

酵母菌吸附处理废水中重金属离子的研究综述

马歌丽, 杜聪聪, 魏涛, 余轩, 毛多斌

(郑州轻工业学院 食品与生物工程学院, 河南 郑州 450001)

摘要:综述了酵母菌吸附处理重金属离子的吸附机理、影响因素、吸附剂的解吸、吸附动力学和吸附平衡模型,指出实现酵母菌吸附处理废水中重金属离子工业化应用的关键是降低运行成本和简化操作程序.因而今后研究的重点是酵母菌吸附机理和最佳吸附工艺条件的探索、酵母菌固定化工艺研究、复杂废水环境中酵母菌的重复利用和再生研究等.

关键词:生物吸附法;酵母菌;废水处理;重金属离子

中图分类号:TS207.5;TQ920.9 **文献标志码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.2095-476X.2014.01.007

Research review of biosorption treatment of the heavy metal ions in wastewater using yeasts

MA Ge-li, DU Cong-cong, WEI Tao, YU Xuan, MAO Duo-bin

(College of Food and Bioengineering, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: The biosorption mechanism, influential factors, adsorbent desorption, kinetics models and equilibrium isotherm models of biosorption treatment of heavy metal ions using yeasts were reviewed. It also concluded that the keys to realize the industrial application of yeast biosorption in wastewater were decreasing the costs, simplifying the procedures. The future research will focus on the biosorption mechanism and the optimum biosorption conditions, the immobilization technology of yeasts and the reuse or regeneration of yeasts.

Key words: biosorption; yeast; treatment of wastewater; heavy metal ion

0 引言

水体重金属污染已成为全球性的环境问题.引起水体污染的重金属主要指汞、铬、铅、镉以及砷类金属等生物毒性显著的元素.水体中的重金属经鱼贝类、农作物和饮用水等途径进入人体后,会对人体器官造成严重危害,长期积累将引起机体慢性中毒甚至死亡^[1-4].治理重金属污染废水日益受到人们的重视,传统的治理方法分化学法和物理法^[5-6].化学法包括沉淀法和电解法,适用于处理重金属离

子浓度较高的废水.其中,沉淀法需对水体 pH 进行严格调整,操作复杂,且沉淀物易造成二次污染;电解法则不能将水体中重金属离子浓度降至很低.物理法主要包括离子交换法和膜分离法,适用于处理重金属浓度较低的废水,但处理效果常常受到各种条件的限制,且成本较高.

生物吸附法是利用生物体或其衍生物吸附水体中的金属离子,这种新型的处理方法因具有对环境毒害小、材料来源广泛以及操作成本低等优点受到研究者的关注.1949年 Ruchhoft 首次用活性污泥

收稿日期:2013-11-05

基金项目:河南省科技攻关项目(132102120197)

作者简介:马歌丽(1963—),女,河南省漯河市人,郑州轻工业学院教授,主要研究方向为生物工程.

法从废水中回收了 ^{239}Pu ,并指出在清除污染的过程中增长的微生物含有巨大表面积的胶状基质,能吸收放射性物质,该研究拉开了生物吸附法处理废水中重金属离子的序幕^[7].生物吸附法常选用生物质(如壳聚糖、植物秸秆和纤维素)、藻类、微生物(酵母菌、霉菌和细菌)作为吸附剂.酵母菌对重金属离子和低pH环境耐受能力强,成为生物吸附剂的首选材料.实践表明,用取自啤酒等发酵工业的废弃酵母吸附处理废水中低浓度的重金属离子有很好的吸附效果,该法原料来源广泛,操作简单,而且能达到“以废治废”的目的^[8-10].

本文拟对酵母菌作为生物吸附剂吸附处理废水中金属离子的吸附机理、影响因素、生物吸附动力学及吸附平衡模型等方面进行综述.

1 酵母菌吸附重金属离子的机理

酵母活细胞吸附重金属离子的过程一般分为2个阶段.第1阶段是细胞表面吸附阶段,即胞外多聚物和细胞壁上的官能团(羧基、磷酸基、羟基、硫酸酯基和酰胺基等)与金属离子发生配位络合.该阶段快速、可逆且不依赖于能量代谢,又称被动吸附过程.第2阶段是细胞表面吸附的重金属离子在细胞表面相关酶(如水解酶、转移酶等)的作用下转移至细胞内并参与细胞代谢的过程.此阶段速度慢、不可逆且与细胞代谢有关,又称主动吸收过程.J. H. Suh等^[11]研究发现,当酵母浓度为1 g/L, Pb^{2+} 初始浓度为100 mg/L时,起始3~5 min内, Pb^{2+} 先吸附到细胞表面;24 h后 Pb^{2+} 以极其缓慢的速度透过细胞膜逐渐进入细胞内部.

