

难降解污染物喹啉微生物降解的国内研究进展

张晓君^{1*} 谢珍² 马晓军²

(1. 上海交通大学 生命科学技术学院 微生物代谢国家重点实验室 上海 200240)

(2. 兰州大学 生命科学学院 甘肃 兰州 730000)

摘要: 喹啉是一种难降解污染物, 近年来, 随着工业废水的增加对环境的负面影响已日益受到重视。从 20 世纪末开始, 我国科研工作者对微生物降解喹啉开展了一系列研究, 分离获得一批可在有氧条件下分解喹啉的细菌和真菌菌株, 并进行了一些基础与应用研究。但国内外对喹啉在缺氧/无氧条件下分解的研究相对较少。本文对国内喹啉降解领域的工作进行了回顾与展望。

关键词: 喹啉, 微生物降解, 分离菌, 群落, 反硝化

Domestic researches on the microbial degradation of the recalcitrant pollutant—quinoline

ZHANG Xiao-Jun^{1*} XIE Zhen² MA Xiao-Jun²

(1. State Key Laboratory of Microbial Metabolism, School of Life Sciences & Biotechnology, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

(2. School of Life Sciences, Lanzhou University, Lanzhou, Gansu 730000, China)

Abstract: As a recalcitrant pollutant, quinoline has been shown a growing concern on its negative effect following the rapid development of the related industries. Thus the treatment of this pollutant is being paid more attention. Since the end of 20th century, scientists have done serials of studies on the microbial degradation of quinoline. Dozens of bacterial and fungal strains were isolated. The studies of degrading capacity and applications of these strains were performed then. However, the study on the anaerobic degradation of quinoline is relatively lagged behind. Here in this paper, we review the researches done by domestic scientists and draw a perspective of the future studies.

Keywords: Quinoline, Microbial degradation, Microbial isolates, Community, Denitrification

含氮杂环化合物是一类降解性能很差的复杂有机物, 与脂肪族或芳香族化合物相比, 含氮杂环化合物不易为微生物所代谢。作为含氮杂环化合物之一的喹啉, 又名苯并吡啶, 它具有一定的危害性, 短时间暴露在喹啉蒸气中会导致鼻子、

眼睛和呼吸道被腐蚀, 也可导致头昏和恶心。喹啉在动物实验中会导致小鼠和大鼠的肝癌, 表明喹啉具有毒性和潜在致癌性。喹啉作为制药和染料的重要原料被广泛应用, 因此出现在制药与印染废水中; 喹啉也是焦化等石化废水和钢铁废水

基金项目: 国家自然科学基金项目(No. 21177086, 31121064); 上海市国际合作项目(No. 12230706800)

*通讯作者: Tel: 86-21-34204878; Fax: 86-21-34204878; ✉: xjzhang68@sjtu.edu.cn

收稿日期: 2013-11-12; 接受日期: 2013-12-23; 优先数字出版日期(www.cnki.net): 2014-01-09

中主要的一类含氮杂环化合物, 这些难降解污染物的排放会引起严重的污染问题。因此, 近年来随着废水排放量的增加, 国内对于喹啉降解的研究受到日益关注。尽管 20 世纪八九十年代国际上对好氧喹啉降解菌已有很多研究报道, 但近十多年来, 随着环保局势的变化, 我国已成为研究喹啉微生物降解的主要国家。本文综述了国内科研人员对喹啉的微生物降解的研究进展。

1 喹啉降解微生物的分离与研究

国外从 20 世纪 80 年代末开始, 分离了一些喹啉降解菌, 而国内对喹啉降解的研究相对较晚, 近十年才有了较多的研究。其中较为系统的分离菌株研究是清华大学钱易院士领导的课题组, 如韩力平等从处理焦化废水的 A^2/O 工艺曝气池中分离得到一株能利用喹啉作为唯一碳源、氮源和能源的细菌, 经鉴定为皮氏伯克霍尔德氏菌 (*Burkholderia pickettii*)^[1]。他们的研究表明, 该菌游离态细胞较固定化细胞状态下利用喹啉的速率快^[2-3]。他们实验还发现, 在葡萄糖的作用下, 喹啉的降解速度加快。在低浓度底物(50 mg/L)时, 该菌降解喹啉的动力学方程符合一级反应动力学模型, 在高浓度底物(300 mg/L)时, 喹啉的降解既不符合零级反应动力学模型, 也不符合一级反应动力学模型^[4-5]。

