the strain pool of oil degradation and to improve the biotransformation efficiency of oil in food waste, 4 microbial strains preserved in the laboratory were used as lipase degrading bacteria, the compound oil-removing microbial agent was obtained by equal proportion mixture of the 4 strains. The factors affecting oil removal and lipase production ability of the different strains were investigated. The results showed that the compound oil-removing microbial agent had oil-removing ability at temperature 25~55 ℃, pH 4~9, salt content 5~90 g/L, oil concentration 1%~5%, inoculum 1%~9%, and the degradation rate of oil can reach up to 84.75%. The results of the single strain experiments showed that the strain B501 had the highest lipase activity, while strain 009 had the strongest oil removal ability because of its longer duration of high lipase activity. Also, the oil removal effect of compound bacteria is better than that of a single strain.

Keywords: food waste, compound degreasing bacteria agent, oil degradation, lipase enzyme activity

收稿日期：2021-05-18

基金项目：国家“十三五”重点研发计划项目（2016YFC0400707）；江苏省“六大人才高峰”项目（2011-JNHB-004）。

*通信作者：李秀芬（1968—），女，博士，教授，博士研究生导师，主要从事水处理、固废资源化研究。E-mail：xfli@jiangnan.edu.cn

随着我国国民经济的快速发展及人们对美好生活的追求,餐饮业规模不断扩大,同时,餐厨垃圾的产生量也以每年 10%的速度持续增长[1]。餐厨垃圾含有高浓度的有机质、油脂和盐,且含水率较高,若不及时处理,易腐败酸化,滋生蚊蝇,污染周边环境[2]。目前,餐厨垃圾的处理以生物方法为主,主要包括厌氧消化和好氧堆肥两种。与好氧堆肥技术相比,餐厨垃圾厌氧消化的周期较长、启动较慢、卫生环境条件较差,且会产生大量温室气体,因此餐厨垃圾好氧堆肥处理近年来引起了研究人员的广泛关注[3]。好氧堆肥过程不仅可消除餐厨垃圾带来的环境污染,所得堆肥产物还可用作土壤有机肥,实现餐厨垃圾的无害化、资源化和减量化,同时还能减少处理过程中的碳排放,有利于固体废物处理向碳中和模式演变,有助于生态文明建设,具有较为重要的现实意义。

油脂是餐厨垃圾的主要组成成分之一,在好氧堆肥过程中较难降解/转化,添加微生物菌剂可大大提高其转化效果,有利于提高堆肥产品的腐熟度及品质。有研究人员在 25 ℃条件下,从皮革废水中筛选得到了 4 株油脂降解菌,将其固定化后,该菌剂最高除油率可达 86.1%[4]。王亚军等将铜绿假单胞菌以体积分数 6%接种到含油脂 3 g/L 的培养基中,30 ℃条件下培养 3 d,发现油脂去除率达到 55.37%[5]。卢永昌等发现,莴苣不动杆菌对体积分数 2%花生油的去除率可达 95.7%,此后,随着油脂质量浓度的升高,油脂降解率降低[6]。Awasthi 等将短芽芽孢杆菌、农业短杆菌、蜡状芽孢杆菌、地衣芽孢杆菌进行复配,其对油脂的去除率为 65.47%[7]。肖翰等将黏至沙雷氏菌接种到病死猪堆肥的堆体中,发现接种体积分数 1.0%和 1.5%的效果优于 0.5%,最终油脂体积分数可降低到 15%[8]。

作者以所在实验室自行保藏的 4 个微生物菌株为油脂降解菌,通过等比例复配获得了所用复合除油微生物菌剂,研究了温度、pH、含盐量、油脂质量浓度及接种体积分数对除油菌生长及除油效果的影响,进一步研究了组成菌株产脂肪酶的能力,以期扩大油脂降解的菌种库资源,提高餐厨垃圾或餐厨废水中油脂的生物转化效率。

