

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2022.09.015

# 耐酸性酵母菌筛选及强化污泥生物沥浸预处理研究

覃海光<sup>1,2,3</sup>, 张 军<sup>1,2,3</sup>, 鲍 雨<sup>1,2,3</sup>, 王敦球<sup>1,2,3</sup>, 张 华<sup>1,2,3</sup>,  
孙晓杰<sup>1,2,3</sup>

(1. 桂林理工大学 环境科学与工程学院, 广西 桂林 541004; 2. 桂林理工大学 广西环境污染控制理论与技术重点实验室, 广西 桂林 541004; 3. 桂林理工大学 岩溶地区水污染控制与用水安全保障协同创新中心, 广西 桂林 541004)

**摘 要:** 针对水溶性有机物对硫杆菌的毒害作用导致生物沥浸效率降低的问题,开展了耐酸性酵母菌生理生化特性研究,并验证了其强化污泥生物沥浸预处理的可行性。结果表明,菌株BJ-1属于红酵母菌属,其适宜的温度和pH范围分别为28~30℃和3.0~7.0,说明酵母菌BJ-1为中温耐酸性菌。当酵母菌BJ-1初始接入浓度为 $1 \times 10^6$ 个/mL时,能够较好地加速生物沥浸进程,并使沥浸污泥的脱水性能提升5~6倍,经过其处理后污泥的沉降率提高3.1倍,毛细吸水时间缩短51%,污泥比阻降至 $1.0 \times 10^{12}$  m/kg以下。脱水效果最佳时间是沥浸2 d。

**关键词:** 耐酸性酵母菌; 生物沥浸; 城市污泥; 脱水

**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2022)09-0094-06

## Screening of an Acid-resistant Yeast Strain for Enhancement of Sludge Bioleaching Pretreatment

QIN Hai-guang<sup>1,2,3</sup>, ZHANG Jun<sup>1,2,3</sup>, BAO Yu<sup>1,2,3</sup>, WANG Dun-qiu<sup>1,2,3</sup>,  
ZHANG Hua<sup>1,2,3</sup>, SUN Xiao-jie<sup>1,2,3</sup>

(1. College of Environmental Science and Engineering, Guilin University of Technology, Guilin 541004, China; 2. Guangxi Key Laboratory of Environmental Pollution Control Theory and Technology, Guilin University of Technology, Guilin 541004, China; 3. Collaborative Innovation Center for Water Pollution Control and Water Safety in Karst Area, Guilin University of Technology, Guilin 541004, China)

**Abstract:** The toxic effect of water-soluble organic compounds on *Thiobacillus* leads to the decrease of its bioleaching efficiency. The physiological and biochemical characteristics of the acid-resistant yeast were investigated, and its feasibility for enhancing the bioleaching pretreatment of sludge was verified. The strain BJ-1 belongs to *Erythemyces*, and its suitable temperature and pH range were 28–30℃ and 3.0–7.0, respectively, indicating that yeast BJ-1 is a moderate temperature and acid-resistant bacterium. When the initial concentration of yeast BJ-1 was  $1 \times 10^6$  CFU/mL, the bioleaching process could be accelerated, and the dewatering performance of the leached sludge could be improved by

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51868011、51638006); 广西科技重大专项(桂科AA18118013); 广西自然科学基金资助创新研究团队项目(2018GXNSFGA281001); “广西特聘专家”专项经费资助项目

通信作者: 张军 E-mail: zjun@glut.edu.cn

5~6 times. After the treatment, the sedimentation rate of the sludge increased by 3.1 times, the capillary suction time was shortened by 51%, and the sludge specific resistance decreased to less than  $1.0 \times 10^{12}$  m/kg. The best dewatering performance was obtained when the leaching time was 2 days.

**Key words:** acid-resistant yeast; bioleaching; urban sludge; dewatering

城市污泥是我国典型的有机固体废弃物,产量巨大。但是由于污泥含水率较高,机械脱水较为困难,导致污泥难以运输和有效利用。因此,如何降低污泥的含水率、有效地处置大量污泥成为当前亟待解决的难题。

