

氯酚类有机污染物的生物降解研究进展

刘兴平^{1, 2}

(1. 河海大学浅水湖泊综合治理与资源开发教育部重点实验室, 江苏 南京 210098; 2. 河海大学环境科学与工程学院, 江苏 南京 210098)

摘要 从氯酚类污染物的浓度、结构及环境因素等方面叙述了氯酚类物质的生物降解性。综述了目前国内外生物降解氯酚的微生物种类, 从好氧生物降解、厌氧生物降解、厌氧好氧协同降解、共代谢降解等几个方面分析了当前微生物降解氯酚类有机污染物的一些降解机理, 对今后微生物降解氯酚类有机污染物的研究方向进行了展望。

关键词 氯酚; 生物降解; 共代谢

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 1004-693X(2008)04-0058-05

Review of biodegradation of chlorophenol organic pollutants

LIU Xing-ping^{1, 2}

(1. Key Laboratory of Integrated Regulation and Resource Development of Shallow Lakes of Ministry of Education, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. College of Environmental Science and Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract The biodegradation characteristics of chlorophenol are described in terms of the concentration and mechanism of chlorophenol pollutants as well as environmental factors. Current microbial species for chlorophenol biodegradation at home and abroad are reviewed. Microbial degradation mechanisms, including aerobic biodegradation, anaerobic biodegradation, aerobic and anaerobic co-degradation and cometabolism degradation, are discussed. Prospects for further development of microbial biodegradation of chlorophenol organic pollutants are described.

Key words chlorophenol; biodegradation; cometabolism

氯酚类有机污染物是许多工业环节(如造纸、印染、纺织等)的中间产物,也普遍存在于城市自来水中^[1],并被广泛用作杀虫剂、防腐剂、除草剂。1999年,美国大约生产了 1900 t 氯酚^[2],许多土壤、滩涂、河流等自然生态系统受到这类物质的严重污染^[3-5]。因其普遍存在,以及对人类和环境的危害^[6],美国将其中的 25 种氯酚列为优先污染物。

目前治理该类污染物有物理、化学和生物等多种处理方法。由于生物处理法具有相对经济、没有二次污染等特点,正越来越引起重视,并逐渐成为一种被人们普遍接受和认可的环境治理技术之一。人们发现,很多细菌、真菌、放线菌以及一些原生动物对许多污染物都具有去除作用,正是利用细菌的特定降解性,逐渐发展并形成了目前氯酚类有机污染

物的生物处理技术^[7]。但由于自然界中生物去除氯酚的能力相对较弱,利用它们直接降解氯酚,还达不到能够直接排放的标准,必须通过固定、驯化等技术来强化它们的降解能力。本文总结了氯酚生物处理技术的研究现状,并对将来的研究方向进行了展望。

1 氯酚类物质生物降解的重要因素

1.1 氯酚的浓度

孙贤波等^[8]引入有机物生物降解极限浓度的概念,分别利用热力学、动力学和扩散测定方法测定后认为,微生物在降解有机物的过程中,当基质浓度低于某一值时,微生物不足以从有机物的转化过程中获得足够的能量来维持正常的代谢,微生物的增量和减量基本相同,降解不再发生,这个浓度被称为浓

度限度,由此建立了极限浓度的计算模型。由于降解情况的复杂性,该模型还存在许多不足,其中对含有2种氯酚污染物的降解存在极限浓度值偏大的问题,对3种以上污染物质同时存在的情况模型基本失效。

李建华等^[9]以葡萄糖为共基质,采用间歇试验法,研究了2,4-二氯酚、2,4,6-三氯酚、2,3,4,6-四氯酚及五氯酚的产甲烷毒性及生物降解性。结果表明,氯酚类化合物对产甲烷菌的抑制程度与氯酚的浓度成正相关;氯酚毒性对COD去除率有明显影响,COD去除率与氯酚的毒性大小呈负相关。姚珏等^[10]研究认为,微生物在降解氯酚时均存在一定的限制浓度,不同氯酚限制浓度不同,超出此浓度后氯酚会对微生物产生抑制作用,浓度越高,抑制作用越强。Erkan等^[11]研究了序批式反应器中不同投加时间氯酚对生物降解的影响,投加时间不同,降解细菌对氯酚的适应浓度也不同,可见,不同浓度的氯酚生物降解性差别较大。