1 材料与方法

1.1 实验材料

复合除油微生物菌剂的组成菌株:均为作者所在实验室保藏菌株,编号分别为 005、009、B409 和 B501。其中菌株 005 细胞呈杆状,革兰氏阳性,好氧或兼性厌氧,在营养肉汤培养基(LB)上的菌落呈淡黄色,表面光滑湿润凸起,边缘光滑,易挑起;菌株 009 细胞呈棒状,革兰氏阳性,产芽孢,兼性厌氧,在 LB 培养基上的菌落呈乳白色,表面粗糙扩展干燥,边缘假根状,不易挑取;菌株 B409 细胞呈棒状,革兰氏阳性,产芽孢,好氧,菌落呈乳白色,半透明颗粒状,边缘整齐,表面光滑湿润;菌株 B501 细胞呈短杆状,革兰氏阳性,产芽孢,好氧,菌落呈淡黄色,不透明,表面光滑湿润,边缘整齐,凸起,易挑起。

1.2 实验方法

将上述 4 个菌株分别接种至装有牛肉膏蛋白胨培养基的摇瓶中,pH 7.0、30 ℃和 160 r/min 的条件下振荡培养,每隔 12 h 测定一次 OD_{600},待 OD_{600} 不再变化时,即分别获得 4 个菌株的种子液,将 4 个菌株的种子液按体积比 1:1:1:1 比例混合,即获得本研究用复合除油菌剂。

1.2.1 温度对除油菌生长及油脂去除的影响 取体积分数 5%的上述复合除油菌剂,投加至装有 100 mL 模拟含油废水的三角瓶中,在温度为 25、35、45、55 ℃的条件下,研究温度对模拟含油废水的 OD_{600}、菌体质量浓度、乳化油脂能力和油脂去除率的影响。模拟含油废水的组成为:$(NH_4)_2SO_4$ 2.0 g,KH_2PO_4 2.0 g,K_2HPO_4 2.0 g,$MgSO_4·7H_2O$ 0.2 g,NaCl 5.0 g,酵母提取物 1 g,蒸馏水 1 000 mL,大豆油 10 g。

1.2.2 pH 对除油菌生长及油脂去除的影响 取体积分数 5%的上述复合除油菌剂,投加至装有 100 mL 模拟含油废水的三角瓶中,用 0.1 mol/L 的 HCl 和 NaOH 调节 pH 分别至 4、5、6、7、8、9,研究 pH 对模拟废水的 OD_{600}、菌体质量浓度、乳化油脂能力和油脂去除率的影响。

1.2.3 NaCl 质量浓度对除油菌生长及油脂去除的影响 取体积分数 5%的上述复合除油菌剂,投加至装有 100 mL 模拟含油废水的三角瓶中,调整 NaCl 质量浓度分别至 10、30、50、70、90 g/L,研究 NaCl 质量浓度对模拟废水的 OD_{600}、菌体质量浓度、乳化油脂能力和油脂去除率的影响。

1.2.4 油脂质量浓度对除油菌生长及油脂去除的影响 取体积分数 5%上述复合除油菌剂,投加至装有 100 mL 模拟含油废水的三角瓶中,用大豆油

调整油脂质量浓度分别至 10、20、30、40、50 g/L，研究油脂质量浓度对模拟废水的 OD_{600}、菌体质量浓度、乳化油脂能力和油脂去除率的影响。

1.2.5　接种体积分数对除油菌生长及油脂去除的影响　取体积分数分别为 1%、3%、5%、7%、9%的上述复合除油菌剂，接种至装有 100 mL 模拟含油废水的三角瓶中，研究菌剂接种体积分数对模拟废水的 OD_{600}、菌体质量浓度、乳化油脂能力和油脂去除率的影响。

1.2.6　配方菌株的产酶能力研究　在上述最佳条件下，研究配方菌株所产脂肪酶活性随处理时间的变化情况。

1.3　分析测试项目与方法

1.3.1　模拟废水的 OD_{600}　测定含菌溶液在波长为 600 nm 处的吸光度。

1.3.2　菌体质量浓度　取两支无菌离心管，称质量后，加入一定体积的含菌溶液，8 000 r/min 离心后，弃去上清液，再次称质量后，由式(1)计算菌体质量浓度 ρ(g/L)：

$$\rho=\frac{(m_2-m_1)\times(1-w)}{V} \tag{1}$$

式中：m_1 为无菌管质量，mg；V 为含菌溶液体积，mL；m_2 为离心后无菌管质量，mg；w 为离心沉淀物的含水率，%。

1.3.3　乳化油脂能力　取 1 mL 含菌溶液加入大豆油质量分数为 2%的发酵培养基中，30 ℃、160 r/min 培养 72 h 后，在 10 000 r/min 条件下离心 15 min，取上清液 1 mL，加入磷酸钾缓冲液（pH 7.0）5.2 mL，与 0.2 mL 大豆油混合，振荡 2 min 后，静置 10 min，测 540 nm 处的吸光度，即得菌剂的乳化油脂能力。