近20年来,国内外学者对生物吸附过程进行了大量研究,提出了各种吸附机理.目前普遍被认可的生物吸附机理主要有离子交换、表面络合、无机微沉淀和静电吸附.

1.1 离子交换作用

酵母菌在吸附重金属离子的同时经常伴随其他阳离子(如 K^+ , Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} 等)的释放,因此可以把吸附作用看作一个离子交换过程^[12].D. Brady等^[13]研究发现酵母菌吸附 Cu^{2+} 的过程中,细胞内70%的 K^+ 快速释放,60%的 Mg^{2+} 缓慢释放,这充分证实了离子交换是酵母细胞吸附重金属的重要机理之一.陈灿等^[14-15]研究发现,酿酒酵母吸附 Zn^{2+} , Pb^{2+} 和 Ag^+ 的过程可以促进酵母细胞释放自身的 K^+ , Na^+ , Ca^{2+} 和 Mg^{2+} ,这同样说明离子交换

机制在酵母吸附重金属离子过程中发挥了重要作用.

1.2 表面络合作用

酵母菌吸附重金属离子的表面络合作用,是指细胞壁上的活性官能团与金属离子螯合或配位的过程.M. Fomina等^[16]利用扫描电子显微镜技术(SEM)和X光吸收能谱技术(XAS)证实酵母菌在与 Zn^{2+} , Cu^{2+} 和 Pb^{2+} 的相互作用中,酵母细胞表面的含氧官能团(如磷酸基、羧基等)发挥重要作用,并提出离子配位模型.陈灿等^[17]利用X射线吸收精细结构谱技术(EXAFS)对酿酒酵母吸附 Zn^{2+} 的局域结构进行研究,同样发现 Zn^{2+} 以四配位体和六配位体混合构型(以四配位体构型为主)与酿酒酵母细胞表面结合.

1.3 无机微沉淀

生物吸附过程中,重金属离子能以硫酸盐、碳酸盐或氢氧化物等形式通过晶核作用在细胞壁或细胞内沉淀下来,从而达到富集重金属离子的目的.B. Volesky等^[18]通过能谱仪研究了酵母吸附 Cd^{2+} 的过程,发现 Cd^{2+} 以磷酸盐形式沉积在酵母细胞内液泡中,而在酵母细胞壁上没有发现沉淀.D. W. Strandberg等^[19]对酿酒酵母吸附放射性元素U进行研究,发现U沉积在酵母细胞表面.

1.4 静电吸附作用

C. D. Aharoni等^[20]利用原子力显微镜(AFM)的力-距离曲线方法研究了中性条件下酿酒酵母吸附 Cu^{2+} 前后细胞表面静电性质的变化,结果表明,该变化促进了细胞与荷负电探针的吸附.尹华等^[21]研究不同浓度的电解质对解脂假丝酵母吸附铬的盐效应,结果表明,当阴离子相同时,低浓度的 Na^+ 和 Mg^{2+} 对吸附铬有促进作用,而 Al^{3+} 有抑制作用,阳离子的盐效应顺序是 $\text{Al}^{3+} > \text{Mg}^{2+} > \text{Na}^+$;当阳离子相同时,阴离子盐效应顺序为 $\text{Br}^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{NO}_3^- > \text{Cl}^-$.研究还发现,盐效应的发生与菌体表面带正电荷的官能团和电解质阴离子之间的静电作用有关.

2 影响酵母菌吸附重金属离子的因素

影响酵母菌吸附重金属离子的因素可归纳为以下几方面:重金属离子的种类、重金属离子的初始浓度与菌体浓度之比、水体的pH、吸附温度、吸附时间、水体中的共存离子以及酵母菌体的预处理方