生物沥浸能显著改善污泥的脱水性,其原理是利用嗜酸性氧化亚铁硫杆菌和嗜酸性氧化硫杆菌的生物作用降低反应体系的pH,使大部分适合中性pH生长的细菌胞体裂解死亡,胞内水得以释放,从而提高污泥的脱水性能。细菌胞体裂解的同时也会释放水溶性有机物,而水溶性有机物对硫杆菌有毒害作用。异养菌可以消耗小分子水溶性有机物,从而减轻其对硫杆菌的毒害。周婷等<sup>[1]</sup>通过将踝节霉菌投入生物沥浸体系中,发现生物沥浸时间可以缩短43%。王世梅<sup>[2]</sup>将酵母菌R30与硫杆菌混合后在灭菌污泥中培养,发现添加酵母菌能有效缩短沥浸时间。谭险夷等<sup>[3]</sup>在酸性条件下培育出了以球衣菌属为主的丝状菌接种液,且接入丝状菌可以提高生物沥浸效率。

霉菌虽然繁殖速度迅速,但是容易被污染,在实验室研究过程中不易控制接种量。酵母菌作为一类典型的异养菌,具有耐酸、对营养物质要求简单、生长快等特点,将耐酸性异养菌用于生物沥浸具有很好的应用前景。但目前有关污泥沥浸体系的酵母分离及其生理生化特性研究较少。酵母菌在生物沥浸中是否存在最佳作用阶段尚未明确,其接入浓度对生物沥浸的影响至今也鲜见报道。因此,笔者从生物沥浸的污泥体系中筛选出了一株常温耐酸性酵母菌,并对其生理生化特性进行了研究,探讨了常温耐酸性酵母菌强化污泥生物沥浸预处理的可行性。

## 1 材料与方法

### 1.1 生物沥浸污泥来源及驯化

供试污泥取自桂林市某污水处理厂的污泥浓缩池。在反应器中加入5 L新鲜供试污泥,再加入30 g  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 作为生物沥浸功能菌的能源物质,

( $30 \pm 1$ ) °C恒温水浴,曝气量为5 L/min,搅拌器转速为80 r/min,每天补充水至初始体积,培养至污泥pH稳定在2.0~3.0,即为初步富集培养液。再以接种比为10%重复上述培养过程两次,所得驯化污泥作为序批式生物沥浸实验的接种物。

### 1.2 耐酸性酵母菌的分离纯化及鉴定

#### 1.2.1 菌源的收集

本实验菌源取自课题组此前进行的连续进泥式反应器运行20 d后第4格室中的混合污泥。用牛皮纸封口250 mL锥形瓶,并于121 °C下高压灭菌30 min,得到无菌采样瓶。在生物沥浸反应器采样口接取100 mL驯化污泥,并迅速用三角烧瓶封口膜封口后带回实验室,置于4 °C冰箱中保存(不超过2 d),以备后续实验使用。

#### 1.2.2 分离纯化

将生物沥浸以后的污泥按照10%接种比接种至马铃薯葡萄糖(PDB)培养基中,在温度为28 °C的条件下进行扩大培养2~3次以后,取0.1 mL菌液涂布于马铃薯葡萄糖琼脂(PDA)培养基上,结果发现PDA培养基出现了明显的多个以红色菌落为主的单菌落,在平板上挑取红色单菌落继续在PDA培养基上进行平板划线,反复划线接种3~4次后得到纯菌菌落,选取其中菌落特征最明显的一株命名为BJ-1进行后续实验。

#### 1.2.3 生理生化特征和鉴定

**菌落形态:**挑取单菌落在PDA培养基上进行划线接种,在28 °C下恒温培养3~4 d后,观察划线末端菌落形态。细胞显微形态包括细胞形状、大小、生长繁殖方式、是否有假菌丝等。

**单个菌体形态:**先挑取PDA培养基上单菌落接入PDB培养基中振荡培养1 d左右,吸取1 mL菌液依次稀释 $10^1$ 、 $10^2$ 、 $10^3$ 、 $10^4$ 和 $10^5$ 倍后用光学显微镜在400倍下观察。

**DNA测序:**酵母菌DNA提取采用SDS裂解法。酵母菌26S rDNA D1/D2区PCR反应体系(50  $\mu\text{L}$ )为引物 NL1 (5'-GCA TATCAA TAA GCG GAG

GAAAAG-3') 1  $\mu$ L、引物 NL4 (5'-GGTCCG TGT TTC AAG ACG G-3') 1  $\mu$ L、dNTP 1  $\mu$ L、Colorless Go Taq Reaction Buffer 5  $\mu$ L、Taq DNA 聚合酶 0.5  $\mu$ L、模板 DNA 1  $\mu$ L、双蒸水 40.5  $\mu$ L。

