

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2021.10.007

# 酵母菌在废水除磷中的机理与应用研究进展

高明昌<sup>1</sup>, 孙绍芳<sup>1</sup>, 邱 琪<sup>2</sup>, 胡孟飞<sup>1</sup>, 韩俊丽<sup>1</sup>, 邱立平<sup>1</sup>

(1. 济南大学 土木建筑学院, 山东 济南 250022; 2. 济南大学 水利与环境学院, 山东 济南 250022)

**摘 要:** 酵母菌作为一类单细胞真菌,具有耐渗透压、耐酸、耐高温、代谢效率高、适应能力强、分布广泛等特点,在废水处理方面具有独特的优势和应用潜力。近年来酵母菌在废水处理特别是废水除磷方面的应用引起广泛关注。将酵母菌的发酵作用、氧化作用和吸附作用与废水处理相结合,不仅可以对废水进行生物处理,同时在一定条件下可以实现高效的资源回收。综述了酵母菌在处理高浓度有机废水、含重金属废水及常规生活污水方面的应用,重点对酵母菌除磷效能、除磷机理及除磷效能影响因素等方面的研究进展进行总结。

**关键词:** 酵母菌; 废水处理; 除磷机理; 影响因素

**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2021)10-0041-08

## Application and Mechanism of Yeast in Phosphorus Removal from Wastewater: An Overview

GAO Ming-chang<sup>1</sup>, SUN Shao-fang<sup>1</sup>, QIU Qi<sup>2</sup>, HU Meng-fei<sup>1</sup>, HAN Jun-li<sup>1</sup>,  
QIU Li-ping<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering and Architecture, University of Jinan, Jinan 250022, China; 2.  
School of Water Conservancy and Environment, University of Jinan, Jinan 250022, China)

**Abstract:** As a single-cell fungus, yeast could resist osmotic pressure, acid and high temperature, and has the characteristic of high metabolic efficiency, strong adaptability, wide distribution and so on, thus providing a possibility for treatment wastewater. In recent years, the application of yeast for wastewater treatment especially phosphorus removal has attracted widespread attention. Combining the fermentation, oxidation and adsorption of yeast with wastewater treatment can not only carry out wastewater biological treatment, but also realize effective resource recovery under certain conditions. In this paper, the application of yeast in the treatment of high concentration organic wastewater, containing heavy metals and conventional domestic sewage, was reviewed, as well as the research progress on phosphorus removal efficiency, phosphorus removal mechanism and influencing factors of yeast were summarized.

**Key words:** yeast; wastewater treatment; phosphorus removal mechanism; influencing factors

酵母菌作为一类单细胞真菌,具有耐渗透压、耐 酸、耐高温和代谢效率高等特点<sup>[1]</sup>,适应能力强,分

布广泛,对重金属有解毒作用,能够吸收、固定环境中的营养物并转化为生物可利用的形式而进入食物链,对物质循环起重要作用,是地球化学循环中重要的生物因子之一。此外,酵母菌也被应用于水处理,而且产生的剩余污泥中富含蛋白质和多种氨基酸等,具有较高饲料价值,利用酵母菌进行废水处理并回收相关资源逐渐成为一项研究热点。

日本研究所自首次实现酵母菌废水处理技术的应用以来,随着研究的深入,以酵母菌为核心的新型水处理技术正得到越来越广泛的关注。由于酵母菌具有比表面积大、代谢效率高等特点,其在废水除磷及资源回收方面具有良好的应用潜力。研究结果表明,酵母菌沉降性能好,磷资源回收率高,能够从废水中高效除磷并回收磷资源。立足于酵母菌,综述酵母菌在降解高浓度有机废水、去除重金属和磷方面的广泛应用,重点论述酵母菌除磷效能及除磷机理,并综述酵母菌除磷工艺的关键影响因子及其作用机理,为后续研究开发新型生物除磷及磷回收工艺提供参考。

## 1 酵母菌生理生化特性

酵母菌是一种单细胞真菌,属于高等微生物的真菌类,分布广泛,是一种典型的异养兼性厌氧微生物。形态通常有球形、卵圆形和椭圆形等,具有典型的真核细胞结构,其体型比细菌的单细胞个体要大

得多,一般为 $(1 \sim 5) \mu\text{m} \times (5 \sim 30) \mu\text{m}$ ,培养中还会形成假菌丝。大多数酵母菌的菌落特征与细菌相似,但比细菌菌落大而厚,菌落表面光滑、湿润、黏稠,容易挑起,菌落质地均匀,菌落多为乳白色,少数为红色,个别为黑色。酵母菌具有较大的比表面积,细胞壁表面的各种官能团以及菌体分泌的胞外聚合物(EPS)内含有大量官能团(如酰胺、氨基以及羟基等),吸附能力较强<sup>[2]</sup>。大多数酵母菌以形成子囊或子囊孢子的方式进行有性繁殖。酵母菌的适应能力强,环境胁迫下细胞器会产生变化以适应不良环境<sup>[3]</sup>,酵母菌可以在半厌氧条件下进行糖类发酵,具有不同的碳源、氮源同化作用,能在无外源维生素条件下生长,能在含有放线菌酮的状况下生长,能分解脂肪、尿素等,特定条件下可以产生类淀粉多糖、酯类和酸等物质。根据酵母菌在不同底物上的生化、形态和生理特征,可以对酵母菌进行分类<sup>[4]</sup>。