1.2 氯酚的结构

肖利平等^[12]通过查阅文献和计算得到13种氯酚化合物的18个理化量化参数,采用厌氧生物降解一级速率常数($\log K_b$)对其作定量结构——生物降解性关系(QSBR)进行研究,探讨影响氯酚厌氧生物降解的主要因素。通过回归分析,得到了最佳QSBR模型,其中分子最终生成热、分子总的芯排斥能和平均分子极化率是氯酚厌氧生物降解的主要影响因素。

徐文国等^[13]应用量子化学中的密度泛函理论方法(BLYP)计算得到量子化学参数,对氯酚进行了定量结构——活性相关(QSAR)研究。结果表明,氯酚对发光细菌的毒性作用因氯取代基数增多而增强。毒性的增大则会抑制微生物对氯酚的生物降解。周享春等^[14]根据分子中原子的结构特征和键的连接性,提出了新的结构信息指数和取代基染色指数计算方法,进行了20种氯酚与水生动物发光菌毒性相关性分析。分析表明,氯酚对水生动物发光菌的毒性作用与其分子的体积、取代基的位置和多少有关,苯环上的氯原子越多对水生动物发光菌的毒性也就越大。

可见,氯酚的分子结构影响其生物降解,氯取代基在酚环上的位置影响最大,位置不同,生物降解性明显不同。但最佳QSBR模型只说明了相对分子质量和电子总能量的影响不能忽视,其影响到底多大,没有定量研究。定量结构——活性相关(QSAR)模型中,虽然许多氯酚类有机物符合苯环上的氯原子越多毒性越大的共性,但也有一些氯酚并不遵循这

一规律。这对生物降解氯酚污染物质时,从氯酚分子结构的角度来考虑微生物的投加量带来了很大的不确定性。

1.3 环境的影响

在受污染环境中,多种污染物质共存并普遍含有大量的重金属离子,会影响微生物降解氯酚的能力。陈皓等^[15]研究了 Cu^{2+} 、 Cd^{2+} 、 Ni^{2+} 对2-氯酚厌氧降解及其微生态结构的影响。重金属冲击对连续流厌氧系统具有明显的抑制作用,抑制程度为 $\text{Cu}^{2+} > \text{Ni}^{2+} > \text{Cd}^{2+}$;不同浓度金属离子对2-氯酚间歇降解系统的抑制作用同样为 $\text{Cu}^{2+} > \text{Ni}^{2+} > \text{Cd}^{2+}$ 。陈皓等^[16]又采用间歇试验法研究了 Ni^{2+} 对2-氯酚厌氧降解系统的影响规律。当 $\alpha(\text{Ni}^{2+}) < 5 \text{ mg/L}$ 时, Ni^{2+} 对2-氯酚厌氧降解表现出轻度促进,当 $\alpha(\text{Ni}^{2+})$ 为5~500 mg/L, Ni^{2+} 以抑制作用为主,抑制作用随 $\alpha(\text{Ni}^{2+})$ 的增加而增强。

降解过程中微生物量也会影响降解程度和速率,甚至会改变中间产物和最终产物,LI等^[17]利用*Azotobacter sp.*来降解2,4,6-三氯酚。当细菌浓度低时降解生成2,6-DCHQ,而细菌浓度高时则会完全或部分降解为 CO_2 和 H_2O 。同时,环境中的温度、光照等都会影响微生物降解氯酚类物质。由于氯酚类物质广泛存在于环境中,既有温度、光照等条件的差别,也有重金属含量的差别,故氯酚类有机污染物在自然界中的生物降解性千差万别。

2 降解微生物的种类

自然界中氯酚类物质的降解微生物相对比较单一,许多微生物只能把一种氯酚作为唯一的降解碳源和能源。但近几年通过培养和驯化,构建工程菌,获得了可以降解多种含氯有机化合物的菌株,假单胞菌属就是其中之一。比如*Novosphingobium sp.* MT1菌株能降解地下水中的2,4,6-三氯酚、2,3,4,6-四氯酚和五氯酚。白腐菌等可以降解或矿化多种氯酚^[18]。氯酚类有机污染物的生物降解典型微生物如表1所示。构建工程菌也丰富了降解菌的种类,现在五氯酚的降解微生物就有多种,其中细菌种类有节杆菌属(*Arthrobacter*)、脱亚硫酸菌属(*Desulfitobacterium*)、分枝杆菌属(*Mycobacterium*)、假单胞菌属(*Pseudomonas*)、红球菌属(*Rhodococcus*)、沙雷氏菌属(*Serratia*)和氯酚鞘氨醇单胞菌属(*Sphingomonas chlorophenolica* formerly *Flavobacterium*)等^[19-22];真菌有齿毛菌属(*Cerrena*)、香菇(*Lentinula edodes*)、白腐菌(*White rot fungus*)、原毛平革菌属(*Phanerochaete*)、丝核菌属(*Rhizoctonia*)和根霉属(*Rhizopus*)等^[5, 23-24]。尽管自然界存在氯酚类物质