1.3.4　除油率　油脂质量浓度采用紫外分光光度法测定[9]。除油率 Q(%)通过式(2)计算：

$$Q=\frac{\rho_0-\rho_R}{\rho_0}\times100\% \tag{2}$$

式中：ρ_0 为初始油脂质量浓度，g/L；ρ_R 为反应后油脂质量浓度，g/L。

1.3.5　脂肪酶的酶活　采用《脂肪酶制剂》中的检测方法测定[10]。脂肪酶催化脂肪水解，生成脂肪酸和甘油，由于生成的脂肪酸使酶反应液变酸，用 NaOH 标准溶液滴定，滴定至微红色保持 30 s 不褪色，记录 NaOH 消耗体积[11]。酶活 E(μ/mL)由式(3)计算：

$$E=\frac{(V_s-V_b)\times\rho_{NaOH}\times50\times D_f}{0.05\times15} \tag{3}$$

式中：V_s 为 NaOH 初始体积，mL；V_b 为 NaOH 滴定后体积，mL；ρ_{NaOH} 为 NaOH 质量浓度，g/L；D_f 为稀释倍数。

2　结果与分析

2.1　温度对除油菌生长及油脂去除的影响

油脂在水中的溶解度很小，这是油脂很难被微生物降解利用的主要原因。油脂的溶解度与温度基本呈线性关系，温度越高，溶解度越高，越有利于油脂降解[12]。温度对除油菌生长及油脂去除的影响如图 1 所示。

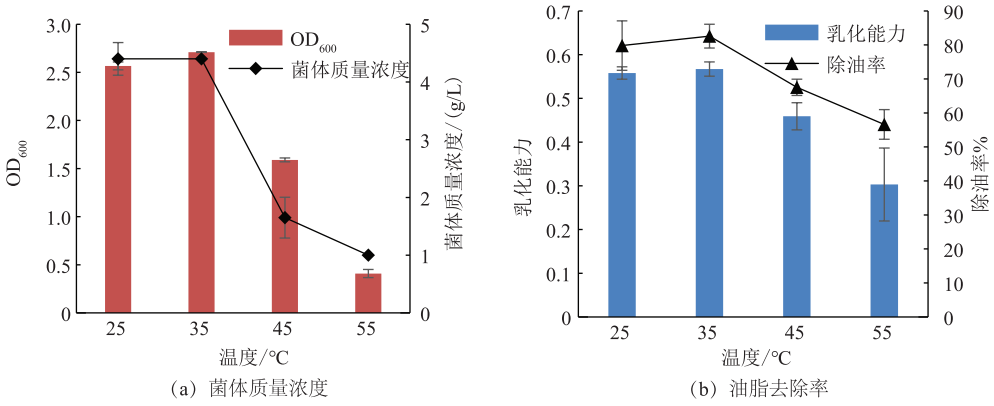
由图 1(a)可见，随温度升高，菌体生长情况略有改善后转而下降，当温度为 35 ℃时，OD_{600} 和菌体质量浓度均最高，分别为 2.71 g/L 和 4.40 g/L，其中，OD_{600} 与 25 ℃相比提高了 5.6%，提高幅度不大。当温度继续升高时，OD_{600} 和菌体质量浓度明显下降，到 55 ℃时分别下降了 84.9%和 77.3%。该结果与 Ke 等的研究结果相符[13]，即随着温度升高，除油菌 OD_{600} 降低。

由图 1(b)可以看出，油脂乳化能力和除油率与菌剂的生长情况变化一致。随着温度的升高，复合除油菌剂的乳化油脂能力和除油率均先升高后明显降低，35 ℃时的油脂乳化能力及除油效果最佳，分别为 0.567 和 82.59%，这与 Nayak 等的研究结果相似[14]。温度升高到 55℃时，乳化油脂能力和除油率分别降低了 46.6%和 31.46%，降幅较大，说明尽管温度升高有利于油脂溶解，高温对菌体生长的抑制是油脂降解的限制条件，同时说明复合除油菌剂的耐高温能力有一定局限，若后续将该复合除油菌剂应用到好氧堆肥中，有必要进一步提高耐高温菌的复配比例，以提高高温阶段复合除油菌剂的除油能力。