## 2 酵母菌在废水处理中的应用

### 2.1 酵母菌对废水的处理

自 19 世纪 70 年代日本研究者首次设计出酵母菌废水处理系统以来,至今酵母菌在处理各种废水中的独特功效引起了广泛关注。目前酵母菌废水处理技术已广泛应用于高浓度有机废水、重金属离子废水等废水的处理。近年来,酵母菌在处理各种废水中的研究<sup>[4-14]</sup>见表 1。

表 1 酵母菌对不同废水处理效果

Tab. 1 Treatment effect of yeast on different wastewater

酵母菌种类	废水类型	水质特征	处理效率
<i>R. toruloides</i> NCYC 921	高浓度有机废水	COD 为 32.01 g/L	81.7%
粘红酵母		进水 COD 为 63.93 g/L	83.15%
<i>Saccharomyces cerevisiae</i>	重金属离子废水	$\text{Sr}^{2+}$ 为 200 mg/L	78.22%
<i>Saccharomyces cerevisiae</i>			22.44 mgCd/gDW
<i>Pichia jadinii</i> M9		Cr(VI) 为 1.3 mmol/L	36.2%
<i>Pichia anomala</i> M10		Cr(VI) 为 1.7 mmol/L	52.9%
<i>Kazachstania yasuniensis</i>		含 Cr(VI) 废水	476.19 mgCr(VI)/gDW
<i>Kodamaea transpacific</i>			416.67 mgCr(VI)/gDW
啤酒酵母		铅离子为 1 000 mg/L	86.13%
<i>Galactomyces candidum</i>		镉离子为 1 000 mg/L	80.45%
<i>Saccharomyces cerevisiae</i>		$\text{Pb}^{2+}$ 为 400 mg/L	325.68 mg/gDW(最大)
<i>Saccharomyces cerevisiae</i>		$\text{Pd}^{2+}$ 为 0.95 mol/m <sup>3</sup>	89.47%
粘红酵母		$\text{Au}^{3+}$ 为 1.25 mol/m <sup>3</sup>	98%
<i>Hansenula anomala</i> J224 PAWA	含磷废水	TP 为 157.50 mg/L	90.16%
<i>Hansenula fabianii</i> J640 PFW4		DTP 为 125 mg/L	95%
		DTP 为 125 mg/L	95%
<i>Barnettozyma californica</i> <i>Cyberlindnera subsufficiens</i>		正磷为 $(45.5 \pm 0.6)$ mg/L	90%

高浓度有机废水因工艺不同,废水性质差别较大,未经处理直接排放将会造成严重的环境污染,酵母菌在特定条件下可以通过好氧发酵或厌氧发酵的方式大幅降低某些特定高浓度有机废水中有机物含量,减轻后续工艺有机负荷,同时还可以获得各类生物资源等。刘猛<sup>[4]</sup>利用纤维素乙醇废水培养粘红酵母生产微生物油脂,废水发酵培养基中粘红酵母可积累大量油酸以抵抗不良环境,对纤维素乙醇废水起到了良好的处理效果,对 COD、TOC、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、TN、TP 的去除率分别达到 83.15%、81.81%、85.49%、70.52%、90.16%,在有效去除 COD 的同时还对 TN、TP 有较好的去除效果。但是酵母菌处理高浓度有机废水时出水水质远达不到排放标准,必须添加后续处理工艺保障出水水质。此外,酵母菌在极端环境中具有多种功能并能耐受高含量的重金属,因此酵母菌在去除重金属方面具有更多优势。研究表明,酵母菌能够产生生物膜并使金属与细胞壁结合,因此酵母菌对重金属离子的去除主要是通过吸附作用完成<sup>[1]</sup>,其细胞壁上的表面官能团和胞外聚合物(EPS)是其吸附能力的主要来源。江慧<sup>[5]</sup>采用包埋法固定酵母菌小球吸附重金属,研究表明酵母菌稳定固定并且在最佳吸附条件下对铅、铬的吸附效果最佳,吸附率分别达到 86.13% 和 80.45%。因生物吸附技术具有成本低、效率高、危害小等优势,近年来随着酵母菌废水处理技术研究的深入,有研究者发现酵母菌通过吸附作用也能够去除废水中的磷元素,但是目前关于酵母菌除磷的效能及机理的研究相对较少,需要进一步的深入研究。

