

## 硝酸盐还原促进毒害性有机污染物降解的研究进展

江利梅<sup>1,2,3</sup> 陈杏娟<sup>2,3</sup> 马连营<sup>2,3</sup> 孙国萍<sup>2,3</sup> 许玫英<sup>2,3\*</sup>

(1. 江西农业大学 生物科学与工程学院 江西 南昌 330045)

(2. 广东省微生物研究所 广东 广州 510070)

(3. 省部共建华南应用微生物国家重点实验室 广东 广州 510070)

**摘要:** 大量具有高毒性、持久性和生物蓄积性的有机污染物被排放到环境中, 对生态环境和人类健康造成了严重威胁。近年来, 利用硝酸盐作电子受体在厌氧条件下降解毒害性有机污染物, 已取得一定的进展。本文综述了硝酸盐还原体系中几种典型毒害性有机污染物(多环芳烃、单环或杂环芳烃类有机物及卤代有机物)的厌氧降解研究进展。在此基础上, 提出了硝酸盐还原促进毒害性有机污染物降解研究中存在的主要问题及其在加速污染环境净化方面的应用前景。

**关键词:** 毒害性有机污染物, 硝酸盐还原, 微生物降解

## Perspectives on the nitrate reduction coupling biodegradation of toxic organic contaminants

JIANG Li-Mei<sup>1,2,3</sup> CHEN Xing-Juan<sup>2,3</sup> MA Lian-Ying<sup>2,3</sup> SUN Guo-Ping<sup>2,3</sup>  
XU Mei-Ying<sup>2,3\*</sup>

(1. College of Bioscience & Bioengineering, Jiangxi Agricultural University, Nanchang, Jiangxi 330045, China)

(2. Guangdong Institute of Microbiology, Guangzhou, Guangdong 510070, China)

(3. State Key Laboratory of Applied Microbiology, South China (The Ministry-Province Joint Development), Guangzhou, Guangdong 510070, China)

**Abstract:** Toxic organic contaminants are widely released into environment, which cause adverse impact on human health and environment due to their high biotoxicant, persistence and bioaccumulation. Recently, it has achieved some research progresses on the use of nitrate as an electron acceptor for the degradation of toxic organic pollutants under anaerobic conditions. In this paper, we reviewed the recent progresses on the anaerobic degradation of some typical toxic organic contaminants (polycyclic aromatic hydrocarbons, single ring or heterocyclic organic pollutants and halogenated organics) under nitrate-reducing conditions. In addition, the next challenges, as well as the new perspectives on this field were also discussed.

**基金项目:** 国家 973 计划项目(No. 2012CB22307); 国家自然科学基金项目(No. 21207019); 广东省自然科学基金研究团队项目(No. 9351007002000001); 广东省中国科学院全面战略合作项目(No. 2012B091100257); 广东省科技计划项目(No. 2012A061100009); 广东省国际合作项目(No. 2011B050400005); 广东省科学院优秀青年科技人才基金项目(No. rcjj201103)

**\*通讯作者:** Tel/Fax: 86-20-87683656; ✉: xumy@gdim.cn

**收稿日期:** 2013-09-25; **接受日期:** 2013-11-25; **优先数字出版日期**(www.cnki.net): 2013-11-26

**Keywords:** Toxic organic contaminants, Nitrate reduction, Microbial degradation

随着经济社会的发展及社会工业化进程的加快,越来越多的毒害性难降解有机污染物被释放到环境中。它们普遍具有高毒性、持久性、生物蓄积性、亲脂憎水性、难降解等特点,会在环境中大量积累,并通过生物富集作用在生物体内大量累积,进而通过食物链危害人体健康。毒害性有机污染物的污染程度通常与地区的工业化程度和产业结构有紧密的相关性。例如,广东某典型电器工业区河涌沉积物受毒害性有机物(如多环芳烃,多溴联苯醚,苯系物等)的污染较严重,16种优先控制多环芳烃的检出率达100%,多溴联苯醚的平均浓度为178 ng/g<sup>[1-3]</sup>;浙江某电子垃圾回收厂附近居民血液中多氯联苯和多溴联苯醚的含量分别高达204.20和357.44 ng/g<sup>[4]</sup>。总之,我国环境中的土壤<sup>[5]</sup>、水体<sup>[6]</sup>、大气<sup>[7]</sup>和生物体<sup>[8]</sup>等均存在不同程度的毒害性有机物污染,部分地区甚至存在潜在的生态威胁。