生理生化特性实验:主要包括酵母菌 BJ-1 的糖发酵实验(葡萄糖、乳糖、半乳糖、麦芽糖和蔗糖)和碳源(葡萄糖、乳糖、半乳糖、麦芽糖和蔗糖)、氮源(尿素、硫酸铵、蛋白胨和硝酸钾)同化实验。

### 1.3 可行性实验

采用序批式反应器对浓缩池的污泥进行生物沥浸,反应条件:(30 $\pm$ 1)  $^{\circ}$ C 恒温水浴,曝气量为 5 L/min,搅拌器转速为 80 r/min。将 PDA 培养基上已纯化的酵母菌 BJ-1 挑出单一菌落接种于 PDB 培养基中,在 180 r/min、28  $^{\circ}$ C 条件下振荡培养 1 d 左右,将菌液稀释后用血球计数板在光学显微镜下计数,得到菌液浓度。用无菌水稀释菌液,使反应器中菌液的添加量分别为 25、125、250 mL,即接种量为 0.5%、2.5%、5.0%,并使反应器中的菌浓度达到  $2 \times 10^5$ 、 $1 \times 10^6$  和  $5 \times 10^6$  个/mL。

### 1.4 分析项目及方法

污泥 pH、氧化还原电位(ORP)分别采用 pH 计和 ORP 计进行测定,含固率采用烘干法进行测定,污泥比阻(STR)、沉降比分别采用真空抽滤法、量筒法进行测定。污泥在 4 000 r/min 下离心 5 min,所得上清液采用石墨炉快速催化消解法测定溶解性有机物(SCOD)。

## 2 结果与讨论

### 2.1 生理生化特征

BJ-1 菌株不能发酵葡萄糖、乳糖、半乳糖、麦芽糖和蔗糖,不能同化乳糖和麦芽糖,但可以同化葡萄糖、半乳糖和蔗糖,以及尿素、硫酸铵、蛋白胨和硝酸钾。BJ-1 的菌落表面光滑且不透光,单菌落直径为 2.5~3.5 mm,呈红色,圆形,无荚膜,菌落周边整齐。在光学显微镜下观察呈圆形或卵圆形,直径为 4.0~5.0  $\mu$ m。

### 2.2 菌种鉴定

BJ-1 菌株的 26S rDNA 基因序列全长为 596 bp,利用 GenBank 中的基因序列库进行 Blast 检索,构建 BJ-1 菌株的系统发育树,如图 1 所示。BJ-1 菌株与多种红酵母菌属 *Rhodospiridium* sp. 有较高的同源性。根据其能同化  $\text{KNO}_3$  和  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ ,不能发酵糖

及菌落和单细胞形态等特点,判定 BJ-1 菌株属于红酵母菌属。

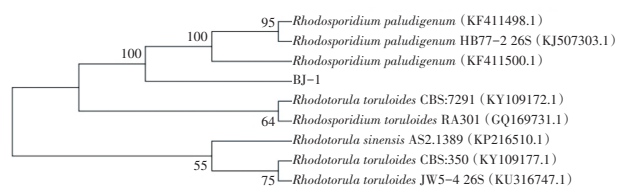


图1 BJ-1 菌株的 26S rDNA 序列系统发育树

Fig.1 Phylogenetic tree of 26S rDNA sequence of BJ-1

### 2.3 酵母菌 BJ-1 的适宜生长条件

当温度低于 25  $^{\circ}$ C 和高于 35  $^{\circ}$ C 时,酵母菌 BJ-1 的生长受到一定影响,如图 2(a) 所示,这可能是低温降低了酵母菌细胞膜的流动性,影响其生长及代谢;高温则对酵母菌的重要组成成分造成了不可逆的破坏。在 28~30  $^{\circ}$ C 条件下其生长较好,说明酵母菌 BJ-1 为中温性菌,易于在常温下培养。分析 pH 对 BJ-1 生长的影响发现,当 pH 为 3.0~7.0 时, BJ-1 能够较好地生长;当 pH 为 8.0 时,其生长速度变慢;当 pH 为 2.5 时, BJ-1 的生长受到一定影响;当 pH 为 2.0 时, BJ-1 的生长明显受到抑制,但依旧能够存活,见图 2(b)。