## 2.2 酵母菌处理含磷废水

酵母菌在废水处理过程中除了可以对有机物、蛋白等资源回收利用,对重金属离子进行吸附去除外,还可以对废水中磷进行吸附去除。酵母菌对磷的转化是污水处理过程中重要的生物代谢之一,尽管活性污泥中酵母菌数量少于细菌,但其作用不可小觑。刘猛<sup>[4]</sup>研究了粘红酵母对纤维素废水的处理,结果表明纤维素废水经过厌氧/好氧(A/O)生物处理工艺处理后 TP 含量由 157.50 mg/L 降至 15.50 mg/L,去除率达到了 90.16%,对磷有较好的去除效果。Ji 等<sup>[15]</sup>通过投加亚硝酸盐提高了污泥发酵液系统的反硝化除磷效能,发现富含酵母菌的污泥发酵液比乙酸等碳源更有利于实现短程硝化反

硝化和反硝化除磷,推测污泥发酵液经酵母菌的发酵或氧化处理后会大分子有机物分解为小分子,为后续处理提供优质碳源。从废水中高效除磷并回收磷资源,成为目前环境和资源领域的热点研究问题。酵母菌处理废水过程不仅可以回收有机物资源,还能对磷资源进行回收,但是其除磷机理尚不明确。此外,关于不同酵母菌除磷效能,以及除磷效能影响因素等方面的研究相对较少。

## 3 酵母菌除磷机理研究现状

### 3.1 EPS 对磷的吸附和微沉淀

酵母菌细胞被 EPS 基质包裹,而 EPS 是一种具有优良吸附能力的可渗透水凝胶层,在微生物聚集、营养物质保存和细胞保护中起多种作用。此外,作为细胞与环境的中介,EPS 对微生物代谢和污染物去除(如除磷)等具有重要作用。

目前,磷酸盐与胞外金属阳离子的络合已得到充分验证,而酵母菌 EPS 含有大量带负电的官能团,如羧基、巯基、酚基、磷酸基和羟基等,这些官能团易与金属阳离子等结合,即 EPS 可以同时吸附胞外金属阳离子和磷酸盐。Lopez-Fernandez 等<sup>[16-17]</sup>通过时间分辨激光荧光光谱(TRLFS)分析表明,酵母菌 *R. mucilaginosa* B II - R8 主要以  $(\text{R} - \text{O} - \text{PO}_3\text{H}) - \text{Ca}^{2+}$  形式完成对锕系放射性元素锕和铀的吸附,同时吸附重金属离子和有机磷酸酯基团。Wang 等<sup>[18]</sup>揭示 EPS 中  $\text{K}^+$ 、 $\text{Mg}^{2+}$  和  $\text{Ca}^{2+}$  与聚磷(poly-P)的化学计量比与阳离子/TP 吸收比一致,即 poly-P 通过与金属形成络合物而保留在 EPS 中,尤其是  $\text{Ca}^{2+}$  离子可以直接与游离的正磷酸结合而沉淀,但是这种现象取决于溶液 pH 值和离子强度,因此可以通过调整反应参数达到良好的除磷效果。另外,在碱性条件下,当  $\text{PO}_4^{3-}$  含量较高时, $\text{Ca}^{2+}$  可以优先与  $\text{PO}_4^{3-}$  沉淀形成无定型磷酸钙(ACP),最终形成更稳定的羟基磷灰石(HAP),在局部形成微沉淀,而其他金属与 poly-P 结合形成金属-磷酸盐络合物。但是也有研究表明磷并不是直接与 EPS 中官能团结合,而是仅仅储存在 EPS 中。Mañas 等<sup>[19]</sup>在好氧活性污泥中观察到明显的白色结晶沉淀,该无机沉淀主要为 HAP 沉淀,但是元素谱图显示中央无机区碳含量较周围低,表明这种胞外的化学沉淀物仅仅被封装在 EPS 基质中,而不是直接与 EPS 官能团结合。不论磷酸盐是与 EPS 中官能团结合吸附或是在 EPS 中形成化学沉淀物或是其他



形式的保留,都完成了EPS对外界环境中磷的部分去除,最后可通过EPS分离技术实现对磷酸盐的富集与回收<sup>[20]</sup>。但是由于酵母菌种群差距,EPS含量等不同,对磷的去除有很大差距。

