

酵母菌在废水处理中的应用

杨清香^{1,2} 贾振杰³ 潘峰³ 杨敏¹

(1. 中国科学院生态环境研究中心, 环境水化学国家重点实验室, 北京 100085;

2. 厦门大学近海海洋环境科学国家重点实验室, 厦门 361005;

3. 河南师范大学生命科学学院, 新乡 453002)

摘要 酵母菌既具有细菌单细胞、生长快、能形成很好的絮体、适应于各种不同的反应器等特点, 又具有真菌细胞大、代谢旺盛、耐酸、耐高渗透压、耐高浓度的有机底物等特性, 因而可用于多类难处理有机废水的处理, 并且具有处理效率高、污泥负荷高、占地面积小、剩余污泥可回收用作饲料蛋白等特殊的优越性。酵母菌废水处理技术有望成为常规好氧和厌氧处理技术的重要补充而在工业废水治理中发挥重要作用。

关键词 酵母菌 废水处理 单细胞蛋白

Application of yeasts in wastewater treatment

Yang Qingxiang^{1,2} Jia Zhenjie³ Pan Feng³ Yang Min¹

(1. State Key Laboratory of Environmental Aquatic Chemistry, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085;

2. State Key Laboratory for Marine Environmental Science, Xiamen University, Xiamen 361005;

3. College of Life Sciences, Henan Normal University, Xinxiang 453002)

Abstract Yeast cells have both the virtues of bacteria (living in single cell, growing fast, forming good flocs and suitable for various bioreactors) and fungi (high tolerance to acids, high salt and high concentration of substrates). When used in wastewater treatment, the yeast technology permits a high COD load and a small bioreactor and could endure various bad wastewater environments such as acid, high osmotic pressures and so on. Its residual sludge normally contains high protein and can be used as good additives in animal food. So this technology is expected to be a promising supplement for traditional aerobic and anaerobic wastewater treatment techniques to solve some intractable problems in industrial pollution.

Key words yeast; wastewater treatment; single cell protein (SCP)

酵母菌是一大类单细胞真核微生物的总称, 由于其具有生长快、代谢效率高、能产生特殊代谢产物等特点而在食品、医药、酒精、饮料等行业被广泛应用。酵母菌还能利用无机氮源或尿素来合成蛋白质, 生长速度快, 转化效率高, 是目前最重要的单细胞蛋白的来源^[1]。20 世纪 80 年代开始, 国内一些企业利用无毒的发酵废水作为廉价的生产原料生产酵母菌单细胞蛋白, 既减轻了废水的污染负荷, 又实现了废水资源化。酵母菌真正用于废水处理的研究始于 20 世纪 70 年代后期, 日本国税厅酿造研究所最早从环境工程概念上设计了酵母菌废水处理系统应用于啤酒生产废水和食品加工废水的处理^[2,3]。20 世纪 90 年代后, 日本一家企业成功地将该技术作为高浓度有机废水的前段处理手段用于工业废水的处理, 由此产生了环境工程意义上的酵母菌废水

处理技术, 目前该技术已经用于多种实际工业废水的处理。

1 酵母菌废水处理技术与传统的酵母生产法的区别

酵母菌废水处理技术是以从环境中筛选的适应于特定废水的一种或多种酵母菌的组合为主体, 在完全开放和好氧的条件下, 通过酵母菌对废水中有机质的分解和利用而达到去除废水 COD 实现水质净化目的的一种技术。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (50278095)

收稿日期: 2003-11-19; 修订日期: 2003-12-31

作者简介: 杨清香 (1966~), 女, 博士, 主要从事环境微生物学研究。

E-mail: yangqx04@xmu.edu.cn.

在利用酵母菌生产单细胞蛋白时,寻找廉价碳源成为最关键的内容,而其中利用废糖蜜、酒精废液作为碳源生产单细胞蛋白在环保领域则逐渐形成了传统的酵母生产法处理污水的技术。采用酵母菌对有机废水的处理主要表现为利用有机物生产单细胞蛋白(single-cell-protein,简称SCP)。该技术主要采用特别选育的单一的酵母菌菌种在无菌的条件下按一定的比例接种于配置好的废水和辅料发酵罐中进行培养,当菌体浓度达到最高时放罐收集菌体。传统的酵母生产法是一条很好的废水资源化道路,可以将废水中的有机质转化为酵母菌菌体,其中富含蛋白质和氨基酸,是代替鱼粉的很好的饲料添加剂。