广州大学崔明超等(2004)从处理油制气废水的活性污泥中分离得到一株 Q10 菌株, 为睾丸酮丛毛单胞菌(*Comamonas testosteroni*)^[6]。该菌在好氧条件下利用 3-甲基喹啉作为唯一碳、氮源, 其对 3-甲基喹啉具有较高的降解性能^[7-8]。湖北省环境科学研究院凌海波等(2005)从焦化废水中筛选分离出 4 株喹啉降解菌, 分别属于假单胞菌属(*Pseudomonas*)、黄色杆菌属(*Flavobacterium*)、短芽孢杆菌属(*Brevibacillus*)和芽孢杆菌属(*Bacillus*)。4 株喹啉降解菌在 24 h 内的降解率达到 70% - 93%, 其中 3 株菌 48 h 的降解率达到 90% 以上^[9]。

上海交通大学刘彬彬等从一个实验室规模降

解喹啉的厌氧反应器生物膜样品分析中发现, 在反应器驯化过程中, 陶厄氏菌属(*Thauera*)和固氮弧菌属(*Azoarcus*)的微生物在群落中的丰度显著增加, 表明这些细菌可能是在厌氧条件下对喹啉的降解起关键作用的微生物^[10]。来自同一个课题组的洪璇等(2008)从焦化废水活性污泥及喹啉驯化的生物膜样品中分离获 56 株与喹啉降解相关的菌株, 这些菌株主要属于苍白杆菌属(*Ochrobactrum*)、芽孢杆菌属(*Bacillus*)、假单胞菌属(*Pseudomonas*)和红球菌属(*Rhodococcus*)。其中大部分菌株都能以喹啉为唯一碳源进行生长并高效降解喹啉, 极少数菌株不能单独降解喹啉。降解喹啉的苍白杆菌属(*Ochrobactrum*)菌株为首次报道^[11]。

中国石油大学张秀霞等(2008)从 45 份石油污染土壤样品中, 分离得到 155 株降解喹啉污染物的高效降解菌株, 其中 2 株喹啉降解菌命名为 Q5 和 Q24, 分别属于发酵乳杆菌(*Lactobacillus fermentum*)和黄色节杆菌(*Arthrobacter flavescens*)。这两株菌的喹啉降解率分别高达 72.6% 和 65.7%^[12]。他们的进一步研究发现, 对 Q5 菌株进行固定化后, 其对喹啉的去除能力大大增强, 在 500 mg/L 浓度下, 40 h 固定化 Q5 对底物去除率达 96.6%, 远高于未固定化 Q5 56.1% 的去除率^[13-14]。

北京大学环境科学与工程学院唐孝炎院士团队也分离了一批喹啉降解菌。柏耀辉等分别从首钢和武钢焦化厂废水处理系统的活性污泥中分离出 10 株细菌, 它们有较高的喹啉降解活性。10 株菌中有 4 株分离自首钢, 有 6 株分离自武钢, 16S rRNA 基因鉴定表明, 首钢焦化废水中的 4 株喹啉降解菌都属于假单胞菌属(*Pseudomonas*), 而武钢焦化废水的 6 株菌中有 3 株假单胞菌(*Pseudomonas*)及 3 株丛毛单胞菌株(*Comamonas*)^[15]。其中分离自首钢的一株假单胞菌 BC001 能在高浓度的吡啶(400 mg/L)和喹啉(约 500 mg/L)双基质条件下良好生长, 适量的外加碳

源对喹啉降解具有促进作用^[16]。分离自武钢的一株喹啉高效降解菌 BC003 也属于假单胞菌属,该菌能将 192-911 mg/L 的喹啉在 3-8 h 内有效地降解,去除率均在 96%-98%^[17]。还从武钢焦化废水活性污泥中分离得到分属副球菌属(*Paracoccus*)和假单胞菌属(*Pseudomonas*)的 2 株细菌,这两株菌可有效降解吡啶和喹啉^[18]。