### 3.2 酵母菌的PHO机制响应

真菌已经进化出严格调节的磷酸盐反应性信号转导(PHO)途径以维持细胞内磷酸盐稳态<sup>[21]</sup>。当周围环境磷浓度变小时,酵母菌会产生大量酸性磷酸酯酶和磷酸转运蛋白,进而强化对磷的吸收;当周围环境磷浓度变大时又会抑制酶活性或分解酶,减少对磷的吸收,这种磷酸盐响应信号转导表达机制为保持细胞内磷酸盐浓度的稳定提供了依据。Gomes-Vieira等<sup>[22]</sup>揭示了酿酒酵母菌的PHO调节磷酸盐吸收的机制,并研究了PHO在真菌谱系中的进化。新型隐球菌、光滑念珠菌、白色念珠菌和芽殖酵母等不同类型的酵母菌胞内均存在此类响应机制。

在PHO机制作用下,细胞外的磷酸盐化合物被酸性磷酸酶水解成无机磷酸盐,磷酸盐转运蛋白将无机磷酸盐转运至胞内,以poly-P的形式储存于液泡。PHO基因的表达是为了改善Pi饥饿,这些基因包括转录因子(Pho4)、酸性/碱性磷酸酯酶(Pho2/Pho8)、高亲和力Pi转运蛋白(Pho84和Pho89)、细胞周期蛋白依赖性激酶(CDKs)-细胞周期蛋白复合体(Pho85-Pho80)以及CDK抑制剂(Pho81)等<sup>[22]</sup>,这些基因在真菌中是保守的。其中酿酒酵母的PHO系统主要有三个基因的调控:①识别特定核苷酸序列并激活该序列基因转录的Pho4;②在磷酸盐足以使Pho4磷酸化时于Pho4控制下的基因转录失活的Pho85-Pho80;③在磷酸盐限制条件下使Pho85-Pho80复合体失活的Pho81。研究表明,通过对PHO机制基因进行改造,其PHO途径应激模式发生变化,使典型酵母菌于高磷浓度下亦大量分泌产生酸性磷酸酯酶和磷酸转运蛋白,此时酵母菌除磷过程不受外界环境磷浓度影响,过量吸收磷进入体内以达到除磷目的。另外,酵母菌细胞磷胁迫下吸收磷不仅需克服环境和细胞质溶液之间较大的磷浓度梯度,还需要克服酵母菌细胞的负膜电位,这表明酵母菌磷转运的过程需要能量的存在,因此,酵母菌吸收磷时必须通过 $H^+/Pi$ 共转运体参与并提供能量和 $H^+$ 以穿过生物膜系统,譬如 $H^+-ATPase$ 等P型质子泵、质子转运体(PHS)家族中由Pho84基因编码的高亲和力磷酸通透酶等。酵

母菌种群繁多,其胞内关于磷的吸收控制不仅只有PHO机制的调控,可能还存在其他机制的协同作用等,这将是未来的一项研究热点。

### 3.3 群体感应

群体感应(QS)是一种细胞间通信系统,通过信号分子的产生和响应作为种群密度的函数来工作。酵母菌除磷过程受酵母菌群体影响,高细胞密度通过产生大于阈值水平的信号分子,同源受体结合信号并触发信号转导级联反应以激活QS系统<sup>[23]</sup>,并且QS系统监测产生信号分子,进而调节基因表达<sup>[24]</sup>。细胞利用QS系统来协调群体行为,例如生物膜形成,群体运动,细胞外物质的产生分泌,在废水的生物处理和生物发电中起重要作用<sup>[25]</sup>。而群体淬灭(QQ)是群体感应的一种对抗性方法,可以干扰和破坏基于信号分子的群体感应,从而抑制介导细胞行为的基因表达的过程<sup>[23]</sup>,是减少MBR表面生物膜形成以及其他群体行为的有效方法<sup>[24]</sup>。显然,信号在QS和QQ过程中起着关键作用,例如酿酒酵母通过分泌芳香醇作为群体感应信号分子(QSM)来控制响应氮饥饿时的形态遗传变化,芳香醇的产生受到细胞密度的严格调节,并受到铵离子的抑制,这表明芳香醇作为QSM使营养条件和QS相互联系。

研究表明,在真核生物中,特别是真菌中存在上述QS机制,主要调节孢子形成、形态分化、次级代谢产物产生和酶的分泌等过程<sup>[26]</sup>。在酿酒酵母中,QS调节由氨基酸衍生的芳香醇介导,菌株通过产生色醇和苯乙酸以控制假菌丝和生物膜的形成等<sup>[27]</sup>。另外,QS可提高真菌类生物对环境的适应性。在温度、pH值、营养类型、种群密度、 $CO_2$ 浓度、哺乳动物血清等某种触发因素下,多态性白色念珠菌可以产生可控制的、可逆的细胞形态的相互转换,酵母、菌丝和假菌丝形式之间的多态性转换对环境的适应至关重要,当密度 $<10^6$ 个细胞/mL时白色念珠菌细胞变为丝状,密度更高时变为酵母菌状,其QSM主要为法呢醇<sup>[28]</sup>。目前基于细胞密度并受QS调控的真菌的研究有很多,但是这些过程中涉及的分子和途径目前尚不清楚。