该技术在我国推广应用较好,目前在蔗糖、酒精及味精、赖氨酸生产等行业得到一定的推广应用,并能为企业盈利^[4~7]。目前我国利用工业废水生产单细胞蛋白的酵母菌如表1所示。然而该技术的工程设计与环境工程中的废水处理工艺不尽相同,它不是以废水净化、而是以生产酵母为主要目的,菌种的选择主要以获得较高的得率、细胞具有较高的蛋白含量、氨基酸含量是否均衡作为指标,对有机物的利用不充分,COD去除率不高,处理后废水仍属高浓度有机废水;由于整个生产过程采用无菌生产,因此一次性投资大,运行费用较高,从而在推广应用方面受到一定限制^[15]。

表1 目前我国利用工业废水生产酵母菌单细胞蛋白的应用和研究

Table 1 Present study and application of yeast strains in single cell protein production using industrial wastewater in China

废水种类	所用菌种	COD去除率(%)	酵母菌产率	乳糖利用率(%)	参考文献
玉米淀粉废水	白地霉 扣囊拟内孢霉	90			[8]
味精废水	白地霉 啤酒酵母 葡萄酒酵母		3.4 g/100 mL 1.75 g/100 mL 1.85 g/100 mL		[9]
赖氨酸废水	酵母菌	63~67	880~1100 kg/d (盈利2850元/d)		[7]
木糖厂废水	热带假丝酵母	48			[10]
味精废水+肌苷废水	酵母菌		18 g/L		[11]
黄泔水	热带假丝酵母 产脲假丝酵母 白地霉 米曲霉 扣囊拟内孢霉	30~35	3 kg/t		[12]
乳制品废水	筛选菌种		1.6 g/L	>80	[13]
柠檬酸、土霉素废水	白色球拟酵母		1.11%		[14]

20世纪90年代初期,日本西原环境卫生研究所率先在世界上实现了酵母菌废水处理技术的实用化,该技术利用分离酵母菌对有机物的高效分解作用,尤其是对油脂等特殊有机物的出色去除(可以将废水中的含油量从10000 mg/L降低到100 mg/L,这是目前其他生物处理法无法实现的)^[16],使高浓度有机废水得到快速净化,而且省去了原有的预处理工序。此后,酵母菌废水处理技术在日本逐步得到认可,实际运行的酵母菌废水处理厂达50多个^[16]。

好氧酵母菌废水处理技术区别于传统的酵母生

产技术,它以去除废水中的COD和BOD为主要目的。从目的水样的环境中筛选适应废水水质的高效去除COD的多种酵母菌菌种后,采用混合菌种在完全开放的条件下以好氧的方式对废水进行处理。在废水处理装置的运行方式上与普通的活性污泥法非常相似,主要是利用曝气池,废水首先进入生长有混合菌种的曝气池进行曝气后,再进入沉降池,利用酵母菌优良的自然沉降性实现菌体分离,并将部分菌体实行菌体污泥回流。另外,对于一些原水COD浓度低的废水也可以利用接触氧化方式进行处理。该工艺由于不需要无菌条件,不需要特别制备菌种,不需

要特别的发酵罐,整个处理为连续的工艺过程,而不是分批分罐,因此使处理成本大大降低。从废水处理的角度,最终达到排放标准为目的。常用典型的好氧酵母菌废水处理技术工艺流程如图 1 所示^[17]。

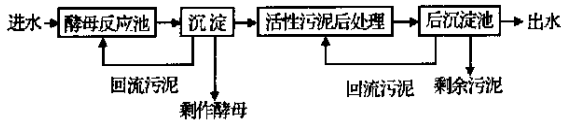


图 1 典型酵母菌废水处理工艺流程
Fig. 1 Flow chart of typical wastewater treatment process using yeasts