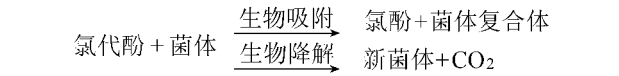
表 1 氯酚类物质降解微生物的种类

氯 酚	微 生 物	参考文献
2-氯酚	<i>Clostridium</i> sp. 嗜热梭菌 ; <i>Desulfovibrio dechloracetivorans</i> (ATCC700921) <i>Alcaligenes</i> sp. 脱硫甲基对硫磷降解菌 ; <i>Ralstonia</i> sp. 罗尔斯通氏菌 ; <i>Azotobacter</i> sp. 固氮菌 ; <i>Pseudomonas putida</i> <i>Cystobacteri</i> sp. <i>Ps. cepacia</i> 恶臭假单胞菌	[19]
3-氯酚	<i>Desulfomonile tiedjei</i> 蒂氏脱硫念珠菌	[20 I 21]
4-氯酚	<i>Ps. putida</i> . 假单胞菌 ; <i>Rulstonie eutropha</i> <i>Alcaligenes</i> sp. 罗尔斯通氏菌 ; <i>Azotobacter</i> sp 固氮菌 ; <i>Ralstonia</i> sp. 罗尔斯顿氏菌	[22]
5-氯酚	<i>Rhodococcus chlorophenlic</i> 氯酚红球菌 ; <i>White rot fungus</i> 白腐菌	[23]
2 3-二氯酚	<i>DDesulfomonile tiedjei</i> 蒂氏脱硫念珠菌	[24]
2 4-二氯酚	<i>Burkholderia cepacia</i> . 洋葱伯克雷尔德氏菌 ; <i>Ps. pickettii</i> (DTP0606)皮氏假单胞菌 ; <i>Clostridium</i> sp. 嗜热梭菌 ; <i>Desulfomonile tiedjei</i> <i>Ralstonia</i> sp. 蒂氏脱硫念珠罗尔斯通氏菌 ; <i>Pseudomonas</i> sp. 假单胞菌 ; <i>Sphingomonas</i> sp. 鞘氨醇单胞菌属细菌 ; <i>Stenotrophomonas</i> sp. 寡养单胞菌	[25 I 26]
2 5-二氯酚	<i>Desulfomonile tiedjei</i> . 蒂氏脱硫念珠菌	[21]
2 6-二氯酚	<i>Azotobacter</i> sp. 固氮菌 ; <i>Ps. pickettii</i> (DTP0606)皮氏假单胞菌	[22 I 25]
3 4-二氯酚	<i>Ps. pickettii</i> (DTP0602)皮氏假单胞菌	[5]
3 5-二氯酚	<i>Clotridium</i> sp. 梭状芽孢杆菌 ; <i>Desulfomonile tiedjei</i> . 蒂氏脱硫念珠菌	[5]
2 3 4-三氯酚	<i>Desulfovibrio dechloracetivorans</i> (JW/IC-DC1) ; <i>Clostridium</i> sp. 梭状芽孢杆菌 ; <i>Ps. pickettii</i> (DTP0602)皮氏假单胞菌	[20 I 22 I 27]
2 4 6-三氯酚	<i>Clostridium</i> sp. 梭状芽孢杆菌 ; <i>Desulfitobacterium dehalogenans</i> (JW/IU-DC1) ; <i>Ps. pickettii</i> (DTP0602)皮氏假单胞菌 ; <i>Azotobacter</i> sp 固氮菌 ; <i>Phanerochate chrysosporium</i> 嗜碱细菌	[26-28]
2 4 5-三氯酚	<i>Clostridium</i> sp. 梭状芽孢杆菌 ; <i>Ps. pickettii</i> (DTP0602)皮氏假单胞菌	[5 I 29]
四氯酚	<i>Ps. pickettii</i> (DTP0602)皮氏假单胞菌 ; <i>Ralstonia</i> sp. 罗尔斯顿氏菌 ; <i>Arthrobacter</i> sp. 节杆菌	[24]
五氯酚	<i>Ps. cepacia</i> (AC110) ; <i>Flavobacterium</i> sp. 黄杆菌 ; <i>Desulfomonile tiedjei</i> sp 蒂氏脱硫念珠菌 <i>Clostridium</i> sp. 梭状芽孢杆菌 ; <i>Rhodococcus chlorophenolicus</i> <i>Desulfitobacterium frappier</i> (PCP-1)多食鞘氨醇杆菌	[27]