QS对于废水的生物处理是一把双刃剑,而QQ的发展是解决QS不利影响的良好策略。部分酵母菌也可作为群体淬灭菌使细菌群体中的信号分子酰基高丝氨酸内酯(AHL)失活<sup>[29]</sup>。MBR中QS和膜

生物污染之间关系的建立促进了不同 QQ 方法的发展,QQ 中断了细菌之间的通信,减小了膜表面细菌形成滤饼层的厚度<sup>[30-31]</sup>。由于群体感应与群体淬灭在微生物中是普遍存在的,基于此,推测除磷过程中酵母菌种群之间可能存在群体感应和群体淬灭的某种关系,增强或削弱酵母菌的除磷效能,因此,探究酵母菌除磷过程中的 QS 和 QQ 调节的影响进而优化酵母菌除磷工艺将是未来研究的方向之一。

综上所述,酵母菌的除磷过程是一个复杂的微生物代谢过程,酵母菌不仅可以通过分泌 EPS 对磷进行吸附并在 EPS 内形成微沉淀,而且酵母菌胞内的 PHO 途径可以在基质磷浓度变少时产生大量酸性磷酸酯酶和磷酸转运蛋白进而强化对磷的吸收,以维持细胞内磷酸盐稳态。此外,酵母菌的除磷过程可能还受到 QS 的调节,群体感应提高了群体对环境的适应性。

酵母菌除磷机理研究进展见图 1。

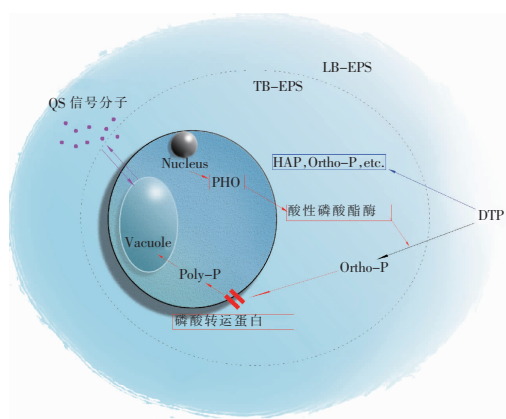


图1 酵母菌除磷机理研究进展示意

Fig.1 Schematic diagram of research progress on yeast phosphorus removal mechanism

#### 4 影响酵母菌除磷工艺的关键因素

在生物除磷过程中,影响除磷效果的因素有很多,而且非常复杂,主要通过影响微生物的活性和代谢实现。一个完整的生物除磷系统影响因素可以归结为4个方面:一是环境因素,包括 pH 值、温度等;二是系统中微生物营养,包括磷源、碳源、氮源和溶解氧(DO)等;三是污水水质,主要是碳源可利用性、易降解性等;四是工艺运行参数与方式,包括水力停留时间(HRT)、污泥龄等。

##### 4.1 温度

污水生物处理的实质就是利用生物体内的酶促

反应来实现对污染物的代谢反应,而温度会显著影响酶的活性,进而影响微生物对废水的生物处理效能。酵母菌适宜生长的温度在 20~30℃,由于温度对胞内新陈代谢等各个环节均产生不同程度的影响,目前温度变化对酵母菌除磷过程的影响尚不清晰。一方面,酵母菌在温度降低时会减弱对底物的吸收,同时伴随着吸磷量降低;另一方面,低温情况下酵母菌不会因过快结束内源呼吸而解体释放生物体内磷,也从一定程度上提高了生物体内的除磷能力,从而实现较低温度强化磷的去除。李阳等<sup>[32]</sup>研究的酵母菌微氧发酵产乙酸的最佳温度为 25℃,乙酸产量达 31.8 g/L, VFA 产量达 39.2 g/L,温度过高或过低都对酵母菌的生长不利。

##### 4.2 pH 值

pH 值的改变不仅会引起细胞膜表面电荷的变化,还影响细胞代谢过程中酶的活性<sup>[33]</sup>,但是酵母菌具有三层细胞壁因而具有较好的耐渗透压能力和抗自溶能力<sup>[34]</sup>。笔者所在课题组前期研究中对 A/O 交替生物膜系统中酵母菌种群在 pH 值为 5.5~8.0 范围内进行培养,发现三株酵母菌在不同 pH 值条件下的生长速率和除磷速率差别不大,表明酵母菌对 pH 值变化有一定的抵抗能力。Walls 等<sup>[14]</sup>研究了利用酵母菌和微藻类对市政污水的处理,发现 pH 值的波动会导致酵母菌的增殖速度变慢,但是对于污染物的去除效果却依然非常高,其中野生酵母 Crabtree 的阳性代谢给出了同时进行废水处理和生产生物乙醇的可能性,酵母菌对 pH 值有较强适应能力且抗冲击能力强。当然,pH 值过低或过高都会引起细胞结构或者功能的破坏,进而影响除磷效能,因此,在探究高效除磷酵母菌除磷效能及机理研究时应控制合适的 pH 值。