2 酵母菌废水处理技术的特点

酵母菌既具有细菌的特点,如以单细胞形式存在,生长繁殖快,能形成较好的絮体,因此可适用于多种不同的生物反应器;同时酵母菌又具有丝状真菌的特点,细胞较大,代谢旺盛,对 COD 的去除速度较快,耐酸、耐高渗透压、耐高浓度的有机底物,可适应于 BOD₅ 从几千到几万 mg/L 的高浓度有机废水的处理,污泥负荷可以高出常规活性污泥的数倍;酵母菌废水处理中产生的剩余污泥富含蛋白质和多种氨基酸,具有很高的饲料价值和潜在的回收利用价值。因此,该技术特别适合于高浓度有机废水的前处理,而且具有处理效率高、需要场地小、处理成本低等特点,适合在中小型企业推广应用^[17]。酵母菌对于一些普通活性污泥法不易处理的工业废水,如高酸和高盐环境下的废水处理具有优越性,酵母菌有较高的耐盐能力,如硫酸盐(SO₄²⁻)浓度最高允许值可达 20 g/L,因此当高浓度有机废水含硫酸盐浓度很高(如植物油脂工业的脂肪废水,硫酸盐在 10 g/L 以上),采用厌氧处理不适应时,可先采用酵母菌处理^[40],从而与常规生物废水处理技术起到互补作用。另外,酵母菌与活性污泥相比,处理负荷高,需要反应池小,产生的剩余污泥少,便于后续处理。表 2 列出了酵母处理技术与传统的活性污泥法的比较^[16]。

表 2 活性污泥法与酵母菌废水处理法的对比

Table 2 Comparison of wastewater treatment techniques using activated sludge and yeasts

项目	BOD-SS 负荷 (kg BOD/ kg SS d)	BOD 容积负荷 (kg BOD/ m ³ d)	污泥生成量 (kg SS/ kg BOD)
活性污泥法	0.2~0.4	0.6~0.8	0.4~0.6
酵母处理法	1.0~2.0	8~10	0.2~0.3

3 酵母菌废水处理技术的应用及研究进展

酵母菌废水处理技术产生以来,目前在日本已建成 50 套以上使用该工艺的处理装置,用于处理啤酒废水、食品加工废水、含油废水、水产品加工废水、屠宰废水以及制浆废水等^[2, 3, 18, 19]。

Chigusa 等^[19]利用从工业废水中分离出来的 9 株混合酵母菌对豆油加工废水进行直接生物处理的中试实验,整个装置连续稳定运行 1 年以上,获得较好的效果,在进水 COD、BOD、油分别为 39 300、18 200、11 900 mg/L 时,酵母菌废水处理工艺对 COD、BOD₅、油的去除率均稳定在 93% 以上。酵母菌在处理系统中自然形成菌丝或假菌丝球,具有良好的沉降性,处理后的剩余有机物可通过常规活性污泥进行进一步处理。

某食品加工厂利用酵母菌处理其食品加工废水,在进水 COD 从 1000~10 800 mg/L 变动的情况下,COD 去除率均达 96% 以上,系统具有较好的抗水质冲击能力^[3]。

酵母菌废水处理不仅用于高浓度的有机废水,同时由于酵母菌独特的生理特性,在其他一些特殊废水处理中的应用研究也受到关注。Choi 等^[20]从环境中分离出一株耐高渗的酵母菌(*Pichia guilliermondii* A9)用于朝鲜泡菜生产中的废盐水处理,在 NaCl 浓度为 10% (w/v) 的情况下,24 h 之内对废水的 BOD 去除率为 90%,处理后的酵母菌中含有 40% 的蛋白质,可考虑用于单细胞蛋白饲料。

日本最权威的酵母研究机构——日本国立酒类发酵研究所(前身为酿造研究所)的 Iefuji 等^[21]及其领导的研究组,多年来坚持酵母菌废水处理的应用研究。他们从自然界筛选到的能消化粗淀粉的隐球酵母(*Cryptococcus* sp. S-2)不仅能产生耐热的淀粉酶,还能产生木聚糖酶、多聚半乳糖醛酸酶、脂酶,能够对粗淀粉、半纤维素、果胶以及甘油酯等多种大分子物质降解,有望用于多种类废水的处理。

翰逊酵母(*Hansenula fabianii* G640)无毒并具有较好的沉降性,因而被广泛用于各类废水的处理中。但该酵母菌不含有任何消化多聚糖的酶基因,因此,在处理淀粉废水和含多聚糖的废水应用中受到限制。Kato 等人^[22]通过基因工程构建含淀粉酶和木聚糖酶基因的翰逊酵母基因工程菌,能够成功地表达这 2 种酶,但该菌株在实际废水处理中的应用还有待进一步考究。