法等。

2.1 重金属离子的种类

重金属离子的特性是影响生物吸附效果的本质因素。啤酒酵母可以吸附不同种类的重金属离子,包括有毒的、具有放射性的以及贵金属等^[22-25]。J. L. Wang 等^[26-27]用定量结构活性关系方法(QASR)探讨了工业废弃啤酒酵母对10种金属离子的吸附作用。结果表明,金属离子共价指数与吸附容量之间具有显著的线性关系:共价指数越高、金属离子与吸附剂表面官能团共价结合所占比重越大、键结合越牢固,则吸附容量越大,即吸附容量由大到小的排列顺序为 $Pb^{2+} > Ag^+ > Cr^{3+} > Cu^{2+} > Zn^{2+} > Cd^{2+} > Co^{2+} > Sr^{2+} > Ni^{2+} > Cs^+$ 。

2.2 重金属离子的初始浓度与菌体浓度之比

生物吸附法的最大优点是适用于处理含重金属离子浓度较低的废水。重金属离子的初始浓度与菌体添加量对吸附效果有显著影响。徐惠娟等^[28]发现 Cd^{2+} 初始浓度与酵母浓度之比为 50 mg/L : 1 g/L 时,吸附率最高为 93%。朱一民等^[29]的研究结果表明,固定 Hg^{2+} 初始浓度为 0.5 g/L 时,随着菌体浓度的增加, Hg^{2+} 的去除率逐渐增加;当菌体浓度增加至 32 g/L 时, Hg^{2+} 去除率增加幅度缓慢。固定菌体浓度为 40 g/L 时,随着 Hg^{2+} 初始浓度的增加, Hg^{2+} 去除率逐渐下降; Hg^{2+} 浓度在 0 ~ 3 g/L 范围内,酵母对其具有较好的吸附效果,初始浓度为 1.0 g/L 时, Hg^{2+} 去除率达 96%。

2.3 温度

在酵母吸附重金属离子的过程中,温度对吸附效率也会产生重要影响。朱一民等^[29]对不同温度下啤酒酵母吸附 Hg^{2+} 进行了研究,结果表明,35 °C 时酵母对溶液中 Hg^{2+} 的去除率最高,为 99%;温度高于或低于 35 °C 时的去除率均在 95% 左右。蔡佳亮等^[30]则认为生物吸附是一个放热过程,啤酒酵母对离子的吸附能力随温度下降而提高。

2.4 水体 pH

水体 pH 对细胞表面吸附位点的数目以及金属离子的化学存在状态都有很大影响,其直接影响氧化还原反应、无机微沉淀作用及配位络合作用。F. Eric 等^[31]研究发现,酵母吸附重金属离子的吸附量随 pH 升高而呈非线性增加。尹华等^[21]用酵母菌活性污泥法吸附处理含铬电镀废水,结果表明,酵母活菌体对铬具有良好的吸附性能,且对废水的 pH 适应范围较广。当 pH = 3.2 ~ 6.0 时,酵母对总铬浓

度为 30.2 mg/L 的水样中铬的去除率达 85.0%。D. Brady^[32]的研究表明,酿酒酵母吸附 Cu^{2+} 的最适 pH = 5 ~ 9,在任何极限 pH 条件,即 pH 为 1—4 或 10—14 的强酸强碱条件都会降低 Cu^{2+} 的去除率。

关于水体 pH 对酵母吸附效果的影响原因,主要的解释^[33-36]为:pH 较低时,大量的水合氢离子与重金属离子竞争细胞表面的活性吸附位点,导致吸附量降低;随着 pH 的升高,细胞表面的质子化官能团解离,暴露出更多带负电荷的位点,有利于与重金属离子的结合;当 pH 较高时,金属离子易形成不溶解的氧化物、氢氧化物等沉淀微粒并覆盖于细胞表面,不利于金属离子的吸附甚至会终止吸附。

2.5 吸附时间

一般认为,随着吸附时间的延长,吸附容量会增大,吸附效率也将提高;但是,酵母吸附重金属离子的过程通常在较短时间内即可完成,因此,应考虑酵母吸附平衡及解吸现象的发生。李明春^[37]研究了吸附时间对酵母吸附 Cu^{2+} 、 Ni^{2+} 、 Cd^{2+} 的影响,结果发现:酵母吸附 Cu^{2+} 和 Ni^{2+} 时,1 h 即达到吸附平衡,之后随着吸附时间的延长会发生脱吸附现象,且 Ni^{2+} 比 Cu^{2+} 更易发生脱吸附;酵母对 Cd^{2+} 的吸附量却在 1 h 后呈不断上升的趋势,30 min 的吸附量为 1 h 的 93.0%,14 h 的吸附量为 1 h 的 243%。