##### 4.3 碳源种类

酵母菌的种群多样性导致了利用碳源种类及利用程度的差异,不同碳源对酵母菌的生长和除磷等过程影响不同且相差很大。胡明珊<sup>[35]</sup>筛选到的皮状丝孢酵母 MS28 对木质纤维素有很好的耐受性。通常分子质量小且易降解的有机物如低级挥发性脂肪酸等易于被酵母菌利用,更有利于聚羟基烷酸酯(PHAs)等储能物质的合成进而强化生物除磷效果。Zaman 等<sup>[36]</sup>分别使用合成挥发性脂肪酸(SynVFA)和市政污水生物固体(Lystek)作为碳源,其除磷效率分别在 98%~99% 和 90%~97% 之间,分析其除

磷效率出现差异的原因,正是由于 Lystek 中存在较高阶的 VFA(C4 及以上)和其他可发酵有机物,因此 Lystek 的除磷动力学显著低于 SynVFA。正是由于不同酵母菌对于不同碳源有不同的利用程度和耐受性,因此应根据进水碳源种类筛选不同的酵母菌进行培养以提高处理效率。

#### 4.4 HRT

HRT 是获得具有高生长速率微生物群落的“桥梁”。在传统的活性污泥法中,HRT 作为废水与生物反应器内微生物作用时间的平均反应时间,可能由于系统的连续流动而稀释微生物数量,从而导致反应器内微生物被冲洗掉,所以 HRT 在很大程度上决定了废水的处理程度<sup>[37]</sup>,但是在膜生物反应器中,由于膜的分离作用,使得微生物被完全阻隔在反应池内,实现了 HRT 与污泥龄的完全分离。以生物滤池为例,HRT 的选取要使溶液中的生物膜与基质之间的接触时间恰当,充分吸收并利用基质,没有足够的接触时间,微生物的活性以及废水的处理效率将受到影响。HRT 的变化会影响微生物群落的结构,Sharma 等<sup>[38]</sup>认为最适的 HRT 是与微生物世代时间一致,此外,HRT 还决定了剪应力的大小,而剪应力直接影响表面生物膜的形成<sup>[39]</sup>。因此在探究酵母菌除磷工艺时应根据酵母菌的特性合理设计 HRT。

#### 5 结语

酵母菌作为一类最常见的单细胞真菌,在地球循环中扮演着重要角色,凭借其独特的优势,在污水处理尤其是除磷方面具有巨大的应用潜力。目前,酵母菌应用于高浓度有机废水降解、废水重金属离子的吸附和污水中磷的去除等仍停留在实验室试验阶段,工业应用报道较少。对于磷的去除主要机理是 EPS 对磷的吸附和微沉淀、胞体内 PHO 机制对胞体吸磷的调控和群体感应等,但是由于酵母菌的种群多样性,高效除磷酵母菌株稀少,对其除磷过程的微观过程尚不能完全阐述。今后对于酵母菌除磷的研究重点仍放在分析其除磷机理上,并逐渐形成以酵母菌为核心的新型除磷工艺体系,克服目前生物强化除磷的局限性。通过深入考察不同底物胁迫和环境条件下的磷代谢速率,以及聚磷条件和酶促反应特征等生理生态学特征规律,找到不同水质特征下的酵母菌最佳除磷条件,从而达到较高的磷去除率和回收率,为全面提高废水中磷去除效率和磷的