硝酸盐可作为许多植物和微生物的营养因子,而且有些微生物可将其作为电子受体进行呼吸代谢,并与有机污染物降解相耦合。利用硝酸盐作为治理污染河流或沉积物的调控制剂,在国内外中试工程污染治理方面有了较为广泛的运用。例如,加拿大国家水资源研究所运用硝酸盐和有机调控剂对汉密尔顿港受污染沉积物开展原位修复,研究发现,在197 d内污染沉积物中78%的油和68%的多环芳烃被微生物降解<sup>[9]</sup>。Wauer等<sup>[10]</sup>采用硝酸盐和Fe<sup>3+</sup>作为缓释剂,对德国Dagow湖沉积物污染物进行原位修复,结果发现,其对调控沉积物中污染物的释放与去除起重要作用。目前,国内外已有许多有关微生物在硝酸盐还原条件下降解有机污染物的研究报道,因此,本文对几类典型有机污染物在硝酸盐还原条件下的降解过程及其相关机理做简要综述,并提出了硝酸盐还原促进毒害性有机污染物降解研究中存在的问题及其应用前景。

## 1 硝酸盐还原体系中有机污染物的微生物降解

大部分有机污染物的生物降解是一个氧化还

原过程,失去电子被氧化或者获得电子被还原,常见的电子受体包括O<sub>2</sub>、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>、Fe<sup>3+</sup>、Mn<sup>4+</sup>、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>等,其中O<sub>2</sub>只能作为好氧菌及兼性厌氧菌的电子受体。然而地下含水层及沉积物通常是厌氧状态,或者由于有机污染物的好氧降解使氧气迅速耗尽而很快变为厌氧状态,使污染区域的微生物由好氧呼吸逐渐转变为厌氧呼吸状况<sup>[11]</sup>。硝酸盐既可作为微生物的氮源,也是缺氧条件下微生物最常用的电子受体。在缺氧或厌氧环境中,大部分微生物可利用硝酸盐作为电子受体进行厌氧呼吸并耦合有机物的降解转化。目前,国内外许多学者已研究硝酸盐还原条件下有机污染物的厌氧降解,并取得了较好的成果(表1)。

### 1.1 硝酸盐还原体系中多环芳烃的微生物降解

多环芳烃(Polycyclic aromatic hydrocarbons, PAHs)是指由两个或两个以上苯环以线状、角状或簇状排列的稠环状化合物<sup>[12]</sup>,主要来源于石油、化石燃料及煤炭的不完全燃烧等,是环境中广泛存在的典型难降解有机污染物,其种类超过100种<sup>[13]</sup>。世界卫生组织和美国环境保护署已把16种PAHs列为优先控制的持久性有机污染物<sup>[14]</sup>。PAHs的毒性随苯环数增加而增强,其生物可利用性和生物可降解性主要取决于其化学结构的复杂性及其相关的物化性质<sup>[15]</sup>,而生物降解是去除PAHs的经济有效的方法之一。

研究表明,PAHs不仅可在有氧条件下被微生物好氧降解,还可通过微生物硝酸盐还原耦合有机物氧化的方式得到降解转化。1988年Miheleic等<sup>[16]</sup>首次研究发现微生物在反硝化还原条件下降解萘的现象,随后不断有文献报道并分离驯化获得具反硝化作用的PAHs降解菌株或菌群。Mcnelly等<sup>[17]</sup>利用3株纯培养假单胞菌(SAG-R、W-2和KBM-1)研究反硝化条件下蒽、菲和芘的微生物降解,结果发现这3株菌在硝酸盐还原条件下均能降解蒽、菲和芘,且SAG-R和KBM-1分别在12 h