2.6 水体中的共存离子

工业废水中除了目标重金属离子还有大量的其他金属阳离子,如 Na^+ 、 K^+ 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 等。生物吸附时,这些阳离子可能与目标重金属离子竞争吸附位点,从而影响生物体对后者的吸附效果。目前关于水体中共存离子对生物吸附效果影响的研究还处于初级阶段,尚无很好的数学模型来描述。

代淑娟等^[38]探究了水相中共存离子对废啤酒酵母吸附 Cd^{2+} 的影响,结果表明 Cu^{2+} 、 Pb^{2+} 和 Zn^{2+} 对 Cd^{2+} 的吸附效果影响显著,而碱金属离子(Na^+ 、 K^+ 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+})和 NH_4^+ 及阴离子(SO_4^{2-} 、 F^- 、 Cl^- 和 NO_3^-)对酵母吸附 Cd^{2+} 的影响相对较小。S. K. Das 等^[39]对固定化酵母吸附放射性核素(^{233}U 、 ^{239}Pu 和 ^{241}Am)进行探究,发现酵母在吸附放射性核素的同时能吸附其他杂质阳离子(Al 、 Be 、 Cd 、 Cr 、 Fe 、 Mn 、 Pb 、 Ce 、 Dy 、 Eu 、 Gd 、 Sm),而且对这些阳离子的吸附不影响酵母对放射性核素的吸附容量。

2.7 酵母菌体的预处理

作为生物吸附材料的酵母菌,其存在状态主要

有活性酵母和致死酵母、游离态酵母和固定化酵母、改性酵母和化学修饰酵母。酵母菌体的存在状态不同,其吸附能力也不同。对酵母菌的预处理包括2方面:一方面是将酵母细胞表面去质子化,活化吸附位点;另一方面是改善酵母细胞表面基团的化学性能。

代淑娟等^[38]采用扫描电子显微镜、动电位与红外光谱等分析手段,研究水洗废啤酒酵母吸附电镀废水中的 Cd^{2+} 。结果表明,对酵母进行水洗预处理后,其吸附率由89.85%提高到96.18%。原因可能是水洗预处理去除了废啤酒酵母中掩盖吸附位点的可溶相,进而暴露出更多的吸附位点,提高了酵母与 Cd^{2+} 发生配合作用的几率。

对酵母菌细胞表面进行适当的化学修饰,能够提高其表面配位基团的活性,改善酵母菌对重金属离子的吸附能力。A. Malik^[40]分别用HCl, NaOH和 CaCl_2 对酵母修饰后再吸附 Cu^{2+} ,结果表明,修饰酵母的吸附量均明显高于未修饰酵母的吸附量,其中用0.20 mg/L NaOH修饰后酵母的吸附量最高,可达15.64 mg/g;而未修饰酵母的吸附量仅为4.14 mg/g。韩润平等^[41]分别采用碱水解、酯化和丙酮3种方法预处理酵母菌,结果表明,在碱性条件下,酵母表面的酰胺键及酯键可以水解出氨基、羟基和羧基等,从而提高酵母吸附效率;酯化处理使酵母细胞壁上的羧基被掩蔽,因酯基对 Cu^{2+} 的吸附能力远小于羧基,导致酵母吸附量降低;丙酮处理酵母菌能浓缩其细胞壁,使得单位质量吸附剂中细胞壁含量增高,进而提高吸附剂的吸附量。

游离态或悬浮态酵母机械强度低,吸附金属离子后难以分离再生。如果将酵母细胞固定化,可以增加吸附剂的多孔性、稳定性和亲水性,不仅能提高其吸附效率,而且也有利于酵母细胞与吸附物的分离,是一项经济实用的细胞预处理技术。常用的细胞固定化方法有交联法、吸附法、共价结合法、包埋法等。G. Yekta等^[42]发现用海藻酸钙固定的酵母细胞对 Cu^{2+} 的吸附能力显著提高。B. Volesky等^[43]发现海藻酸钠固定的酵母菌对 Cd^{2+} 的吸附能力显著提高,采用固定化细胞使后续操作更方便。武运等^[44]用固定化啤酒酵母菌体吸附 Pb^{2+} ,吸附率>80%,且吸附过程快,15 min就能达到最佳效果。