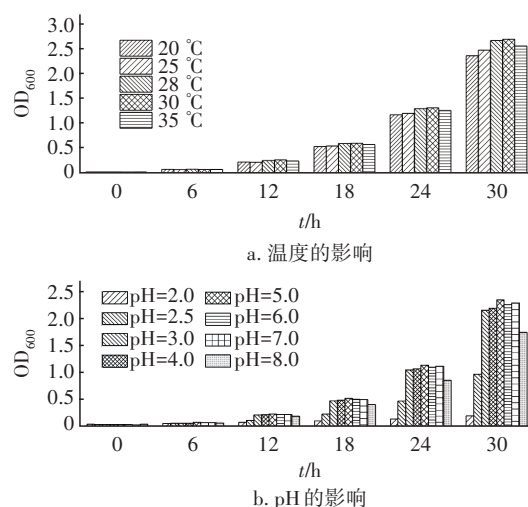


图2 温度和 pH 对酵母菌 BJ-1 生长的影响

Fig.2 Effect of temperature and pH on the growth of BJ-1

### 2.4 酵母菌 BJ-1 对污泥生物沥浸的影响

#### 2.4.1 pH 和 ORP 的变化

图 3 为 BJ-1 菌株初始浓度对 pH 和 ORP 的影响。可以看出,酵母菌 BJ-1 的添加提高了生物沥浸速率。0~48 h,不同 BJ-1 菌株初始浓度条件下, pH 均迅速下降,其中当 BJ-1 初始浓度为  $1 \times 10^6$  和  $5 \times 10^6$



个/mL时pH下降速率最快,当初始浓度为 $2 \times 10^5$ 个/mL时pH下降速率次之,对照组最慢。接入酵母菌的实验组比对照组提前24 h达到稳定,表明添加一定量BJ-1菌株可以加快酸化速率。在沥浸进行的第3天,先达到pH稳定的两实验组出现pH回升的现象,可能是由于到了沥浸后期,随着能源物质的减少,以及进行沥浸的功能菌活性降低,导致产生的 $H^+$ 变少,使污泥所带的负电荷增加<sup>[4]</sup>。

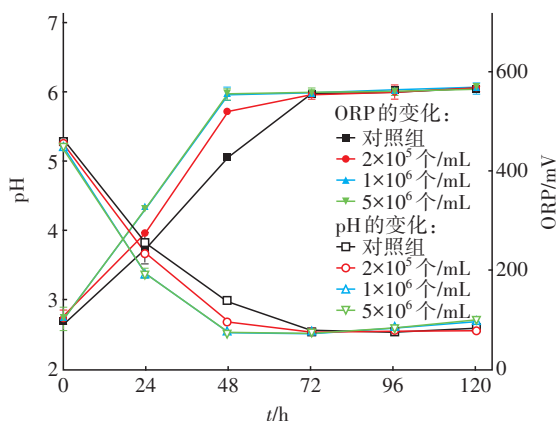


图3 BJ-1菌株初始浓度对pH和ORP的影响

Fig.3 Effect of initial concentrations of BJ-1 on pH and ORP

ORP随着沥浸反应的进行逐渐增大。当BJ-1菌株初始浓度不同时,ORP升高速率明显不同,反应进行到48 h时,对照组的最低,仅为426 mV, BJ-1菌株初始浓度为 $1 \times 10^6$ 和 $5 \times 10^6$ 个/mL实验组的ORP均较大,分别上升至560.5和563.8 mV。初始浓度为 $2 \times 10^5$ 个/mL实验组的ORP在两者之间,为520 mV。在48~72 h,实验组和对照组的ORP先后达到并稳定在560 mV左右,这可能与营养物质的添加量相同有一定关系<sup>[5]</sup>。体系中不断有 $Fe^{2+}$ 被氧化成 $Fe^{3+}$ , ORP随之升高,所以ORP可以反映 $Fe^{2+}$ 的氧化速率,从而间接反映氧化亚铁硫杆菌的生长情况。

由此可见,投加酵母菌BJ-1能影响生物沥浸污泥酸化的速率。当加入的BJ-1菌株初始浓度低于 $10^6$ 个/mL时,生物沥浸污泥酸化速率随接入浓度的升高而变快;当加入的BJ-1菌株在 $10^6$ 个/mL数量级时,生物沥浸污泥酸化速率则不会随着接入酵母菌浓度的升高而加快。