2.2　pH 对除油菌生长及油脂去除的影响

pH 对除油菌生长及油脂去除的影响情况如图 2 所示。

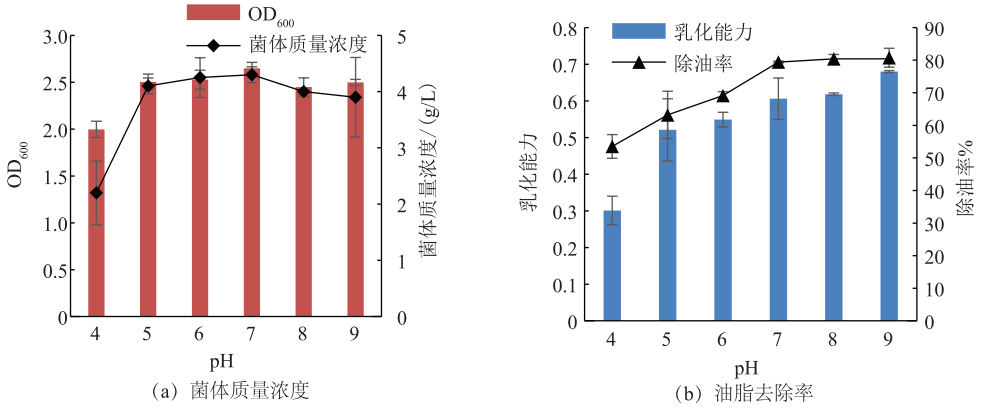
可见，在 pH 5~9 时，OD_{600} 和菌体质量浓度分别保持在 2.5 g/L 和 4.0 g/L 左右，该复合菌剂对 pH 的适应性范围较广，生长较为稳定。当 pH 降低至 4 时，OD_{600} 下降较为明显，从 pH 为 5 时的 2.504 降低至 1.997，菌体质量浓度也呈现相同的变化趋势，降



(a) 菌体质量浓度　(b) 油脂去除率

图 1　温度对菌体质量浓度和油脂去除率的影响

Fig. 1　Influence of temperature on cell concentration and oil removal rate



(a) 菌体质量浓度　(b) 油脂去除率

图 2　pH 对菌体质量浓度和油脂去除率的影响

Fig. 2　Influence of pH on cell concentration and oil removal rate

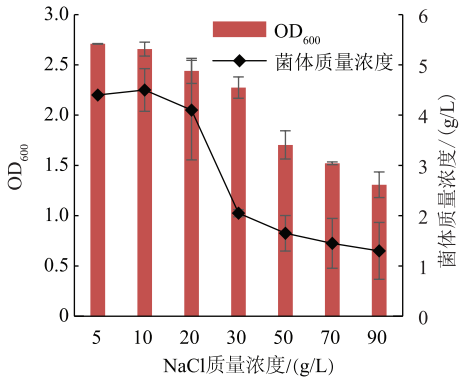
低至 2.5 g/L。微生物表面电荷受 pH 影响,低 pH 降低了微生物对营养物质的吸收进而影响其生长[15]。此外,低 pH 条件不利于脂肪酶发挥水解作用。在堆肥发酵过程中，可采取一定措施避免体系 pH 低于 5.0 的情况出现,否则有可能导致酸化,影响微生物活性,甚至导致发酵停止。

从图 2(b)可以看出,随着 pH 升高,乳化油脂能力和除油率升高，分别从 pH 为 4 时的 0.300 和 54.%升高到 pH 为 7 时的 0.606 和 79.41%，进一步升高 pH 至 9 时，乳化油脂能力和除油率分别为 0.680 和 81.26%。碱性条件下,脂肪在水中的溶解度增大,有利于微生物对油脂的吸收利用[16],脂肪水解产生的脂肪酸可被碱中和,生成脂肪酸盐,使得该过程持续进行，因此 pH 为 9 时的乳化油脂能力最强。综上所述,pH 为 7~9 时，菌剂的除油率均在 80%以上，该结果与 Wu 等和 Joo 等学者的研究结果基本一致[17-18],说明中性偏碱的环境有利于油脂的乳化和降解。