3 吸附剂的解吸

对吸附重金属离子的吸附剂解吸,不仅使生物

吸附剂得以再生,而且还可以达到回收金属离子的目的。常用的解吸剂主要有强酸、强碱、金属盐、螯合剂及络合剂等。

李耕倩等^[45]发现,HCl, HNO_3 , NaHCO_3 与NaOH溶液对固定化啤酒酵母吸附的重金属离子均有一定的解吸作用,其中 HNO_3 对 Pb^{2+} 和 Cu^{2+} 的解吸率较高,分别为84.51%和96.49%,HCl对 Zn^{2+} 和 Cd^{2+} 的解吸率较高,分别为91.95%和96.07%;通过电镜观察发现, HNO_3 作解吸剂时会破坏生物吸附剂的细胞结构,不利于生物吸附剂的再利用,而HCl对生物吸附剂的结构没有明显破坏,这可能是因为 HNO_3 比HCl具有更强的氧化性。A. I. Ferraz等^[46]分别用 H_2SO_4 , HNO_3 , HCl, CH_3COOH 和EDTA作解吸剂,研究了废酿酒酵母对 Cr^{3+} 的吸附和解吸作用,发现吸附30 min吸附效果较好,解吸30 min解吸效率较高,并指出解吸过程可能受到吸附位点亲和力大小的影响。

关于解吸机理,目前一般解释为:解吸剂与被吸附重金属离子互相竞争细胞表面的吸附位点,从而将重金属离子从吸附细胞上洗脱下来。大量实验研究发现^[47-49],在所用的解吸剂中,螯合剂EDTA的解吸效果最好,其次为强碱,而无机盐的解吸率较低。前面提到的低pH下出现吸附量随时间延长而下降的现象,其原因可能就是因为解吸过程的发生。

4 吸附动力学与吸附平衡模型

吸附动力学研究是设计生物吸附工艺过程的基础,对探讨吸附机理也很有帮助。用于描述生物吸附过程的动力学方程有准一级速率方程、准二级速率方程、Elovich方程、双常数速率方程等。D. Selcen^[50]研究发现,可以用准二级速率方程拟合失活质子化裂殖酵母对 Ni^{2+} 的吸附,其线性相关系数大于0.97。P. Vasudevan等^[51]的研究表明,质子化酵母吸附 Cd^{2+} 的过程分为4个阶段,每个阶段都符合准二级速率方程。随着对生物吸附过程研究的不断深入,一些学者又提出了更能体现吸附机理的速率方程。D. Park等^[52]提出一种形式简单的速率方程,拟合了酿酒酵母对 Cr^{6+} 的生物吸附过程,结果证实 Cr^{6+} 是通过氧化还原反应被酵母菌吸附去除的。S. N. Dodic等^[53]利用KEKAM模型描述活酵母对 Zn^{2+} 的吸附动力学,其线性相关系数平均为

0.96.

对酵母菌吸附重金属离子的过程进行分析归纳,建立吸附平衡模型,有助于吸附机理的探究,还可以解释、预测和评价其吸附性能.目前用于描述单组分生物吸附平衡的经典模型主要是 Langmuir 方程和 Freundlich 方程.姜友军等^[54]运用这 2 个方程同时对化学修饰酵母吸附 Cd^{2+} 的过程进行拟合,发现 Langmuir 方程能更好地描述酵母对 Cd^{2+} 的吸附过程,也说明酵母对 Cd^{2+} 的吸附多为单分子层吸附.但也有实验证实 Langmuir 模型的局限性.有些报道^[55-56]指出 Langmuir 方程对某些吸附系统不适用,如酵母吸附 Hg^{2+} 时仅在吸附初期满足 Langmuir 方程,用酸质子化的酵母对 Cu^{2+} 、 Zn^{2+} 的吸附不满足 Langmuir 方程等.

为了描述二元或者多元金属的竞争吸附,已经发展出多种扩展的 Langmuir 型和 Freundlich 型吸附模式,如基于 Langmuir 型的 BET 方程、Schatchard 曲线,以及利用多参数数学模型来描述多种金属离子间的竞争吸附模型和机理模型,其中表面络合模型和离子交换模型是目前提出的 2 类主要机理模型^[57-58].

5 结语

生物吸附技术具有对环境危害小、可利用废弃酵母、成本低、适应废水范围广等诸多优势,该项技术在环境工程中有非常广阔的应用前景.目前酵母吸附处理废水中重金属离子的技术仍处在实验室研究阶段,工业化应用的报道还比较少.实现该技术工业化应用的关键是降低运行成本和简化操作程序.根据这一现状,该技术今后研究的热点将是酵母吸附机理和最佳吸附工艺条件的探索、酵母固定化工艺研究、复杂废水环境中酵母的重复利用和再生研究等.