#### 2.4.2 污泥的脱水性能

添加不同浓度的BJ-1菌株,经生物沥浸处理后污泥比阻均呈先迅速减小后又缓慢回升的变化规

律,如图4所示。浸沥前2 d,添加BJ-1菌株初始浓度为 $1 \times 10^6$ 和 $5 \times 10^6$ 个/mL实验组污泥比阻的下降率分别为81.18%和80.86%,根据污泥脱水性能的等级划分,属于易脱水污泥,添加酵母菌初始浓度为 $2 \times 10^5$ 个/mL实验组的污泥比阻降低了69.78%,此时仍属于中等难度的脱水污泥,对照组的污泥比阻下降最慢。分析原因,可能是易脱水污泥两组实验的pH在沥浸2 d时已先达到稳定值,而中等难度脱水的实验组污泥pH尚未降到稳定值,污泥未完全酸化,而沥浸主要是通过酸化污泥改善其脱水性能<sup>[6]</sup>。pH稳定后2~3 d,各组污泥比阻均有不同程度的回升。

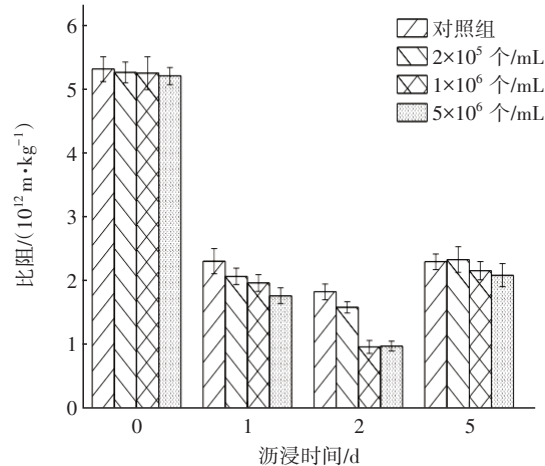


图4 不同BJ-1菌株初始浓度下污泥比阻的变化

Fig.4 Change of sludge specific resistance with different initial concentrations of BJ-1

与污泥比阻的变化趋势相反,生物沥浸进行的前2 d,体系内污泥的沉降率均逐渐上升,如图5(a)所示。沥浸1 d后,添加BJ-1菌株初始浓度为 $1 \times 10^6$ 和 $5 \times 10^6$ 个/mL实验组的沉降率分别为28.3%和28.5%,而其他组的沉降率稍低。沥浸第2天,实验组和对照组的沉降率差距逐渐减小。结合图3可知,污泥的沉降率随着体系pH的下降而上升,沥浸2 d时四组实验的沉降率逐渐接近的原因可能是pH下降较快的两组在沥浸2 d时pH已趋于稳定,而pH下降较慢的两组沉降率还在随着反应的进行而降低。继续反应3 d后结束沥浸,此时各组的沉降率均较沥浸2 d时有所下降,这与刘恒甫等<sup>[7]</sup>所得结论一致。因此,生物沥浸过程中污泥的沉降率不会随着沥浸时间的增加而不断增大,此过程存在一个最佳反应时间使沉降率最大。本实验中,生物沥浸进

行2 d时沉降效果最好。

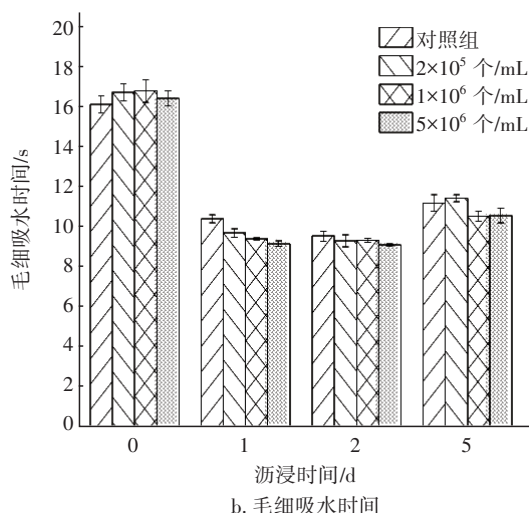
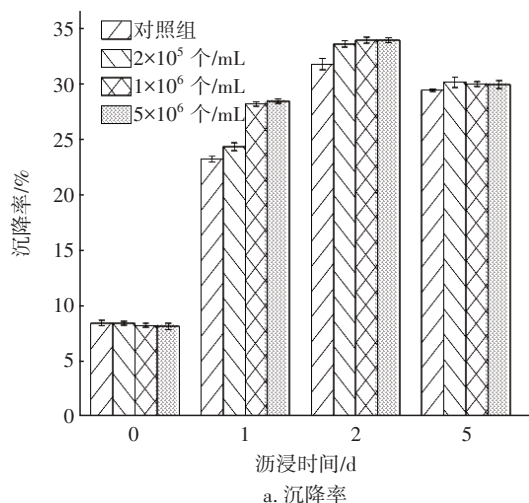