过去的相关研究和应用主要集中在高浓度有机废水处理领域。然而人们注意到,酵母菌作为一大类特殊的真菌,无论是在降解酶系还是在菌体性状上与丝状真菌具有相似的性质,因此在其他废水处理的应用也受到了一定的关注。早在1987年,Angelis等^[23]报道一株假丝酵母能够对活性黑(Procyon Black)、活性兰(Procyon Blue)、活性红(Procyon Red)、活性橙(Procyon Orange)等4种染料进行有效吸附脱色,在染料浓度为100 mg/L的情况下,2 h的吸附率均超过94%。

Meehan等^[24]分离到一株耐高温酵母菌(*Kluyveromyces marxianus* IMB3),在37℃条件下对活性黑B脱色率达到98%。该菌株可耐受45℃的高温(脱色率93%),在偏酸性的pH范围内(3.0~5.0)达到最大脱色率,但在pH 2.0的条件下仍可以生长和脱色,实验证明其脱色机理属于吸附脱色。

Donmez等^[25]研究了热带假丝酵母(*Candida tropicalis*)在糖蜜培养基中对不同纺织染料的吸附脱色作用。结果表明,该菌株对所研究的3种染料(活性兰、活性黑和活性红)均有一定程度的吸附脱色作用,但吸附容量不同。该菌株对这3种染料在起始染料浓度为700 mg/L的情况下的最大吸附容量分别为:活性黑112 mg/g;活性兰102 mg/g;活性红79.3 mg/g。染料的加入对酵母菌的生长抑制表现在生长曲线的延迟,起始染料浓度的增加降低酵母菌的最大吸附容量。

Polman等^[26]比较了6种酵母菌和3种丝状真菌对3种不同染料废物的吸附性能。所测的几种酵母菌对这3种染料均有吸附作用,与丝状真菌无明显差别。

然而目前所报道的酵母菌脱色作用大都是通过菌体对染料的吸附作用实现的,有关酵母菌对染料的降解脱色报道非常少。Kakuta等^[27]分离到一株能对偶氮染料降解脱色的酵母菌(*Candida curvata* AN723),并利用固定化酵母细胞对染料生产厂的实际废水进行处理,取得较好效果。之后,他们进一步对该菌株的脱色酶进行分离研究,发现可产生2种偶氮还原酶,即依赖NADPH的偶氮还原酶1和依赖NADH的偶氮还原酶2。该类酶为厌氧条件下起作用的脱色酶,通常仅见于细菌中,在酵母菌中较少见。

近年来,我国环保科研人员也相继开展这方面的研究工作,本课题组从1998年开始开展酵母菌废水处理技术的应用研究。利用从环境中筛选分离到

的混合酵母菌对高浓度色拉油加工废水进行了连续小试规模的处理研究,并设计采用类似于活性污泥的运行方式,包括调节池、反应池、沉降池和回流装置,在进水COD为4100~7300 mg/L,油浓度为1400~2200 mg/L的条件下,油去除率达98%以上,COD去除率达90%以上^[28]。但是,长期运行下酵母菌混合体系容易发生污泥膨胀^[29]。研究发现,色拉油加工废水的营养不平衡可能是污泥膨胀的一个主要原因^[30],该项研究正在进行之中。

本课题组从2000年开始通过对味精生产工艺和废水特点的调研,从污染环境中筛选到2株耐高氨、耐高盐的酵母菌——嗜盐假丝酵母(*Candida haplophila*)和粘红酵母(*Rhodotorula glutinis*),并利用这两株酵母菌建立了酵母菌味精浓废水接触氧化处理系统。该系统可将废水COD从25000 mg/L不经稀释直接降至3700 mg/L左右,COD去除率达85%左右。系统在开放条件下连续运行2个多月,酵母菌始终保持优势生长状态^[31~33]。

从印染废水处理厂和城市污水处理厂取样,利用偶氮活性染料筛选染料降解菌时,得到2株能够快速高效降解偶氮染料的酵母菌——多型德巴利酵母(*Debaryomyces polymorphus*)和热带假丝酵母(*Candida tropicalis*)。这2株酵母菌能够在16 h之内产生,目前仅报道于白腐真菌中的木质素降解酶之一——锰依赖过氧化物酶(MnP),并对7种染料有较好的脱色效果,在染料浓度为100 mg/L时,脱色率分别为69%~100%和30%~100%^[34,35]。