表 1 微生物在硝酸盐还原条件下降解有机污染物的研究实例				
Table 1 Summary of the studies on the biodegradation of organic contaminants under nitrate-reducing condition				
降解底物 Substance	接种源 Inoculation	降解率 Degradation rate (μmol/(L·d))	第一作者/年份 First author/Years	文献 Reference
萘 Acenaphthene	未污染土壤	0.120	Mihelcic J. R./1988	[16]
萘 Acenaphthene	未污染土壤	0.030	Rockne K. J./2000	[20]
萘 Acenaphthene	受污染沉积物	33.700	Lu X. Y./2011	[19]
菲 Phenanthrene	未污染土壤	0.363	Chang B. V./2002	[26]
芴 Fluorene	未污染土壤	0.424	Chang B. V./2002	[26]
芘 Pyrene	未污染土壤	0.189	Chang B. V./2002	[26]
邻苯二甲酸二甲酯 DMP	活性污泥	>100	Wu D. L./2007	[28]
苯 Benzene	污染土壤	76.920	Dou J./2010	[29]
4-烷基苯酚 Propylphenol	水稻田土壤	12.500	Shibata A./2007	[30]
苯酚 Phenol	水稻田土壤	60	Shibata A./2007	[30]
氯代苯甲酸 Chlorobenzoate	沉积物/土壤	100	Häggblom M. M./1996	[31]
氯代苯酚 Chlorophenols	活性污泥	0.595	Bae H. S./2002	[32]
氯代苯甲酸 Chlorobenzoate	活性污泥	2 260	Bae H. S./2004	[34]

和 44 h 内将水中最大溶解度的菲完全降解, 同时所有厌氧体系中也伴随着硝酸盐浓度的降低及氮氧化物的形成。Dou 等<sup>[18]</sup>从 PAHs 污染土壤中分离获得萘的降解菌群并进行相关降解实验发现, 投加硝酸盐对萘的降解总量和降解速率都具有促进作用, 且在一定范围内底物浓度越高, 其降解速率越快, 对电子受体硝酸盐的响应也越灵敏。Lu 等<sup>[19]</sup>在反硝化条件下研究硝酸盐浓度对萘降解的影响, 结果发现, 当硝酸盐浓度为 1.0 和 5.0 mmol/L 时, 降解率分别达到 91.7%和 96.3%。进一步通过 16S rRNA 基因序列分析发现, 这一降解菌群主要由  $\gamma$ -变形菌门和放线菌门的细菌组成。Rockne 等<sup>[20]</sup>从海洋沉积物中分离出 3 株降解萘的反硝化菌株, 其中菌株 NAP-4 和 NAP-3-1 对萘的降解率可达 70%–90%, 并且对硝酸盐具有专性需求, 此外在降解过程中还检测到 N<sub>2</sub>O 气体的产生。进一步的研究发现, 在该体系中反硝化细菌可能是发生异化反硝化还原途径, 即反硝化细菌将降解有机物过程中产生的大量自由电子传递给不同类型的硝酸盐受体, 从而完成厌氧微生物降解有机污染物电子传递和能量传导<sup>[21]</sup>, 而硝酸盐、亚硝酸盐或其他氮氧化物作为电子受体被还原为氮气或氮的其他气态氧化物<sup>[22]</sup>。这一结果表明, 反硝化细菌所介导的硝酸盐还原过程在萘的降解中发挥了重要

作用。Eriksson 等<sup>[23]</sup>在低温和硝酸盐还原条件下研究不同来源菌群对 11 种 2–5 环不等多环芳烃的厌氧降解, 结果发现在该条件下各个菌群均能完全降解萘和 2-甲基萘, 对菲的降解率也高达 92%, 且在培养温度为 7 °C 时对总 PAHs 去除率也高达 39%; 值得一提的是, 该体系富集培养 90 d 后菌群组成发生了明显的变化, 主要以假单胞菌属为主。Ambrosoli 等<sup>[24]</sup>在硝酸盐还原条件下从未受 PAHs 污染的水稻土壤亚表层中富集培养获得能对 PAHs 进行厌氧降解的混合菌群, 发现该菌群对菲、芴和芘的最大降解效率在 30%–55%之间, 同时还发现若向反硝化还原反应体系中添加固液比为 1:4、质量浓度为 10 g/L 的葡萄糖或醋酸钠作为共代谢底物时, 硝酸盐的反应消耗量会明显增加, PAHs 降解效果也明显提高。Wang 等<sup>[25]</sup>研究硝酸盐还原条件下菌群对蒽的降解特性及其群落组成变化, 发现培养至 80 d 时蒽的去除率达 99%以上, 并有亚硝酸盐的积累, 且培养前后菌群结构发生明显的变化。Chang 等<sup>[26]</sup>也发现, 土壤中的菲、芘、蒽、芴、萘这 5 种 PAHs 在降解过程中也伴随着大量的硝酸盐还原为亚硝酸盐的过程。