北京大学深圳研究生院朱顺妮等从焦化废水处理系统中分离得到 2 株以喹啉为唯一碳源和氮源生长代谢的降解菌 QG6 和 QL2,经生理形态特征及 16S rRNA 基因的序列分析初步鉴定这两株菌为假单胞菌属(*Pseudomonas* sp.)和红球菌属(*Rhodococcus* sp.)。两株菌均表现出良好的喹啉降解性能,均能在 8 h 内完全降解初始浓度为 150 mg/L 的喹啉。QL2 具有较广泛的底物利用范围,不仅可以降解喹啉,还能降解吡啶、吲哚和其他的杂环化合物,但 QG6 对 TOC 去除率高于 QL2^[19]。他们还探讨了这两株菌两种不同的代谢途径^[20-21]。清华大学的乔琳和王建龙从废水活性污泥中分离出一株喹啉降解菌,该菌属于恶臭假单胞菌(*Pseudomonas putida*)。该菌株能在 3 h 内将 500 mg/L 的喹啉完全降解掉,但是喹啉并未矿化^[22]。辽宁工学院的洪新和杨翔华等从土壤、废水和活性污泥中共分离得到 19 株可以喹啉作为唯一氮源的细菌,其中一株 HY9 为高效降解菌,降解率达 89%,但作者并未对菌株进行种属鉴定^[23]。中山大学环境科学与工程学院陈姗姗等(2010)从稳定运行了 210 d 以上的一个以 200 mg/L 喹啉和 300 mg/L 葡萄糖为混合燃料的微生物燃料电池阳极室分离纯化出 4 株兼性厌氧菌 Q1、b、c 和 d,其中菌株 Q1、c 和 d 属于假单胞菌属(*Pseudomonas* sp.),菌株 b 属于伯克霍尔德菌属(*Burkholderia* sp.)。该研究发现,混合菌株构建的微生物燃料电池,喹啉的降解效果优于由纯菌株单独构建的电池^[24-25]。武汉科技大学化学工程与技术学院庾保华等从某石化厂区内受污染土壤中分离出一株能利用喹啉作为唯一碳源、氮源和能源的细菌 Q2,

该菌属于芽孢杆菌属(*Bacillus* sp.)。该菌株在适宜的温度、pH 及摇培条件下,能在 30 h 内将 500 mg/L 的喹啉完全降解^[26-27]。他们还分离了一株能利用喹啉作为唯一碳源、氮源和能源的肠杆菌属(*Enterobacter* sp.)菌株,该菌对喹啉表现出优异的降解特性,在纯培养条件下,30 h 内可将 486 mg/L 的喹啉完全降解^[28]。沈阳化工研究院有限公司朱希坤等从受杂环类污染的土壤中分离得到一株细菌 QLD-9,该菌能以喹啉为唯一氮源、葡萄糖为碳源生长,经 16S rRNA 基因鉴定为假单胞菌属(*Pseudomonas* sp.),该菌株对 600 mg/L 以内喹啉具有良好的降解效果^[29],在 48 h 内对质量浓度为 300 mg/L 的喹啉降解率达 99.9% 以上。东北师范大学城市与环境科学学院王培明等(2013)从吉林石化污水处理厂的活性污泥中驯化、筛选获得一株细菌,命名为 WS-5,该菌属于恶臭假单胞菌(*Pseudomonas putida*)。该菌株在最佳降解环境下对 200 mg/L 的喹啉在 132 h 降解率达到了 83.5%,是一株降解效率高且生长速率快的耐冷菌,对冬季条件下的低温降解过程具有适应性^[30]。喀什师范学院的易霞(2013)分析了两株假单胞菌(*Pseudomonas* sp.)对喹啉的降解及其基因^[31]。

迄今为止,分离的细菌均为好氧降解细菌,可在好氧条件下分解喹啉。这些分离菌株来自 *Pseudomonas*、*Paracoccus*、*Bacillus*、*Burkholderia*、*Rhodococcus*、*Ochrobactrum*、*Comamonas*、*Arthrobacter*、*Lactobacillus*、*Flavobacterium*、*Brevibacillus* 和 *Enterobacter* 属。

对好氧条件下的喹啉降解机制,国外已有较多研究。目前已知的喹啉降解途径有四种,分别被称为 5,6-Dihydroxy-2(1H) quinolinone 途径、7,8-Dihydroxy-2(1H) quinolinone 途径、Anthranilate 途径和 8-Hydroxycoumarin 途径。在 5,6-和 7,8-Dihydroxy-2(1H) quinolinone 途径中,首先在 N 原子旁进行羟化,喹啉中的苯环部分转变成一个双羟基的衍生物(5,6-或 7,8-),这个物质随后进行开苯环的反应,这符合微生物降解时首先形成