但是在利用分离酵母对以高分子添加剂为污染主体的钻井废水进行处理时,发现酵母菌混合体系在相关高分子化合物的降解方面没有特殊表现,其对该类废水的处理能力并不比活性污泥强^[36]。

酵母菌作为在自然界广泛存在的一类真核微生物,不仅能够适应多种环境条件,而且也被发现对多种难降解物质具有降解作用^[37~39]。酵母菌具有耐酸、耐高渗透压、耐高浓度底物特性、拥有特殊酶系并且剩余菌体利用价值较高等特性,因此,有望成为废水生物处理技术的主力军之一,为解决废水处理的一些难题做出贡献。我国在酵母菌的环境应用研究方面起步较晚,但已经取得了一定的进展。今后,应该加强对酵母菌在环境应用方面的可能性和实际应用的工艺进行深入的探讨。

参考文献

- [1] 王凯军,秦人伟. 发酵工业废水处理. 北京:化学工业

- 出版社,2000. 383 ~ 436
- [2] Yoshizawa K. Treatment of wastewater discharged from a Sake Brewery using yeast. *J. Ferment. Technol.*, **1978**, 56: 389 ~ 395
- [3] Yoshizawa K. Development of the new treating method of wastewater from food industry using yeast. *Nippon Nogeikagaku Kaoshi*, **1981**, 55: 705 ~ 711
- [4] 金新梅. 味精废水的微生物转化与效益. *环境污染与防治*, **1997**, 19(2): 13 ~ 16
- [5] 秦人伟, 王中林, 周悦. 味精发酵废液提取菌体蛋白中试研究. *轻工环保*, **1990**, 12(4): 18 ~ 20
- [6] 徐达伍, 王定昌, 石瑞祥. 利用味精废液生产单细胞蛋白实现无污染排放. *轻工环保*, **1993**, 15(2): 1 ~ 4
- [7] 黄启成. 酵母菌处理赖氨酸生产废水的研究与应用. *中国给水排水*, **1999**, 15(10): 47 ~ 49
- [8] 李素玉, 李光辉, 杨淑春, 等. 利用酵母菌净化玉米淀粉工业废水的研究. *水处理技术*, **2002**, 28(4): 227 ~ 229
- [9] 马桂亮, 王莉. 酵母菌生长最适条件和最佳菌种的探讨. *中国饲料*, **2000**, (1): 31 ~ 33
- [10] 郑佩娜, 谢嘉. 利用酵母菌处理木糖厂生产废水营养条件研究. *四川大学学报(工程科学版)*, **2001**, 33(4): 63 ~ 66
- [11] 金新梅, 李接斌, 伍志兴. 味精废水与肌苷废水混配生产饲料酵母蛋白. *发酵科技通讯*, **2000**, 29(4): 4 ~ 6
- [12] 冯运玲, 吴珊, 唐宝忠, 等. 酵母菌处理黄泔水试验研究. *环境工程*, **2000**, 18(2): 11 ~ 13
- [13] 惠平, 金红, 沈玉如, 等. 利用乳糖的酵母菌的研究. *环境污染与防治*, **1991**, 13(3): 5 ~ 8
- [14] 孙黔云, 张灼, 黄红武, 等. 工业发酵废液生产单细胞蛋白的研究. *云南大学学报(自然科学版)*, **1996**, 18(2): 155 ~ 157
- [15] 吴水胜, 周秀琴, 刘道康. 味精废水治理方案的探索. *轻工环保*, **1995**, 17(3): 1 ~ 5
- [16] 郑少奎. 酵母菌处理技术在色拉油加工废水处理中的应用研究[博士学位论文]. 中国科学院生态环境研究中心, **2001**
- [17] 长谷川真一. Technical details of the yeast cycle system. 全国第一期水处理技术研讨班论文集, 北京, **1999**
- [18] Moriya K., Iefuji H., Shimoi H., et al. Treatment of distillery wastewater discharged from beet molasses spirits production using yeast. *J. Ferment. Bioeng.*, **1990**, 69: 138 ~ 140
- [19] Chigusa K., Hasegawa T., Yamamoto N., et al. Treatment of wastewater from oil manufacturing plant by yeasts. *Wat. Sci. Tech.*, **1996**, 34: 51 ~ 58
- [20] Choi M. H., Park Y. H. Growth of *Pichia guilliermondii* A9, an osmotolerant yeast, in waste brine generated from kimchi production. *Bioresource Technology*, **1999**, 70: 231 ~ 236
- [21] Iefuji H., Iimura Y., Obata T. Isolation and characterization of a yeast *Cryptococcus* sp. S-2 that produces raw starch digesting α -amylase, xylanase, and polygalacturonase. *Biosci. Biotech. Biochem.*, **1994**, 58: 2261 ~ 2262