1.2 硝酸盐还原体系中单环或杂环芳烃类有机物的微生物降解

单环芳烃类物质主要包括苯及苯系物或苯酚

类物质及其衍生物等,它们均为有毒有害的有机污染物,其中苯酚相对易被微生物降解,但其衍生物由于结构较复杂而较难被微生物降解。目前,越来越多的研究证据表明,硝酸盐还原过程可促进微生物降解多种单环或杂环芳烃类有机物。

李双强等<sup>[27]</sup>研究不同电子受体对厌氧环境中微生物降解苯的影响发现,在以硝酸盐为电子受体进行苯的生物降解过程中,硝酸盐还原和亚硝酸盐暂时累积现象同时出现;当以硝酸盐和 EDTA 铁盐为电子受体时,苯的生物降解作用相当明显。伴随着苯的降解,硝酸盐和铁盐首先被还原产生亚硝酸盐和亚铁盐,随后亚硝酸盐又将亚铁盐氧化为铁盐,铁盐又继续作为苯降解的电子受体促进苯的降解;铁离子和亚铁离子之间构成的氧化还原循环促进了苯的厌氧降解和硝酸盐还原,且该过程没有明显的亚硝酸盐和亚铁盐累积现象。Wu 等<sup>[28]</sup>运用某污水处理厂活性污泥,在硝酸盐还原条件下降解邻苯二甲酸二甲酯(DMP),研究结果表明体系中硝酸盐作为电子受体参与 DMP 的降解,且其浓度随着 DMP 的降解从 307.35 mg/L 降至 27.09 mg/L,反应 56 d 时 DMP 几乎完全消失,其反应符合一级反应动力学,并最终矿化为 CO<sub>2</sub> 和 H<sub>2</sub>O。Dou 等<sup>[29]</sup>从汽油污染土壤中分离出一株苯降解菌,该菌株在厌氧条件下需要依赖硝酸盐作为电子受体降解苯,在 25 d 内能将 150 mg/L 的苯降解完全,这是首次报道蜡状芽孢杆菌能在硝酸盐还原条件下高效降解苯。Atsushi 等<sup>[30]</sup>向采自水稻田的土壤中分别添加硝酸盐、硫酸盐和三价铁离子,研究这些物质对 4-烷基苯酚厌氧降解的影响。结果显示,添加硝酸盐能显著促进苯酚及烷基苯酚的降解,使降解周期明显缩短,且在降解过程中有亚硝酸盐产生。而当添加硫酸盐或三价铁离子时,苯酚和烷基苯酚的降解均受到抑制。由此可见,硝酸盐还原条件下能加快多数单环或杂环芳烃类有机物的厌氧生物降解,甚至缩短其降解周期。

### 1.3 硝酸盐还原体系中卤代有机污染物的微生物降解

卤代有机物是指有机物中的氢原子部分或全

部被卤素原子取代而形成的化合物,绝大部分卤代有机物都具有高毒性。Max 等<sup>[31]</sup>利用不同来源沉积物研究硝酸盐还原耦合氯代苯甲酸的微生物厌氧降解,以目标底物为唯一碳源和能源,结果发现,3-氯苯甲酸(3-CB)的厌氧降解依赖于反硝化条件,且氧气会抑制其降解。在硝酸盐浓度为 20 mmol/L 的条件下,初始浓度为 200 μmol/L 的 3-氯苯甲酸(3-CB)可在 2 d 内实现完全降解,其降解反应为:  $C_7H_5O_2Cl + 5.6NO_3^- + 4.6H^+ \rightarrow 7CO_2 + 2.8N_2 + 4.8H_2O + Cl^-$ , 即 3-氯苯甲酸被矿化为 CO<sub>2</sub>, 硝酸盐还原为 N<sub>2</sub>。Bae 等<sup>[32]</sup>采用活性污泥富集培养物在反硝化条件下降解氯代苯酚,研究发现 2-氯苯酚(2-CP)的降解伴随着硝酸盐还原,168 d 内能将 0.1 mmol/L 的 2-CP 完全降解,而在无硝酸盐或只有硫酸盐存在时 2-CP 不降解,这表明 2-CP 的厌氧降解对硝酸盐有专性需求。尽管有研究发现,当硝酸盐浓度为 5 mmol/L 或高于该值时,氯代苯酚的降解将受到抑制<sup>[33]</sup>,然而在该研究中即使硝酸盐浓度达到 5 mmol/L 也未发现脱氯中间产物积累的现象。此外,他们还利用连续流反应器研究反硝化条件下 3-氯苯甲酸(3-CBA)的降解情况,结果表明,在厌氧条件下 3-CBA 的降解速率达到 2.26 mmol/(L·d),且对硝酸盐具有严格专性需求。此外还发现,4-氯苯甲酸也能在反硝化条件下发生厌氧降解<sup>[34]</sup>。