羟基化中间产物的一般规律;而在 Anthranilate 途径和 8-Hydroxycoumarin 途径中,嘧啶环先于苯环被降解,最后得到无氮的降解产物^[32]。而国内研究者多从应用角度出发,进行降解菌株的分离及其降解影响因素的研究,对降解途径、降解基因和降解酶的研究涉及较少。

2 喹啉的反硝化降解与降解菌(群)的研究

尽管好氧降解细菌研究的较多,但喹啉在反硝化条件下也有较好的去除效果^[33-35]。反硝化条件下的降解,可以节省废水好氧处理过程中的大量能耗,因而对开发节能型的处理工艺具有重要意义。台湾海洋大学 Liu 等在 1996 年发现,在淡水及海水沉积物的缺氧泥浆中,大约 0.2 mmol/L 的喹啉能在三个月内完全去除^[33]。国内外在此方面的研究还不多。清华大学何苗最早报道了采用厌氧酸化处理间歇装置对焦化废水中包括喹啉在内的 10 种有机物进行处理的研究,发现受试的有机物经过厌氧酸化处理后均发生了不同程度的转化^[36]。

上海交通大学微生物生态与基因组学实验室报道了一个喹啉反硝化反应器驯化过程中群落结构的变化,通过比较分析,认为陶厄氏菌属(*Thauera*)和固氮弧菌属(*Azoarcus*)的细菌是反应器中起着主要功能的细菌^[10]。另外还对喹啉与吡啶驯化的反硝化反应器的微生物群落结构进行了分析,揭示了一个高效的喹啉反硝化降解群落的细菌群落结构组成^[37]。通过对一个降解喹啉的反硝化反应器筛选到的 26 株优势菌进行反硝化能力以及喹啉降解能力研究,发现尽管大部分菌都可以进行反硝化,其中只有部分可在好氧条件下降解喹啉,但没有发现可以以喹啉为唯一碳源进行反硝化降解的细菌^[38],这从一个侧面说明了喹啉反硝化降解的复杂性。该实验室还以克隆文库和焦磷酸高通量测序的方法分析了一个实验室规模的喹啉反硝化降解反应器的细菌群落结构,发现 *Rhodococcus*、*Pseudomonas*、*Sphingomonas*、

Acidovorax、*Zoogloea*、*Thauera* 等属的细菌具有较高丰度^[39]。他们还报道了从焦化废水处理反硝化池中分离的 *Thauera* 菌株对焦化废水的降解能力,结果这 3 株菌株能以除喹啉外的其它主要污染物组分为唯一碳源生长^[40],可降解喹啉的 *Thauera* 属细菌的分离还在进行当中。

同济大学程静等通过摇瓶试验研究了缺氧条件下培养驯化污泥进行喹啉降解,报道了 pH 值、碳氮比和生物铁等因素的影响^[41]。同济大学田建强和李咏梅研究了以喹啉或吡啶为单一碳源的反硝化过程,研究了碳氮比对体系中亚硝酸盐积累的影响^[42]。同济大学的王林等研究了缺氧和反硝化两种条件下 2-甲基喹啉的降解,尽管降解速率有差异,但是它们以相同的生化途径降解^[43]。李咏梅等还研究了驯化的活性污泥在反硝化条件下对喹啉、异喹啉、2-羟基喹啉的降解,比较了它们降解的最适碳氮比^[44-45]。南京大学时孝磊等研究了组合工艺对焦化废水中喹啉等污染物的降解,认为缺氧反硝化对包括喹啉在内的有机物的降解或转化有重要作用^[46]。

3 白腐真菌和其它降解微生物的应用

华中理工大学张晓昱课题组近年来利用白腐真菌对喹啉废水与土壤中的喹啉污染物进行降解研究,取得系列成果。她们分析了白腐菌在不同培养基中对喹啉的降解过程及漆酶活性^[47];分析了稻草对白腐菌分解土壤中喹啉的影响^[48];深入探讨了共基质对白腐菌分解喹啉的作用^[49-50]。这些工作对理解白腐菌降解喹啉的机制具有重要价值。

同济大学李咏梅等研究了工艺条件对吡啶和喹啉共代谢的影响^[51]。南京大学时孝磊等研究了一套组合工艺对提高焦化废水中喹啉等污染物的降解效率的作用^[46]。清华大学韩力平等用固定化细胞流化床反应器进行喹啉降解,他们还在泥浆体系中对受污染土壤进行生物修复的研究^[2,52]。湖北省环境科学研究所的凌海波、中国环境科学研究院李捍东等向 A₁-A₂-O 工艺活性污泥中投加