- [22] Kato M., Iefuji H., Miyake K., et al. Transformation system for a wastewater treatment yeast, *Hansenula fabianii* J640: Isolation of the orotidine-5-phosphate decarboxylase gene (URA3) and uracil auxotrophic mutants. *Appl. Microbial Biotechnol.*, **1997**, 48: 621 ~ 625
- [23] Angelis D. F. E., Rodrigues G. S. Azo dyes removal from industrial effluents using yeast biomass. *Arquivos De Biologia E. Tecnologia*, **1987**, 30: 301 ~ 309
- [24] Meehan C., Banat I. M., McMullan G., et al. Decolorization of remazol black-b using a thermotolerant yeast, *Kluyveromyces marxianus* IMB3. *Environment International*, **2000**, 26: 75 ~ 79
- [25] Donmez G. Bioaccumulation of the reactive textile dyes by *Candida tropicalis* growing in molasses medium. *Enzyme and Microbial Technology*, **2002**, 30: 363 ~ 366
- [26] Polman J. K., Breckenridge C. R. Biomass mediated binding and recovery of textile dyes from waste effluents. *Textile Chemist and Colorist*, **1996**, 28: 31 ~ 35
- [27] Kakuta T., Aoki F., Okada T., et al. Purification and properties of two different azoreductases from a yeast *Candida curvata* AN723. *Sen I Gakkaishi*, 54: 18 ~ 25
- [28] Zheng S., Yang M., Li P. Seed yeast cultivation for salad oil manufacturing wastewater treatment. *J. Environ. Sci.*, **2002**, 14: 39 ~ 43
- [29] Zheng S., Yang M., Lv W., et al. Study on sludge expansion during treatment of salad oil manufacturing wastewater by yeast. *Environmental Technology*, **2001**, 22: 533 ~ 542
- [30] 韩云, 杨清香, 杨敏, 等. 酵母菌处理系统中氮缺乏引起的污泥膨胀的控制研究. *环境科学*, **2003**, 24(4): 68 ~ 72
- [31] 杨清香, 杨敏, 郑少奎, 等. 酵母菌对味精生产中离交尾液的处理初探. *环境科学*, **2001**, 22(6): 44 ~ 48
- [32] 黑亮, 杨清香, 杨敏. 酵母菌对味精生产废水处理的连续小试研究. *环境科学*, **2002**, 23(4): 62 ~ 66
- [33] Yang Q., Yang M., Hei L., et al. Using ammonium tolerant yeast isolates: *Candida halophila* and *Rhodotorula glutinis* to treat high strength fermentative wastewater. *Environmental Technology*, **2003**, 24: 383 ~ 390
- [34] Yang Q., Yang M., Pritsch K., et al. Decolorization of synthetic dyes and production of manganese-dependent peroxidase by new fungal isolates. *Biotechnology Letters*, **2003**, 25: 709 ~ 713
- [35] 杨清香. 耐氨酵母菌和产锰依赖过氧化物酶酵母菌的分离和应用研究[博士学位论文]. 中国科学院生态环境研究中心, **2003**
- [36] 汪严明. 酵母菌在废水处理中的应用研究[硕士学位论文]. 石油大学(北京), **2000**
- [37] 尹平, 白逢彦, 周培瑾. 降解三硝基甲苯的酵母和类酵母菌的研究. *微生物学报*, **1998**, 38(4): 295 ~ 298
- [38] 周治, 杨柳燕. 高效降解苯酚的酵母菌筛选及其降解特性研究. *南京大学学报(自然科学)*, **2001**, 37(6): 724 ~ 729
- [39] 刘斌斌, 赵永芳, 钞亚鹏, 等. 鲁氏酵母菌 WY-3 降解甲胺磷的性能. *环境科学*, **2001**, 22(4): 37 ~ 41