图5 不同BJ-1菌株初始浓度下污泥沉降率和毛细吸水时间的变化

Fig.5 Changes of sludge sedimentation rate and CST with different initial concentrations of BJ-1

毛细吸水时间(CST)的变化趋势与污泥比阻类似,接入相同初始浓度酵母菌进行污泥生物沥浸时,各实验组的CST值均是先迅速减少后又缓慢回升,见图5(b)。沥浸进行1 d时CST值变化最明显,对照组以及BJ-1菌株初始浓度为 $2 \times 10^5$ 、 $1 \times 10^6$ 、 $5 \times 10^6$ 个/mL实验组的CST值依次减少了5.7、7.0、7.4和7.3 s。结合图3可以发现,此阶段也是沥浸周期中pH下降最快的阶段。1~2 d时,随着沥浸的进行,体系不断酸化, $H^+$ 继续中和污泥颗粒表面的负电荷<sup>[8]</sup>,CST值逐渐下降,此时BJ-1菌株初始浓度为 $1 \times 10^6$ 个/mL实验组的CST值下降率最大,按菌株初始浓度从小到大的顺序,四组实验的CST值下降率

分别为42%、48%、51%、45%。但在接种后3 d,各组CST值均出现小幅回升。因此,与沉降率相似,CST值反映出来的脱水效果最佳的沥浸时间是2 d。

根据各组污泥pH的变化趋势,并结合反映污泥脱水性能的污泥比阻、沉降率和毛细吸水时间来看,上述现象的出现可能是因为沥浸后期自养菌所需的能源物质逐渐耗尽,主要菌群逐渐变成以有机质为营养物质的异养菌,异养菌群个体体积较自养菌大,分泌出的胞外聚合物(EPS)等也比自养菌多。

### 2.4.3 滤液中SCOD的变化

生物沥浸第1天,实验组和对照组的SCOD浓度均有不同程度的降低,其中对照组的下降速率最慢,下降了158.67 mg/L,如图6所示。

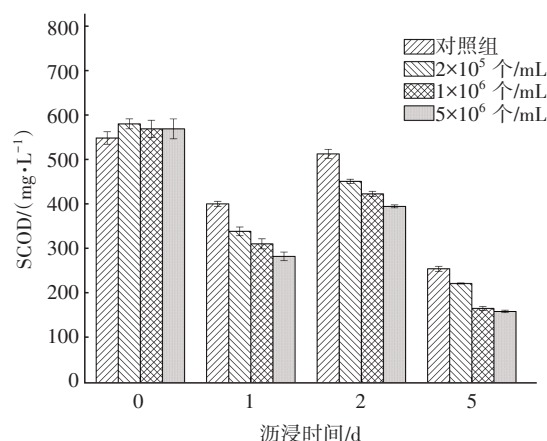


图6 不同BJ-1菌株初始浓度下SCOD的变化

Fig.6 Change of SCOD with different initial concentrations of BJ-1

添加的BJ-1菌株初始浓度为 $2 \times 10^5$ 、 $1 \times 10^6$ 和 $5 \times 10^6$ 个/mL的SCOD分别下降了240.80、259.46和276.27 mg/L。沥浸第2天,SCOD值均有明显回升,平均回升112 mg/L左右。这与此时体系的pH有一定关系,由于沥浸前期污泥酸化程度较弱,微生物的生长代谢等一系列生命活动可以消耗一定量的SCOD,随着酸化的进行,污泥中不耐酸的异养菌发生破裂、死亡,使得胞内物质流出,进入污泥液相。沥浸第5天,沥浸过程逐渐稳定,体系内仅剩嗜酸性的生物沥浸功能菌和耐酸性的异养菌存活,不会发生大量细胞裂解,沥浸污泥液相中SCOD开始逐渐降低是因为耐酸性异养菌的生长代谢导致的。