优势菌株后,与普通活性污泥法相比,降解率均得到不同程度的提高^[9]。北京大学唐孝炎团队利用几株细菌构建的菌群处理废水取得好的分解效果^[53]。北京大学柏耀辉等用生物强化的沸石-充气滤池(Z-BAFs)处理吡啶、喹啉等含氮杂环化合物的废水取得良好效果^[54]。这些研究为喹啉废水降解工艺的改进提供了指导。

4 总结与展望

总体来说,好氧降解喹啉细菌的分离及其应用的研究近年来在我国发展较快。但是在降解代谢机制方面与国外还有明显差距。而对反硝化喹啉降解的应用研究国内外都比较缺乏,同济大学李咏梅等在工艺方面的研究促进了提高喹啉的反硝化处理效果^[44]。然而,反硝化喹啉降解的机制还很少为我们所知,这阻碍了对反硝化降解技术的进一步开发与应用。此方面研究亟待加强,以揭示降解的代谢及群落生态机制,加速分离反硝化菌株。今后一段时间,不仅需要继续发现新的菌种资源,更重要的是将已有的资源进行深入分析,在对降解功能发挥机制了解的基础上,针对性地开发好氧降解菌的生物强化应用技术;同时,研究反硝化喹啉的降解机制和群落机制,开发缺氧、厌氧处理技术,推动高效稳定处理技术的发展。相信近年来开始逐渐蓬勃发展的研究工作,一定可以为减少和消除有害污染物的排放贡献力量。

参考文献

- [1] 韩力平,王建龙,施汉昌,等.皮氏伯克霍尔德氏菌(*Burkholderia pickettii*)降解喹啉动力学的研究[J].环境科学学报,2000,20(S1):107-109.
- [2] 韩力平,王建龙,刘恒,等.固定化及游离态皮氏伯克霍尔德氏菌(*Burkholderia pickettii*)降解喹啉的试验研究[J].环境科学学报,2000,20(3):379-381.
- [3] Wang J, Quan X, Han L, et al. Microbial degradation of quinoline by immobilized cells of *Burkholderia pickettii*[J]. Water Research, 2002, 36(9): 2288-2296.
- [4] Wang JL, Wu WZ, Zhao X. Microbial degradation of quinoline: Kinetics study with *Burkholderia pickettii*[J]. Biomedical and Environmental Sciences, 2004, 17: 21-26.

- [5] Wang J, Quan X, Han L, et al. Werner H: Kinetics of co-metabolism of quinoline and glucose by *Burkholderia pickettii*[J]. Process Biochemistry, 2002, 37(8): 831-837.
- [6] 崔明超,李丽,陈繁忠,等. 羧基羧基毛单胞菌对喹啉的微生物降解途径的研究[J]. 环境科学学报, 2004, 24(1): 171-173.
- [7] Cui M, Chen F, Fu J, et al. Cometabolic biodegradation of quinoline's derivatives by a quinoline-degrading bacteria: *Comamonas* sp. Strain Q10[J]. Journal of General and Applied Microbiology, 2003, 49(6): 351-355.
- [8] 崔明超,陈繁忠,傅家谟,等. 羧基羧基毛单胞菌对喹啉类化合物的降解[J]. 环境化学, 2004, 23(1): 66-70.
- [9] 凌海波,张敬东,李捍东. 投加高效菌种处理难降解焦化废水的实验研究[J]. 能源环境保护, 2005, 19(5): 16-19,38.
- [10] Liu B, Zhang F, Feng X, et al. *Thauera* and *azoarcus* as functionally important genera in a denitrifying quinoline-removal bioreactor as revealed by microbial community structure comparison[J]. FEMS Microbiology Ecology, 2006, 55(2): 274-286.
- [11] 洪璇,张晓君,孟智奇,等. 废水反硝化生物反应器中喹啉降解菌的分离与特性[J]. 应用与环境生物学报, 2008, 14(6): 803-808.
- [12] 张秀霞,耿春香,赵朝成,等. 喹啉降解菌的降解效果考察[J]. 环境工程学报, 2008, 2(1): 88-91.
- [13] 张秀霞,房苗苗,赵朝成,等. 固定化降解菌 Q5去除喹啉的性能研究[J]. 环境工程学报, 2008, 2(9): 1265-1268.
- [14] 张秀霞,吴伟林,单宝来,等. 固定化降解菌 Q5降解喹啉动力学[J]. 石油学报: 石油加工, 2009, 25(3): 442-446.
- [15] 柏耀辉,孙庆华,赵翠,等. 焦化废水处理系统中喹啉降解菌的种群特征[J]. 中国环境科学, 2008, 28(5): 449-455.
- [16] 柏耀辉,孙庆华,温东辉,等. 假单胞杆菌 BC001对吡啶和喹啉的生物去除[J]. 北京大学学报: 自然科学版, 2008, 44(2): 237-242.
- [17] 柏耀辉,赵翠,肖亚娜,等. 降解喹啉的假单胞菌 BW003菌株的分离、鉴定和降解特性[J]. 环境科学, 29(12): 3546-3553.
- [18] Bai Y, Sun Q, Zhao C, et al. Simultaneous biodegradation of pyridine and quinoline by two mixed bacterial strains[J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2009, 82: 963-973.
- [19] 朱顺妮,刘冬启,樊丽,等. 喹啉降解菌 *Rhodococcus* sp. Q12的分离鉴定及降解特性[J]. 环境科学, 2008, 29(2): 2488-2493.
- [20] 朱顺妮,樊丽,倪晋仁. 两株喹啉降解菌代谢途径的分析[J]. 中国环境科学, 2008, 28(5): 456-460.
- [21] Zhu SN, Liu DQ, Fan L, et al. Degradation of quinoline by *Rhodococcus* sp. Q12 isolated from activated sludge[J]. Journal of Hazardous Materials, 2008, 160(2/3): 289-294.
- [22] Qiao L, Wang J. Biodegradation characteristics of