参考文献:

[1] 朱参胜,梁晓聪. 砷的毒理及其对人体健康的影响[J]. 环境与健康杂志,2009,26(6):561.

[2] Haydn B, Lue-Merii M P. Determination of arsenic in water samples by total reflectance X-ray fluorescence using pre-concentration with alumina[J]. Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy, 2010, 65(6):489.

[3] 赵澹,吴天宝,叶裕才. 我国饮用水源的重金属污染及治理技术深化问题[J]. 给水排水,1998,24(10):22.

[4] 李光辉. 重金属污染对畜禽健康的危害[J]. 中国兽医杂志,2006,42(4):54.

[5] 易秋实. 我国饮用水砷污染状况及应对措施[J]. 湖北第二师范学院学报,2010,27(8):23.

[6] Srivastava N K, Majumder C B. Novel biofiltration methods for the treatment of heavy metals from industrial wastewater[J]. Journal of Hazardous Materials, 2008, 151(1):1.

[7] Volesky B, Holan Z R. Biosorption of heavy metal by *Saccharomyces cerevisiae*[J]. Biotech Prog, 1995, 42(5):797.

[8] 凌秀梅,邱树毅,胡鹏刚. 啤酒废酵母的综合利用[J]. 酿酒科技,2006(2):87.

[9] Shotipruk A, Kittianong P, Supphantharika M, et al. Application of rotary microfiltration in debittering process of spent brewer's yeast[J]. Bioresource Technology, 2005, 96(17):1851.

[10] 周红卫,江林. 啤酒废酵母的回收利用[J]. 江苏调味品副食品,2000,67(6):12.

[11] Suh J H, Kim D S. Effect of Hg^{2+} and cell conditions on Pb^{2+} accumulation by *Saccharomyces cerevisiae*[J]. Bioprocess Biosystems and Engineering, 2000, 23(4):327.

[12] Liu P, Zeng G M. Research progress of biosorption in treatment of waste water containing heavy metals[J]. Industry Water and Waste Water, 2004, 10(5):1.

[13] Brady D, Duncan J R. Cation loss during accumulation of heavy metal cation by *Saccharomyces cerevisiae*[J]. Biotechnology Letters, 1994, 16(5):543.

[14] 陈灿,王建龙. 酿酒酵母吸附 $\text{Zn}(\text{II})$ 过程中阳离子(K^+ , Mg^{2+} , Na^+ , Ca^{2+})的变化分析[J]. 环境科学, 2006, 27(11):2261.

[15] Chen C, Wang J L. Removal of Pb^{2+} , Ag^+ , Cs^+ and Sr^{2+} from aqueous solution by brewery's waste biomass[J]. Journal of Hazardous Materials, 2008, 151(1):65.

[16] Fomina M, Charnock J, Bowen A D, et al. X-ray absorption spectroscopy (XAS) of toxic metal mineral transformations by fungi[J]. Environmental Microbiology, 2007, 9(2):308.

[17] 陈灿,谢亚宁,杜永华,等. 利用 EXAFS 研究酿酒酵母与 $\text{Zn}(\text{II})$ 的相互作用机理[J]. 环境科学, 2008, 29(6):1666.

[18] Volesky B, May H, Holan Z R. Cadmium biosorption by *Saccharomyces cerevisiae*[J]. Biotech and Bioeng, 1993, 41(8):826.

[19] Strandberg D W, Shumate S E, Parrot J R Jr. Accumulation of uranium by *Saccharomyces cerevisiae* and *Pseudomonas aeruginosa*[J]. Appl Environment Microbiol, 1981, 41(2):237.