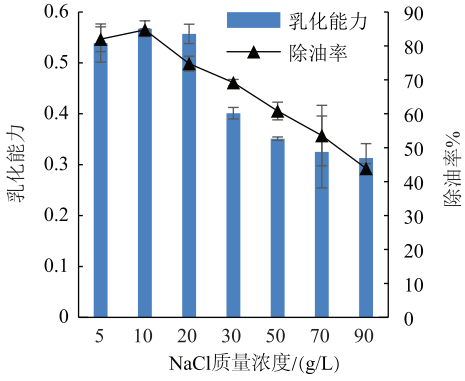
2.3　NaCl 质量浓度对除油菌生长及油脂去除的影响

微生物细胞壁可承受的渗透压为 1×10^4~1×10^6 Pa,相当于氯离子质量浓度 2 g/L。当氯离子质量浓度超过 5 g/L 时,渗透压增大,细胞因失水发生质壁分离,活性降低,严重时微生物死亡。NaCl 质量浓度对除油菌生长及油脂去除的影响如图 3 所示。

随着 NaCl 质量浓度升高,OD_{600} 和菌体质量浓度分为 2 个阶段:当 NaCl 质量浓度从 5 g/L 升高到 20 g/L 时,OD_{600} 和菌体质量浓度逐渐下降，但变化幅度不大，分别从 2.710 和 4.40 g/L 降低至 2.578 和 4.10 g/L,降低了 4.9%和 6.8%;其中 NaCl 质量浓度为 10 g/L 时,OD_{600} 和菌体质量浓度最高,说明 10 g/L 的 NaCl 质量浓度有利于微生物的生长繁殖。当 NaCl 质量浓度逐渐升高时,OD_{600} 和菌体质量浓度下降幅度增大,NaCl 质量浓度为 30 g/L 时,OD_{600} 为 2.274,菌体质量浓度为 2.05 g/L,与 NaCl 质量浓度为 20 g/L 相比，分别下降了 16.1%和 53.4%;当 NaCl 质量浓度增大到90 g/L 时,OD_{600} 和菌体质量



（a）菌体质量浓度



（b）油脂去除率

图 3　NaCl 质量浓度对菌体质量浓度和油脂去除率的影响

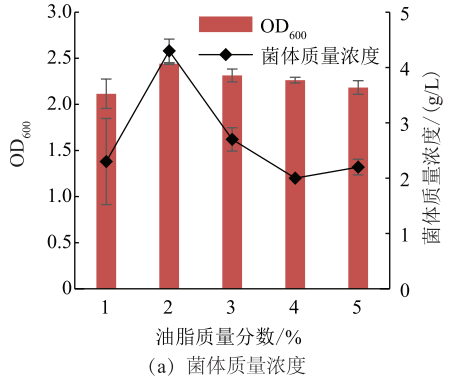
Fig. 3　Influence of NaCl content on cell concentration and oil removal rate

浓度分别下降了 51.7%和 70.5%。可见 NaCl 质量浓度或渗透压过高或过低，微生物的生长活性均受到抑制[19]。

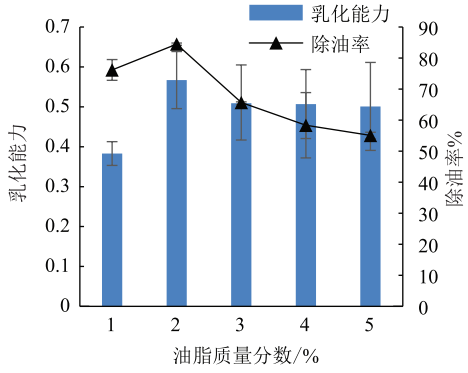
由图 3(b)可以看出，NaCl 质量浓度对乳化油脂能力和除油率的影响与菌体生长情况相近，即 NaCl 质量浓度为 5~20 g/L 时，乳化油脂的能力和除油率先升高后降低，并在 10 g/L 时取得最大值，为 0.567 和 84.75%；当 NaCl 质量浓度超过 30 g/L 时，随着 NaCl 质量浓度升高，乳化油脂能力和除油率明显降低；当 NaCl 质量浓度为 90 g/L 时，乳化油脂能力和油脂去除率分别降低至 0.313 和 43.87%，与 NaCl 质量浓度 5 g/L 时相比，降低了 41.7%和 46.49%。屈瑾等的研究表明当 NaCl 质量浓度过高时，外界渗透压高会抑制微生物活性[20]，使得微生物产酶能力下降、脂肪酶活性降低、除油效果变差。