- quinoline by *Pseudomonas putida*[J]. *Bioresource Technology*, 2010, 101(19): 7683-7686.
- [23] 洪新, 杨翔华. 喹啉降解菌的分离鉴定及在柴油脱氮中的应用[J]. *辽宁石油化工大学学报*, 2005, 25(2): 32-35.
- [24] 陈姗姗, 张翠萍, 刘广立, 等. 一株以喹啉为燃料的产电假单胞菌(*Pseudomonas* sp.) Q1的特性研究[J]. *环境科学学报*, 2010, 30(6): 1130-1137.
- [25] 陈姗姗, 张翠萍, 刘广立, 等. 纯菌株与混合菌株在MFC中降解喹啉及产电性能的研究[J]. *环境科学*, 2010, 31(9): 2148-2154.
- [26] 虞保华, 刘学东, 王广鹏, 等. 一株喹啉降解菌的降解特性及代谢途径研究[J]. *石油炼制与化工*, 2012, 43(4): 68-73.
- [27] Tuo BH, Yan JB, Fan BA, et al. Biodegradation characteristics and bioaugmentation potential of a novel quinoline-degrading strain of *Bacillus* sp. isolated from petroleum-contaminated soil[J]. *Bioresource Technology*, 2012, 107: 55-60.
- [28] 孙立卢, 虞保华, 王巧凤, 等. 喹啉降解菌的筛选及强化处理炼油废水的研究[J]. *石油炼制与化工*, 2012, 43(5): 71-75.
- [29] 朱希坤, 王芳, 李小明, 等. 假单胞菌 QLD-9的分离鉴定及其对喹啉的生物降解[J]. *农药*, 2012, 51(6): 424-426.
- [30] 王培明, 霍明昕, 朱遂一, 等. 低温喹啉降解菌的筛选及降解性能[J]. *环境工程学报*, 2013, 34(1): 154-158.
- [31] 易霞, 钟江. 两株假单胞菌对吡啶和喹啉的生物降解(英文)[J]. *微生物学报*, 2011, 51(8): 1087-1097.
- [32] Fetzner S. Bacterial degradation of pyridine, indole, quinoline, and their derivatives under different redox conditions[J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 1998, 49(3): 237-250.
- [33] Liu S, Kuo C. Microbial potential for the anaerobic transformation of simple homocyclic and heterocyclic compounds in sediments of the Tsengwen river[J]. *Chemistry and Ecology*, 1996, 12(1): 41-56.
- [34] Licht D, Ahring B, Arvin E. Effects of electron acceptors, reducing agents, and toxic metabolites on anaerobic degradation of heterocyclic compounds[J]. *Biodegradation*, 1996, 7(1): 83-90.
- [35] Johansen S, Arvin E, Mosbæk H, et al. Degradation pathway of quinolines in a biofilm system under denitrifying conditions[J]. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 1997, 16(9): 1821-1827.
- [36] 何苗. 焦化废水中有机污染物经厌氧酸化后对好氧生物降解性能的影响[J]. *中国环境科学*, 1998, 18(3): 85-88.
- [37] 洪璇, 刘彬彬, 张晓君, 等. 喹啉与吡啶驯化的反硝化反应器的微生物群落结构分析比较[J]. *微生物学报*, 2008, 48(4): 503-507.
- [38] 仲汇慧, 张晓君, 岳思青, 等. 喹啉废水反硝化反应器中优势菌的代谢功能分析[J]. *微生物学通报*, 2010, 37(5): 645-650.