- [20] Aharoni C D, Sparks L, Levimon S. Kinetics of soil chemical reactions: Relationships between empirical equations and diffusion models [J]. Science Society of America Journal, 1991, 55(10):1307.
- [21] 尹华, 叶锦韶, 彭辉, 等. 酵母菌活性污泥法吸附处理含铬电镀废水性能[J]. 环境科学, 2004, 25(3):61.
- [22] Tobin J M, White C, Gadd G M. Metal accumulation by fungi: Applications in environmental biotechnology [J]. Journal of Industrial Microbiology, 1994, 13(2):126.
- [23] Thomas P, Lynne E M, John A F. Nickel removal from nickel plating waste water using a biologically active movingbed sand filter[J]. Biometals, 2003, 16(4):567.
- [24] Padmavathy V, Vasudevan P, Dhingra S C. Biosorption of Ni^{2+} on Baker's yeast [J]. Process Biochemistry, 2003, 38(10):1389.
- [25] Ghurye G, Clifford D, Tripp A. Iron coagulation and direct microfiltration to remove arsenic from groundwater [J]. Journal American Water Works Association, 2004, 96(4):143.
- [26] Wang J L, Chen C. Correlating metal ionic characteristics with biosorption capacity of a yeast using QSAR model based on classifications of metal ions [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2007, 28(1):76.
- [27] Wang J L, Chen C. Influence of metal ionic characteristics on their biosorption capacity by *Saccharomyces cerevisiae* [J]. Applied Microbiology Biotechnology, 2007, 74(4):911.
- [28] 徐惠娟, 龙敏南, 许建宾. 啤酒酵母生物吸附镉的研究 [J]. 工业微生物, 2004, 34(2):10.
- [29] 朱一民, 魏德州. 啤酒酵母对汞离子的生物吸附 [J]. 东北大学学报, 2004, 25(1):89.
- [30] 蔡佳亮, 黄艺, 礼晓. 生物吸附剂对污染物吸附的细胞学机理 [J]. 生态学杂志, 2008, 27(6):1005.
- [31] Eric F, Jean C R. Heavy metal biosorption by fungal mycelial by products: Mechanisms and influence of pH [J]. Applied Microbiology Biotechnology, 1992, 37(3):399.
- [32] Brady D, Rose P O, Duncan J R. The use of hollow fiber cross-flow microfiltration in bioaccumulation and continuous removal of heavy metals from solution by *Sacharomyces cerevisiae* [J]. Biotechnol and Bioeng, 1994, 44(11):1362.
- [33] Seki H, Suzuki A, Maruyama H. Biosorption of chromium and arsenic onto methylate yeast biomass [J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2005, 281(2):261.
- [34] Zhang Y S, Wang R G, Wang X X, et al. The comparison of Cu^{2+} adsorption capability of Baker's yeast, nano-titania and their composite adsorbent [J]. Environmental Science, 2008, 53(9):1365.
- [35] Ashok V B, Smita S Z, Balasaheb P K. Management of heavy metal pollution by using yeast biomass [J]. Microbes and Environment, 1996, 9(1):21.
- [36] 王水云, 谢水波, 李仕友, 等. 啤酒酵母菌吸附废水中铀的研究 [J]. 铀矿冶, 2008, 27(2):96.
- [37] 李明春. 酵母菌对重金属离子吸附的研究 [J]. 菌物系统, 1998, 17(4):367.
- [38] 代淑娟, 高大, 王玉娟, 等. 共存离子对水洗废啤酒酵母吸附水相中 Cd^{2+} 的影响 [J]. 有色矿冶, 2008, 24(3):79.
- [39] Das S K, Kedari C S, Shinde S S, et al. Performance of immobilized *Saccharomyces cerevisiae* in the removal of long lived radionuclides from aqueous nitrate solutions [J]. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, 2002, 253(2):235.
- [40] Malik A. Metal bioremediation through growing cells [J]. Environment International, 2004, 30(2):261.
- [41] 韩润平, 杨贯羽, 张敬华, 等. 光谱法研究酵母菌对铜离子的吸附机理 [J]. 光谱学与光谱分析, 2006, 26(12):2334.
- [42] Yekta G, Sibel U, Ulgar G. Biosorption of copper ions by caustic treated waste Baker's yeast biomass [J]. Turk J Biol, 2003, 27(5):23.
- [43] Volesky B, J Weber, R Vieira. Biosorption of Cd^{2+} and Cu^{2+} by different types of *Sargassum biomass* [J]. Process Metallurgy, 1999, 9(1):473.
- [44] 武运, 杨海燕, 任娟, 等. 固定化啤酒废酵母吸附 Pb^{2+} 的研究 [J]. 新疆农业大学学报, 2008, 31(3):78.
- [45] 李耕倩, 郭立新. 啤酒酵母对重金属离子的吸附和解吸效果影响的实验研究 [J]. 化工科技, 2011, 19(3):37.
- [46] Ferraz A I, Tavares T, Teixeira J A. Cr^{3+} removal and recovery from *Saccharomyces cerevisiae* [J]. Chemical Engineering Journal, 2004, 105(2):11.
- [47] 赵永红, 成先雄, 邱廷省. 啤酒酵母对镉离子的吸附及镉离子的解吸 [J]. 金属矿山, 2007, 3(4):74.
- [48] 赵增华, 王婵, 王战勇. 固定化啤酒废酵母对 Pb^{2+} 的吸附 [J]. 河南科技大学学报: 自然科学版, 2007, 28(3):98.
- [49] Pavel K, Martina M, Jan F. Biosorption and metal removal through living cells [J]. Microbial Biosorption of Metals, 2011, 22(8):197.
- [50] Selcen D S. Biosorption of Ni (II) by *Schizosaccharomyces pombe*: Kinetic and thermodynamic studies [J]. Bioprocess Biosyst Eng, 2011, 34(8):997.