Song 等<sup>[35]</sup>在反硝化条件下富集培养 4-氯苯甲酸和 4-溴苯甲酸的降解菌群,通过连续稀释和定时添加底物获得了稳定的具反硝化能力且高效降解能力的菌群。运用 T-RFLP 技术结合 16S rRNA 基因序列差异比较,结果表明该菌群大部分由具有反硝化作用的微生物组成,如 β-变形菌门和 γ-变形菌门等。这说明在硝酸盐还原富集培养条件下会对卤代有机物降解菌群产生较大影响,使一些具有硝酸盐还原且具有降解作用的微生物成为优势菌。Coschigano 等<sup>[36]</sup>将具有降解 4-氯苯甲酸降解功能基因的质粒导入反硝化细菌 T1,发现该重组菌获得了降解 4-氯苯甲酸功能,且该功能的发挥依赖于硝酸盐,在降解过程伴随着亚硝酸盐和氮氧化物

的产生。此外,该重组菌还具有降解 4-溴苯甲酸的功能。这一重组技术在一定程度上扩大了降解菌株降解目标污染物的范围,为环境污染治理提供了重要的技术指导。

## 2 存在的问题及展望

硝酸盐作为微生物生长所需的重要营养元素和厌氧呼吸最常用的电子受体,可通过迅速提高厌氧环境中微生物的生物量和呼吸活性,促进有机污染物的原位降解转化。与其他修复技术相比,基于硝酸盐还原耦合有机污染物降解转化的原位修复技术具有高效、经济、简便、绿色环保的明显优势。然而,虽然采用硝酸盐还原促进毒害性有机污染物降解的研究取得了较好的进展,但为了更好地利用自然环境中广泛存在的硝酸盐加速污染环境的修复进程,仍需解决以下几方面的问题:

(1) 硝酸盐还原条件下毒害性有机污染物的降解机理研究亟待深入。由于硝酸盐的还原途径复杂多样,多种毒害性有机污染物在硝酸盐还原条件下的降解机制尚未阐明,这在很大程度上限制了利用硝酸盐还原加速有机污染环境修复的进程。有必要借助稳定性同位素标记等新的分析检测手段,从基因水平、元素循环与能量转化等方面开展进一步的研究,揭示硝酸盐还原促进毒害性有机污染物降解的内在机制。

(2) 新型持久性有机污染物在硝酸盐还原条件下的降解特性研究有待开展。随着研究的深入,多种新型持久性有机污染物在环境中不断被发现,但目前有关这些污染物在硝酸盐还原条件下的降解研究仍鲜有报道。为了加速这类污染物在环境中的降解转化,有必要开展硝酸还原条件下相关污染物的降解转化特性研究。本团队在实验室小试和现场中试研究中证明了硝酸盐还原对沉积物中 PAHs、苯系物以及杂环物质的生物降解的促进作用<sup>[37]</sup>。这些发现将为硝酸盐还原条件下新型持久性有机污染物的降解特性研究提供很好的基础。

(3) 硝酸盐还原条件下降解毒害性有机污染

物的微生物代谢网络特点及其协同机制亟待阐明。自然环境中毒害性有机物的生物降解过程通常是由多种微生物共同组成的代谢网络的作用结果。为了全面系统地了解该条件下降解性功能微生物的菌群结构及协同作用特点,我们需要利用多种新型的研究手段,如高通量测序、基因芯片、稳定性同位素标记等技术及多变量统计分析方法,将现场调研和实验室模拟验证相结合。相关工作的深入开展将为毒害性有机污染环境的原位生物修复提供重要的理论指导。