- [39] Zhang X, Yue S, Zhong H, et al. A diverse bacterial community in an anoxic quinoline-degrading bioreactor determined by using pyrosequencing and clone library analysis[J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2011, 91(2): 425-434.
- [40] Mao Y, Zhang X, Xia X, et al. Versatile aromatic compound-degrading capacity and microdiversity of *Thauera* strains isolated from a coking wastewater treatment bioreactor[J]. *Journal of Industrial Microbiology & Biotechnology*, 2010, 37(9): 927-934.
- [41] 程静, 蔡伊秋, 张超杰, 等. 氮杂环化合物喹啉在缺氧条件下降解的影响因素[J]. *同济大学学报: 自然科学版*, 2009, 37(9): 1207-1211.
- [42] 田建强, 李咏梅. 以喹啉或吡啶为单一碳源时反硝化过程中亚硝酸盐的积累[J]. *环境科学学报*, 2009, 29(1): 68-74.
- [43] Wang L, Li Y, Yang D. Biodegradation and metabolites of 2-methylquinoline by acclimated activated sludge under aerobic and denitrifying conditions[J]. *Process Biochemistry*, 2010, 45(6): 919-928.
- [44] 李咏梅, 赵建夫, 顾国维. 含氮杂环化合物在厌氧和缺氧条件下的降解研究[J]. *上海环境科学*, 2003, 22(2): 86-88,145.
- [45] Li Y, Wang L, Liao L, et al. Nitrate-dependent biodegradation of quinoline, isoquinoline, and 2-methylquinoline by acclimated activated sludge[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2010, 173(1/3): 151-158.
- [46] 时孝磊, 丁丽丽, 任洪强, 等. 厌氧-缺氧-预曝气-移动床生物膜系统对焦化废水特征有机污染物降解研究[J]. *环境科学学报*, 2010, 30(6): 1149-1156.
- [47] 任大军, 张晓昱, 颜克亮, 等. 白腐菌对焦化废水中喹啉的降解及机理研究[J]. *环境保护科学*, 2006, 32(1): 20-23.
- [48] 颜克亮, 任大军, 王宏勋, 等. 稻草固体介质中白腐菌对喹啉的降解研究[J]. *环境科学与技术*, 2006, 29(8): 17-18,38,116.
- [49] 任大军, 颜克亮, 张晓昱. 共基质对白腐菌降解喹啉的影响[J]. *环境污染与防治*, 2008, 30(8): 32-35,40.
- [50] 任大军, 颜克亮, 张晓昱. 共基质下白腐菌降解含氮杂环类物质的研究[J]. *环境保护科学*, 2008, 34(4): 15-17,33.
- [51] 李咏梅, 顾国雄, 赵建夫. 焦化废水中几种含氮杂环有机物在 A₁-A₂-O 系统中的降解特性研究[J]. *环境科学学报*, 2002, 22(1): 34-39.
- [52] 韩力平, 王建龙, 刘恒, 等. 固定化细胞流化床反应器处理难降解有机物喹啉的试验研究[J]. *环境科学*, 2001, 22(1): 78-80.
- [53] Zhao C, Wen D, Zhang Y, et al. Experimental and mathematical methodology on the optimization of bacterial consortium for the simultaneous degradation of three nitrogen heterocyclic compounds[J]. *Environmental Science & Technology*, 2012, 46(11): 6205-6213.
- [54] Bai Y, Sun Q, Sun R, et al. Bioaugmentation and adsorption treatment of coking wastewater containing pyridine and quinoline using zeolite-biological aerated filters[J]. *Environmental Science & Technology*, 2011, 45(5): 1940-1948.