2.4　油脂质量分数对除油菌生长及油脂去除的影响

图 4 为油脂质量分数对除油菌生长及油脂去除的影响。



（a）菌体质量浓度



（b）油脂去除率

图 4　油脂质量分数对菌体质量浓度和油脂去除率的影响

Fig. 4　Influence of oil concentration on bacterial cell concentration and oil removal rate

可以看出，随着油脂质量分数升高，OD_{600} 和菌体质量浓度先升高后缓慢降低。当油脂质量分数从 1%升高到 2%时，菌体生长情况得到改善，OD_{600} 和菌体质量浓度分别为 2.442 和 4.30 g/L，提高了 15.5%和 87%。此后随着油脂质量分数升高，OD_{600} 和菌体质量浓度逐渐降低，至 5%时，分别降低了 10.6%和 48.8%。该体系中，油脂是微生物生长的唯一碳源，质量分数过低或过高均不利于微生物生长，复合除油菌剂在油脂质量分数为 2%的条件下，生长最好；当油脂质量分数为 1%时，提供的碳源不足以满足除油菌的生长需要，当油脂质量分数高于 3%时，油脂质量分数过高，其在液体表面形成油膜，阻碍了微生物生长所需氧气的传递，微生物生长受到一定程度的抑制。

从图 4(b)可以看出，除油菌乳化油脂能力和除油率的变化趋势与菌剂生长特别是 OD_{600} 的变化情况一致，即当油脂质量分数为 2%时，乳化油脂能力和除油率最佳，达 0.567 和 84.49%；油脂质量分数为 1%时，乳化油脂能力和除油率大大降低，高于

2%时,也出现不同程度的下降。通常随着油脂质量分数升高,水中溶解氧质量浓度降低,微生物生长和活性受到抑制、产酶能力下降、乳化能力降低,不利于油脂的降解去除,该结果与柯霞等的研究结果一致[21]。

另外,当油脂质量分数升高到 5%时,OD_{600} 和菌体质量浓度分别为 2.181 和 2.2 g/L,乳化油脂能力和除油率分别为 0.501 和 55.07%,均高于油脂质量分数为 1%时的情况,说明该复合除油菌剂对油脂质量浓度的适应范围较广,可在较宽的油脂质量浓度范围内稳定生长,可用于油脂质量浓度较高的餐厨垃圾或废水的发酵过程。

2.5 接种体积分数对除油菌生长及油脂去除的影响

复合除油菌剂的接种体积分数对其生长情况及油脂去除的影响见图 5。

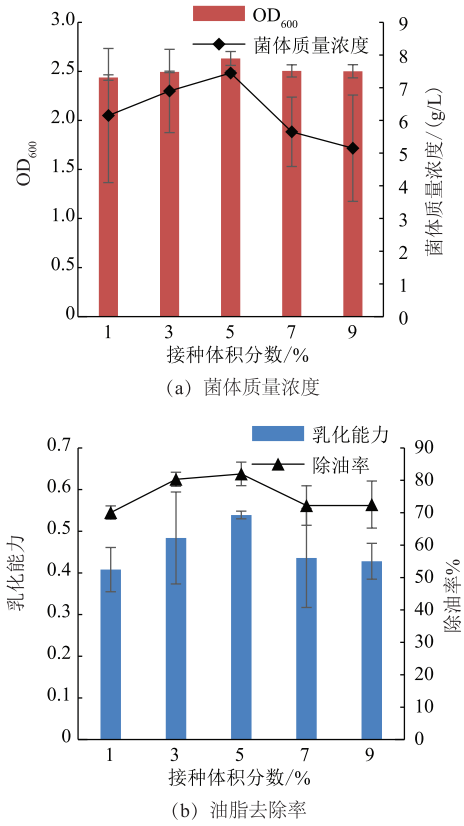


图 5 接种体积分数对菌体质量浓度和油脂去除率的影响

Fig. 5 Influence of inoculation amount on cell concentration and oil removal rate