- [8] 汤朝起,刘伟,潘红源,等. 烤烟外观质量的评价延伸指标与内在品质的关系[J]. 烟草科技,2011(9):71.
- [9] 梁洪波,李念胜,元建,等. 烤烟烟叶颜色与内在品质的关系[J]. 中国烟草科学,2002,23(1):9.
- [10] 李章海,刘登乾,韩忠明,等. 烤烟油分与烟叶理化特性关系的初步研究[J]. 安徽农业科学,2008,36(3):1088.
- [11] 李东亮,张水成,许自成. 烤烟不同部位烟叶主要化学成分与叶长的关系[J]. 作物学报,2008,34(5):914.
- [12] 王涛,贺帆,詹军,等. 烘烤过程中不同部位烟叶颜色值和主要化学成分的变化[J]. 湖南农业大学学报:自然科学版,2012,38(2):125.
- [13] 李东亮,戴亚,李力,等. 川渝烤烟化学成分与香气的灰色优势分析[J]. 湖南农业大学学报:自然科学版,2010,36(3):280.
- [14] 郭东锋,姚忠达,汪季涛,等. 烤烟烟叶常规化学成分与主流烟气成分的关系[J]. 烟草科技,2013(2):46.
- [15] 鲁黎明,尹园,胡建新,等. 凉攀烟区烤烟微量元素含量与常规化学成分相关性分析[J]. 河南农业大学学报,2012,46(3):252.
- [16] 胡钟胜,陈晶波,周兴华,等. 模糊评判与欧氏距离法在烟叶化学成分评价中的应用[J]. 烟草科技,2012(11):33.
- [17] 吴兴富,肖炳光,曾建敏,等. 施肥量对烤烟 KRK26 和 K326 主要化学成分含量和感官质量的影响[J]. 江西农业大学学报,2012,34(4):652.
- [18] 陈庆园,陈雪,袁有波. 初烤烟叶外观质量与主要化学成分关系的研究[J]. 中国烟草科学,2008,29(1):30.
- [19] 孙平,程森,窦玉青,等. 四川会东初烤烟叶外观质量与主要化学成分关系研究[J]. 中国烟草科学,2013,34(1):29.
- [20] 王瑞新. 烟草化学[M]. 北京:中国农业出版社,2003.

(上接第43页)

- [51] Vasudevan P, Padmavathy V, Dhingra S C. Kinetics of biosorption of cadmium on Baker's yeast [J]. Biore-source Technology, 2003, 89(3):281.
- [52] Park D, Yun Y S, Park J M. Use of dead fungal biomass for the detoxification of hexavalent chromium; Screening and kinetics [J]. Process Biochemistry, 2005, 40(7):259.
- [53] Dodic S N, PoPov S D, Markov S L. Investigation of kinetics of zinc biosorption by *Saccharomyces cerevisiae* cells [J]. Nahrung Food, 2001, 45(1):59.
- [54] 姜友军,张云松,王仁国. KMnO_4 修饰面包酵母菌对 Cd^{2+} 的吸附研究[J]. 环境科学学报, 2011, 7(31):1386.
- [55] Ho Y S, McKay G. Pseudo-second order model for sorption processes [J]. Process Biochemistry, 1999, 34(5):451.
- [56] Ho Y S, McKay G. The kinetics of sorption of divalent metal ions onto sphagnum moss flat [J]. Water Research, 2000, 34(3):735.
- [57] 倪晓宇,吴涓. 铅离子的生物吸附动力学及吸附热力学研究[J]. 生物技术, 2008, 18(2):29.
- [58] Park D, Yun Y S, Lee H W, et al. Advanced kinetic model of the Cr^{6+} removal by biomaterials at various pHs and temperatures [J]. Bioresource Technology, 2008, 99(5):1141.