(4) 通过添加硝酸盐促进有机污染环境原位修复的工艺运行参数仍需进一步完善。硝酸盐既是微生物厌氧呼吸优先利用的电子受体,也是自然环境中植物和微生物的重要营养元素,是引起水体富营养化、亚硝酸盐等毒害性物质积累的重要原因。在通过添加硝酸盐促进有机污染环境原位修复的工程实践过程中,硝酸盐的投加方式、投加剂量及投加频率等参数的选择和优化是保证工程实施效果的关键。该问题的解决有赖于微生物学、生态学和环境工程学等多学科的紧密合作。

## 参 考 文 献

- [1] 邓代永,邱孟德,孙国萍,等. 典型电器工业区河涌沉积物中多环芳烃的分布、来源和潜在生态风险[J]. 环境科学, 2012, 33(6): 1801-1807.
- [2] 邱孟德,邓代永,余乐洹,等. 典型电器工业区河涌沉积物中的多溴联苯醚空间和垂直分布[J]. 环境科学, 2012, 33(2): 580-586.
- [3] 刘近,邓代永,许玫英,等. 典型电器工业区河涌沉积物中有机污染物特征分析[J]. 环境科学, 2013, 34(3): 1142-1149.
- [4] Zhao XR, Qin ZF, Yang ZZ, et al. Dual body burdens of polychlorinated biphenyls and polybrominated diphenyl ethers among local residents in an e-waste recycling region in Southeast China[J]. Chemosphere, 2010, 78(6): 659-666.
- [5] 余莉莉,李军,刘国卿,等. 珠江三角洲表层土壤中的多环芳烃[J]. 生态环境, 2007, 16(6): 1683-1687.
- [6] 康跃惠,麦碧娴,黄秀娥,等. 珠江三角洲地区水体表层沉积物中有机污染状况初步研究[J]. 环境科学学报, 2000, 20(S1): 164-170.
- [7] 王俊,张干,李向东,等. 珠江三角洲地区大气中多环芳烃的被动采样观测[J]. 环境科学研究, 2007, 20(1): 42-46.