可以看出,随着菌剂接种体积分数的增加,菌体生长情况先得到改善而后转而下降,当菌剂接种体积分数为 5%时,生长情况最好,OD_{600} 和菌体质量浓度分别为 2.632 和 7.45 g/L。当菌剂接种体积分数低于 5%时,一定培养时间内,相对较少的除油菌无法较好乳化和降解相对较多的油脂,OD_{600} 和菌体质量浓度下降明显,当菌剂接种体积分数为 1%时,分别降低了 7.4%和 17.4%。菌剂接种体积分数高于 5%时,体系内提供碳源不足,同时前期菌体快速生长引起溶解氧不足,菌体生长情况由此受到不同程度的抑制。

由图 5(b)可以看出,该菌剂的乳化油脂能力及除油率的变化与其生长情况一致,接种体积分数为 5%时,菌体质量浓度高,产生的脂肪酶多,乳化油脂能力和除油率最高,分别为 0.539 和 81.78%。在菌剂接种体积分数为 1%~9%时,最终油脂去除率都可以达到 70%以上,当接种体积分数大于 5%时,除油率下降,可能是由于可利用的总溶解氧不足及营养物质被消耗所致[22]。

2.6 单一菌株的产脂肪酶能力

微生物降解油脂的能力与脂肪酶的酶活有关,随酶活升高,油脂降解能力提高。各除油菌株所产脂肪酶的酶活及除油率随处理时间的变化情况见图 6。

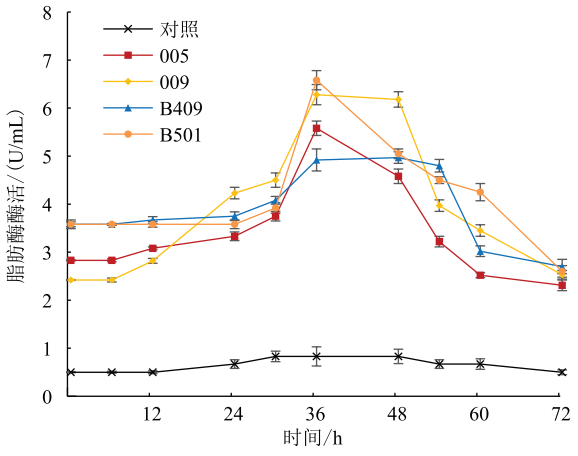


图 6 除油菌所产脂肪酶的酶活随时间的变化情况

Fig. 6 Changes of lipase activity produced by degreasing bacteria over time

随着处理时间的延长,脂肪酶的酶活先升高后降低。处理至 36 h 时,菌株 B501、菌株 009、菌株 005 和菌株 B409 所产脂肪酶的酶活均达到最高,分别为 6.58、6.28、5.58、4.92 U/mL,其中,菌株 B501 的产脂肪酶能力最强。处理至 48 h 时,菌株 009 所产脂肪酶的酶活最高,为 6.18 U/mL,且远高于其他 3

株微生物，说明菌株 009 持续产脂肪酶的能力较强。各单菌株除油结果表明，与其他 3 株微生物相比，菌株 009 的除油率最高，为 70.98%，这与其持续产脂肪酶能力较强有关。菌株 B501 和 005 的除油率分别为 63.58%和 66.03%，菌株 B409 的除油率最低，为 44.56%。

3 结　语

所得复合除油微生物菌剂的除油效果受温度、pH、NaCl、油脂质量浓度和接种体积分数的影响较大，较佳除油条件为：温度 35 ℃，pH 9，含盐量 10 g/L，油脂质量分数 2%，菌体接种体积分数 5%，除油率最高可达 84.75%。单一菌株产脂肪酶的酶活及除油率的研究结果表明，各菌株在 36 h 时的产脂肪酶能力较强，此时菌株 B501 的脂肪酶酶活最高，为 6.58 U/mL，而菌株 009 所产脂肪酶处于高酶活的持续时间较长，因此除油率最高，达 70.98%。与单一菌株相比，复合除油微生物菌剂的除油率有所提高。