能源化与资源化水平提供新思路。

#### 参考文献:

- [1] DO NASCIMENTO J M, DE OLIVEIRA J D, RIZZO A C L, et al. Biosorption Cu(II) by the yeast *Saccharomyces cerevisiae* [J]. *Biotechnology Reports*, 2019, 21: e00315.
- [2] RAPOPORT A, GOLOVINA E A, GERVAIS P, et al. Anhydrobiosis: inside yeast cells [J]. *Biotechnology Advances*, 2019, 37(1): 51–67.
- [3] CAMARGO J Z, NASCIMENTO V M, STEFANELLO I, et al. Biochemical evaluation, molecular characterization and identification of novel yeast strains isolated from Brazilian savannah fruits, chicken litter and a sugar and alcohol mill with biotechnological potential for biofuel and food industries [J]. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 2018, 16: 390–399.
- [4] 刘猛. 利用纤维素乙醇废水培养粘红酵母生产微生物油脂[D]. 北京:北京化工大学, 2017.  
LIU Meng. Utilization of *Rhodotorula glutinis* Cultivation in Cellulosic Ethanol Wastewater for Production of Microbial Lipid [D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2017 (in Chinese).
- [5] 江慧. 海藻酸钠-明胶-PVA 包埋法固定化酵母菌吸附重金属研究[D]. 成都:西南交通大学, 2016.  
JIANG Hui. Adsorption of Yeast Immobilized by Alginate Sodium-Gelatin-PVA Embedding Method on Heavy Metal [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2016 (in Chinese).
- [6] DIAS C, REIS A, SANTOS J A L, et al. Concomitant wastewater treatment with lipid and carotenoid production by the oleaginous yeast *Rhodospiridium toruloides* grown on brewery effluent enriched with sugarcane molasses and urea [J]. *Process Biochemistry*, 2020, 94: 1–14.
- [7] QIU L, FENG J D, DAI Y D, et al. Mechanisms of strontium's adsorption by *Saccharomyces cerevisiae*: contribution of surface and intracellular uptakes [J]. *Chemosphere*, 2019, 215: 15–24.
- [8] HUANG H J, JIA Q Y, JING W X, et al. Screening strains for microbial biosorption technology of cadmium [J]. *Chemosphere*, 2020, 251: 126428.
- [9] MARTORELL M M, FERNÁNDEZ P M, FARIÑA J I, et al. Cr(VI) reduction by cell-free extracts of *Pichia jadinii* and *Pichia anomala* isolated from textile-dye factory effluents [J]. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 2012, 71: 80–85.



- [10] CAMPANA-PEREZ J F, BARAHONA P P, MARTIN-RAMOS P, *et al.* Ecuadorian yeast species as microbial particles for Cr(VI) biosorption[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2019, 26(27): 28162 – 28172.
- [11] MENG L, LI Z Y, LIU L Z, *et al.* Lead removal from water by a newly isolated *Geotrichum candidum* LG – 8 from Tibet kefir milk and its mechanism [J]. Chemosphere, 2020, 259: 127507.
- [12] SAITOH N, FUJIMORI R, YOSHIMURA T, *et al.* Microbial recovery of palladium by baker's yeast through bioreductive deposition and biosorption [J]. Hydrometallurgy, 2020, 196: 105413.
- [13] NORIZOH S, RYOTARO F, MASAKI N, *et al.* Microbial recovery of gold from neutral and acidic solutions by the baker's yeast *Saccharomyces cerevisiae* [J]. Hydrometallurgy, 2018, 181: 29 – 34.
- [14] WALLS L E, VELASQUEZ-ORTA S B, ROMERO-FRASCA E, *et al.* Non-sterile heterotrophic cultivation of native wastewater yeast and microalgae for integrated municipal wastewater treatment and bioethanol production[J]. Biochemical Engineering Journal, 2019, 151: 107319.
- [15] JI Z Y, CHEN Y G. Using sludge fermentation liquid to improve wastewater short-cut nitrification – denitrification and denitrifying phosphorus removal via nitrite [J]. Environment Science & Technology, 2010, 44(23): 8957 – 8963.
- [16] LOPEZ-FERNANDEZ M, MOLL H, MERROUN M L. Reversible pH-dependent curium(III) biosorption by the bentonite yeast isolate *Rhodotorula mucilaginosa* BII-R8 [J]. Journal of Hazardous Materials, 2019, 370: 156 – 163.
- [17] LOPEZ-FERNANDEZ M, ROMERO-GONZÁLEZ M, GÜNTHER A, *et al.* Effect of U(VI) aqueous speciation on the binding of uranium by the cell surface of *Rhodotorula mucilaginosa*, a natural yeast isolate from bentonites [J]. Chemosphere, 2018, 199: 351 – 360.
- [18] WANG D B, YANG G J, LI X M, *et al.* Inducing mechanism of biological phosphorus removal driven by the aerobic/extended-idle regime [J]. Biotechnology & Bioengineering, 2012, 109(11): 2798 – 2807.
- [19] MAÑAS, A, BISCANS B, SPÉRANDIO M. Biologically induced phosphorus precipitation in aerobic granular sludge process [J]. Water Research, 2011, 45(12): 3776 – 3786.
- [20] TAO G J, LONG X Y, TANG R, *et al.* Comparison and optimization of extraction protocol for intracellular phosphorus and its polyphosphate in enhanced biological phosphorus removal (EBPR) sludge [J]. Science of the Total Environment, 2020, 699: 134389.
- [21] LEV S, DJORDJEVIC J T. Why is a functional PHO pathway required by fungal pathogens to disseminate within a phosphate-rich host: a paradox explained by alkaline pH-simulated nutrient deprivation and expanded PHO pathway function [J]. PLoS Pathogens, 2018, 14(6): e1007021.
- [22] GOMES-VIEIRA A L, WIDEMAN J G, PAES-VIEIRA L, *et al.* Evolutionary conservation of a core fungal phosphate homeostasis pathway coupled to development in *Blastocladiella emersonii* [J]. Fungal Genetics and Biology, 2018, 115: 20 – 32.
- [23] HUANG J H, SHI Y H, ZENG G M, *et al.* Acyl-homoserine lactone-based quorum sensing and quorum quenching hold promise to determine the performance of biological wastewater treatments: an overview [J]. Chemosphere, 2016, 157: 137 – 151.
- [24] HAM S Y, KIM H S, CHA E, *et al.* Mitigation of membrane biofouling by a quorum quenching bacterium for membrane bioreactors [J]. Bioresource Technology, 2018, 258: 220 – 226.
- [25] MADDELA N R, SHENG B B, YUAN S S, *et al.* Roles of quorum sensing in biological wastewater treatment: a critical review [J]. Chemosphere, 2019, 221: 616 – 629.
- [26] BARRIUSO J, HOGAN D A, KESHAVERZ T, *et al.* Role of quorum sensing and chemical communication in fungal biotechnology and pathogenesis [J]. FEMS Microbiol Reviews, 2018, 42(5): 627 – 638.
- [27] CORDEIRO R, TEIXEIRA C E C, BRILHANTE R S N, *et al.* Exogenous tyrosol inhibits planktonic cells and biofilms of *Candida* species and enhances their susceptibility to antifungals [J]. FEMS Yeast Research, 2015, 15(4): fov012.
- [28] ALBUQUERQUE P, CASADEVALL A. Quorum sensing in fungi – a review [J]. Medical Mycology, 2012, 50(4): 337 – 345.
- [29] LEGUINA A C D V, NIETO C, PAJOT H F, *et al.* Inactivation of bacterial quorum sensing signals *N*-acyl homoserine lactones is widespread in yeasts [J]. Fungal Biology, 2018, 122(1): 52 – 62.
- [30] WAHEED H, XIAO Y Y, HASHMI I, *et al.* Insights into quorum quenching mechanisms to control membrane