### 3 结论

① 从连续进泥式生物沥浸反应器中分离出一株耐酸性酵母菌,通过对其生理生化特性以及

26S rDNA 的分析,判定 BJ-1 菌株属于红酵母菌属,其最适生长温度为 28~30 °C,并且在 pH 为 3.0~7.0 时能较好地生长。

② 对照组及添加酵母菌 BJ-1 的实验组中,毛细吸水时间和沉降率所反映出来的脱水效果最佳的沥浸时间是 2 d。

③ 添加 BJ-1 菌株的初始浓度为  $1 \times 10^6$  个/mL 时,能够较好地加速生物沥浸进程,并使沥浸污泥的脱水性能提升 5~6 倍,经过此处理后污泥的沉降率提高 3.1 倍,毛细吸水时间缩短 51%,污泥比阻降至  $1.0 \times 10^{12}$  m/kg 以下,此时污泥为易脱水污泥。

#### 参考文献:

- [1] 周婷,袁世斌,邹晓莉,等. 一株蹠节霉菌的培养特性及其在污泥生物淋滤中的应用[J]. 应用与环境生物学报,2012,18(1):128-133.  
ZHOU Ting, YUAN Shibin, ZOU Xiaoli, et al. Cultural characteristics of a strain of *Talaromyces* sp. and its application in bioleaching of sewage sludge [J]. Chinese Journal of Applied & Environmental Biology, 2012, 18 (1) :128-133(in Chinese).
- [2] 王世梅. 耐酸性酵母菌 R30 加速污泥生物沥浸进程机理研究[D]. 南京:南京农业大学,2007.  
WANG Shimei. Mechanism of Accelerating Bioleaching Process of Sludge with *Rhodotorula* sp. R30 [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2007 (in Chinese).
- [3] 谭险夷,袁兴中,曾光明,等. 丝状菌对生物淋滤去除底泥中重金属的促进作用[J]. 环境工程学报,2010,4(12):2853-2859.  
TAN Xianyi, YUAN Xingzhong, ZENG Guangming, et al. Promotion effect of filamentous bacteria on removal of heavy metals during bioleaching from contaminated sediment [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2010, 4 (12) :2853-2859 (in Chinese).
- [4] 宋永伟,王电站,刘奋武,等. 低温条件下污泥静置沉降时间对城市生物沥浸污泥脱水性能的影响[J]. 环境科学学报,2012,32(4):815-820.  
SONG Yongwei, WANG Dianzhan, LIU Fenwu, et al. Effect of sedimentation time on dewaterability of bioleached municipal sewage sludge at low temperatures [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2012, 32 (4) :815-820(in Chinese).
- [5] 宋永伟,刘奋武,周立祥. 微生物营养剂浓度对生物沥浸法促进城市污泥脱水性能的影响[J]. 环境科学,2012,33(8):2786-2792.  
SONG Yongwei, LIU Fenwu, ZHOU Lixiang. Effect of microbial nutrient concentration on improvement of municipal sewage sludge dewaterability through bioleaching [J]. Environmental Science, 2012, 33 (8) :2786-2792(in Chinese).
- [6] 孟维举,李军,张静慧,等. 生物沥浸细菌的培养及其对污泥脱水性能的影响[J]. 中国给水排水,2015,31(7):34-38.  
MENG Weiju, LI Jun, ZHANG Jinghui, et al. Culture of bioleaching bacteria and its influence on dewaterability of sewage sludge [J]. China Water & Wastewater, 2015, 31 (7) :34-38(in Chinese).
- [7] 刘恒甫,石明岩,罗佳文,等. 能源物质和接种物的投量对生物沥浸改善城市污泥脱水性能的影响[J]. 安全与环境学报,2017,17(4):1397-1402.  
LIU Hengfu, SHI Mingyan, LUO Jiawen, et al. Influence of the energy substrates and inoculum dosage on the dehydration improvement of the urban sludge via bioleaching [J]. Journal of Safety and Environment, 2017, 17 (4) :1397-1402(in Chinese).
- [8] CITEAU M, LARUE O, VOROBIEV E. Influence of salt, pH and polyelectrolyte on the pressure electro-dewatering of sewage sludge[J]. Water Research, 2011, 45(6):2167-2180.

作者简介:覃海光(1994-),男,广西岑溪人,硕士研究生,主要研究方向为固体废弃物资源化及利用。

E-mail:qinhg@glut.edu.cn

收稿日期:2020-01-08

修回日期:2020-01-20

(编辑:任莹莹)