参考文献：

[1] 李芸溪. 餐厨垃圾资源化产短链 / 中链羧酸[D]. 哈尔滨：哈尔滨工业大学，2020.
[2] CERDA A，ARTOLA A，FONT X，et al. Composting of food wastes：status and challenges[J]. **Bioresource Technology**，2018，248：57-67.
[3] LONG L N，XU F Q，GE X M，et al. Improving the sustainability of organic waste management practices in the food-energy-water nexus：a comparative review of anaerobic digestion and composting[J]. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**，2018，89：151-167.
[4] 朱超，张文婷，段翠花，等. 低温油脂降解菌的分离和菌剂构建及中试验证[J]. 皮革科学与工程，2020，30(6)：21-27.
[5] 王亚军，蔡文娟，耿冲冲，等. 一株油脂降解菌的筛选及其降解条件优化[J]. 生态环境学报，2020，29(5)：1031-1038.
[6] 卢永昌，张继龙，张建栋，等. 餐饮高浓度含油废水降解菌筛选及降解特性研究[J]. 工业水处理，2019，39(12)：64-68.
[7] AWASTHI M K，SELVAMAC A，CHAN M T，et al. Bio-degradation of oily food waste employing thermophilic bacterial strains [J]. **Bioresource Technology**，2018，248：141-147.
[8] 肖翰，刘标，尹红梅，等. 病死猪堆肥高效油脂降解菌的筛选及堆肥效果研究[J]. 浙江农业学报，2017，29(1)：44-50.
[9] 康燕莉. 高效油脂降解菌的筛选及在含油废水中处理中的应用[D]. 兰州：兰州交通大学，2013.
[10] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局，中国国家标准化管理委员会. GB/T 23535—2009，脂肪酶制剂[S]. 北京：中国标准出版社，2009.
[11] 刘延波，邢星月，赵志军，等. 高产脂肪酶菌株的筛选鉴定及产酶条件优化[J]. 中国酿造，2019，38(7)：54-59.
[12] 汤逢. 油脂化学[M]. 南昌：江西科学技术出版社，1985：40-41.
[13] KE X，HUA X，SUN J C，et al. Synergetic degradation of waste oil by constructed bacterial consortium for rapid *in-situ* reduction of kitchen waste[J]. **Journal of Bioscience and Bioengineering**，2021，131(4)：412-419.
[14] NAYAK N S，PUROHIT M S，TIPRE D R，et al. Biosurfactant production and engine oil degradation by marine halotolerant *Bacillus licheniformis* LRK1[J]. **Biocatalysis and Agricultural Biotechnology**，2020，29：101808.
[15] 何爱翠. 微生物降解法处理工业含油废水的研究[D]. 长沙：中南大学，2007.
[16] ZHANG X Y，KONG D W，LIU X Y，et al. Combined microbial degradation of crude oil under alkaline conditions by *Acinetobacter baumannii* and *Talaromyces* sp.[J]. **Chemosphere**，2021，273：129666.
[17] WU H S，TSAI M J. Kinetics of tributyrin hydrolysis by lipase[J]. **Enzyme and Microbial Technology**，2004，35(6)：488-493.
[18] JOO H S，NDEGWA P M，SHODA M，et al. Bioremediation of oil-contaminated soil using *Candida catenulate* and food waste[J]. **Environmental Pollution**，2008，156(3)：891-896.
[19] 刘婕. 除油菌的筛选鉴定及油脂废水处理研究[D]. 广州：华南理工大学，2010.
[20] 屈瑾，陈银燕，赵若瑾，等. 壳聚糖固定化气单胞菌处理餐厨高油脂废水[J]. 生物工程学报，2021，37(2)：615-624.
[21] 柯霞，孙嘉诚，薛亚平，等. 一种耐高温的餐厨垃圾油脂降解复配菌剂及其应用. 中国：202010737378.5[P]. 2020-07-28.
[22] IBRAHIM S，ZAHRI K N M，PETER C et al. Optimisation of biodegradation conditions for waste canola oil by cold-adapted *Rhodococcus* sp. AQ5-07 from Antarctica[J]. **Electronic Journal of Biotechnology**，2020，48：1-12.