- biofouling under changing organic loading rates [J]. *Chemosphere*, 2017, 182: 40–47.
- [31] YU H R, QU F S, ZHANG X L, *et al.* Effect of quorum quenching on biofouling and ammonia removal in membrane bioreactor under stressful conditions [J]. *Chemosphere*, 2018, 199: 114–121.
- [32] 李阳, 周涛, 陈善平, 等. 温度对接种酵母菌和醋酸菌餐厨垃圾微氧发酵产乙酸的影响 [J]. *中国环境科学*, 2016, 36(1): 175–180.
- LI Yang, ZHOU Tao, CHEN Shanping, *et al.* Effects of temperature on the production of acetic acid from food wastes by yeast and acetic acid bacteria during micro-aerobic fermentation [J]. *China Environmental Science*, 2016, 36(1): 175–180 (in Chinese).
- [33] LI W, ZHANG H Y, SUN H Z, *et al.* Influence of pH on short-cut denitrifying phosphorus removal [J]. *Water Science and Engineering*, 2018, 11(1): 17–22.
- [34] WANG J J, LI M Q, HOU D, *et al.* Regulations of RLM1 gene affect the anti-autolytic ability of lager yeast [J]. *Chinese Journal of Biotechnology*, 2019, 35(6): 1059–1070.
- [35] 胡明珊. 木质纤维素碳源的皮状丝孢酵母菌种筛选与微生物油脂发酵研究 [D]. 上海: 华东理工大学, 2018.
- HU Mingshan. Screening Methodology of Microbial Lipid Accumulation Strain and Lipid Fermentation from lignocellulose Feedstock [D]. Shanghai: East China University of Science and Technology, 2018 (in Chinese).
- [36] ZAMAN M, KIM M, NAKHLA G, *et al.* Enhanced biological phosphorus removal using thermal alkaline hydrolyzed municipal wastewater biosolids [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2019, 86: 164–174.
- [37] TRAN V G, CHU C Y, UNPAPROM Y, *et al.* Effects of substrate concentration and hydraulic retention time on hydrogen production from common reed by enriched mixed culture in continuous anaerobic bioreactor [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2020, 46(27): 14036–14044.
- [38] SHARMA Y, LI B K. Optimizing energy harvest in wastewater treatment by combining anaerobic hydrogen producing biofermentor (HPB) and microbial fuel cell (MFC) [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2010, 35(8): 3789–3797.
- [39] LECUYER S, RUSCONI R, SHEN Y, *et al.* Shear stress increases the residence time of adhesion of *Pseudomonas aeruginosa* [J]. *Biophysical Journal*, 2011, 100(2): 341–350.
- 作者简介: 高明昌 (1996–), 男, 山东东营人, 硕士研究生, 主要研究方向为废水处理理论与技术。  
E-mail: 328342738@qq.com  
收稿日期: 2020–04–28  
修回日期: 2020–09–20

(编辑: 丁彩娟)

大力推进水利薄弱环节建设,  
提高防灾减灾能力