- [8] Shi T, Chen SJ, Luo XJ, et al. Occurrence of brominated flame retardants other than polybrominated diphenyl ethers in environmental and biota samples from southern China[J]. *Chemosphere*, 2009, 74(7): 910-916.
- [9] Murphy TP, Lawson A, Kumagai M, et al. Review of emerging issues in sediment treatment[J]. *Aquatic Ecosystem Health & Management*, 1999, 2(4): 419-434.
- [10] Wauer G, Gonsiorczyk T, Kretschmer K, et al. Sediment treatment with a nitrate-storing compound to reduce phosphorus release[J]. *Water Research*, 2005, 39(2/3): 494-500.
- [11] 王连生. 有机污染化学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2004: 1-915.
- [12] 沈敏, 于红霞, 孙兆海. 沉积物中溴化联苯醚的分析方法和污染特征研究[J]. *环境科学与技术*, 2006, 19(12): 99-102.
- [13] Peng RH, Xiong AS, Xue Y, et al. Microbial biodegradation of polyaromatic hydrocarbons[J]. *FEMS Microbiology Reviews*, 2008, 32(6): 927-955.
- [14] WHO. Evaluation of the carcinogenic risk of chemicals to humans, polynuclear aromatic compounds, Part 1, Chemical Environmental and Experimental Data, 321 International Agency for Research on Cancer[R]. World Health Organization, 1983, 5-15.
- [15] Chang BV, Chang JS, Yuan SY. Degradation of phenanthrene in river sediment under nitrate-reducing conditions[J]. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 2001, 67(6): 898-905.
- [16] Mihelcic JR, Luthy RG. Microbial degradation of acenaphthene and naphthalene under denitrification conditions in soil-water systems[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 1988, 54(5): 1188-1198.
- [17] McNally DL, Mihelcic JR, Lueking DR. Biodegradation of three- and four-ring polycyclic aromatic hydrocarbons under aerobic and denitrifying conditions[J]. *Environmental Science and Technology*, 1998, 32(17): 2633-2639.
- [18] Dou JF, Liu X, Ding AZ. Anaerobic degradation of naphthalene by the mixed bacteria under nitrate reducing conditions[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, 165(1/3): 325-331.
- [19] Lu X, Zhang T, Han-Ping Fang H, et al. Biodegradation of naphthalene by enriched marine denitrifying bacteria[J]. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 2011, 65(1): 204-211.
- [20] Rockne KJ, Chee-Sanford JC, Sanford RA, et al. Anaerobic naphthalene degradation by microbial pure cultures under nitrate-reducing conditions[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2000, 66(4): 1595-1601.
- [21] 孙明明, 腾应, 骆永明. 厌氧微生物降解多环芳烃研究进展[J]. *微生物学报*, 2012, 52(8): 931-939.
- [22] Lee JW, Lee KH, Park KY, et al. Hydrogenotrophic denitrification in a packed bed reactor: effects of hydrogen-to-water flow rate ratio[J]. *Bioresource Technology*, 2010, 101(11): 3940-3946.
- [23] Eriksson M, Sodersten E, Yu ZT, et al. Degradation of polycyclic aromatic hydrocarbons at low temperature under aerobic and nitrate-reducing conditions in enrichment cultures from northern soils[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2003, 69(1): 275-284.
- [24] Ambrosoli R, Petruzzelli L, Minati JL, et al. Anaerobic PAH degradation in soil by a mixed bacterial consortium under denitrifying conditions[J]. *Chemosphere*, 2005, 60(9): 1231-1236.
- [25] Wang Y, Wan R, Zhang S, et al. Anthracene biodegradation under nitrate-reducing condition and associated microbial community changes[J]. *Biotechnology and Bioprocess Engineering*, 2012, 17(2): 371-376.
- [26] Chang BV, Shiung LC, Yuan SY. Anaerobic biodegradation of polycyclic aromatic hydrocarbon in soil[J]. *Chemosphere*, 2002, 48(7): 717-724.
- [27] 李双强, 袁林江, 杨永哲, 等. 不同电子受体对无分子氧环境中苯微生物降解的影响[J]. *环境科学学报*, 2009, 29(2): 267-272.
- [28] Wu DL, Hu BL, Zheng P, et al. Anoxic biodegradation of dimethyl phthalate (DMP) by activated sludge cultures under nitrate-reducing conditions[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2007, 19(10): 1252-1256.
- [29] Dou J, Ding A, Liu X, et al. Anaerobic benzene biodegradation by a pure bacterial culture of *Bacillus cereus* under nitrate reducing conditions[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2010, 22(5): 709-715.
- [30] Shibata A, Toyota K, Miyake K, et al. Anaerobic biodegradation of 4-alkylphenols in a paddy soil microcosm supplemented with nitrate[J]. *Chemosphere*, 2007, 68(11): 2096-2103.
- [31] Häggblom MM, Rivera MD, Young LY. Anaerobic degradation of halogenated benzoic acids coupled to denitrification observed in a variety of sediment and soil samples[J]. *FEMS Microbiology Letters*, 1996, 144(2/3): 213-219.
- [32] Bae HS, Yamagishi TK, Suwa YC. Evidence for degradation of 2-chlorophenol by enrichment cultures under denitrifying conditions[J]. *Microbiology*, 2002, 148(1): 221-227.
- [33] Sanford RA, Tiedje JM. Chlorophenol dechlorination and subsequent degradation in denitrifying microcosms fed low concentrations of nitrate[J]. *Biodegradation*, 1997, 7(5): 425-443.
- [34] Bae HS, Yamagishi TK, Suwa YC. An anaerobic continuous-flow fixed-bed reactor sustaining a 3-chlorobenzoate-degrading denitrifying population utilizing versatile electron donors and acceptors[J]. *Chemosphere*, 2004, 55(1): 93-100.
- [35] Song BK, Kerkhof LJ, Hggblom MM. Characterization of bacterial consortia capable of degrading 4-chlorobenzoate and 4-bromobenzoate under denitrifying conditions[J]. *FEMS Microbiology Letters*, 2002, 213(2): 183-188.
- [36] Coschigano PW, Hggblom MM, Young LY. Metabolism of both 4-chlorobenzoate and toluene under denitrifying conditions by a constructed bacterial strain[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 1994, 60(3): 989-995.
- [37] 刘近, 邓代永, 孙国萍, 等. 硝酸盐对沉积物中有机物氧化减量及微生物群落结构的影响[J]. *环境科学*, 2013, 34(7): 2847-2854.