的降解微生物 ,但许多降解微生物仍未被发现或仅停留在试验阶段 ,离实际运用还有相当的距离 ,尤其是降解氯酚污染的特浓或微污染水体 ,降解效果往往得不到保证 ,因此通过基因工程构建工程菌成为目前降解氯酚类有机污染物的一个研究热点。

3 生物降解的机理

氯酚在好氧、厌氧环境中的生物降解研究表明 ,降解过程中最重要的限速步骤是将苯环上氯取代基去除^[30-32]。由于脱氯机制的不同 ,一般氯酚化合物生物降解反应有好氧和厌氧生物降解两类过程 :



3.1 好氧生物降解的脱氯机制

在好氧条件下一些氯代程度较低的氯酚较易生物降解 ,降解速率也较快 ,而一些氯代程度较高的氯酚如五氯酚 ,往往难以生物降解。只有当苯环断裂成代谢中间产物、有机氯矿化为无机氯离子时 ,氯酚生物降解才可被认为是完全的。一般认为分子内相邻两个碳原子间的直接脱 HCl 或 Cl-Cl 而形成双键的反应只能发生在链烃类化合物上而不可能发生在芳香环上 ,因芳香环上的 C-Cl 键是化学惰性的 ,对亲核取代反应具有极强抗性。其脱氯作用通常只有在伴随其他系列反应、削弱了 C-Cl 键以后才能进行。氯酚好氧生物降程中的脱氯作用分为芳香环断裂前的脱氯和芳香环断裂后的脱氯两类(图 1)。

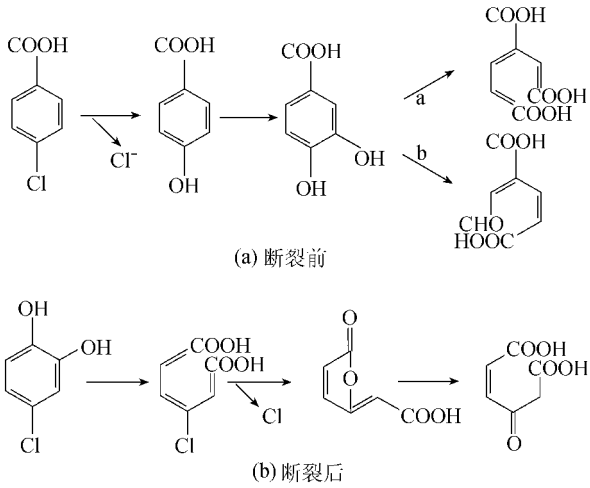


图 1 芳香环的脱氯

3.2 厌氧生物降解的脱氯机制

在厌氧或缺氧条件下 ,氯酚的脱氯就是一个还原脱氯过程。化合物得到电子的同时去掉一个氯取代基并且释放出一个氯阴离子。由于氯取代基阻止了氯酚的苯环断裂和环断裂后的脱氯 ,许多氯酚特别是多氯酚在环境中几乎是不可降解的 ,而许多氯酚在厌氧环境中则易于还原脱氯 ,形成氯代程度较低、毒性较小、更易被好氧微生物氧化代谢的部分脱氯产物 ,甚至在一些特定的环境中 ,多氯酚也可以直接矿化为 CO₂ 或 CH₄ 及 HCl。增加易被微生物利用的有机物质 ,可以刺激脱氯降解 ,其还原脱氯速率和范围也随之扩大。周洪波等^[33]应用厌氧膨胀颗粒床(EGSB)反应器处理五氯酚(PCP)废水。结果表明

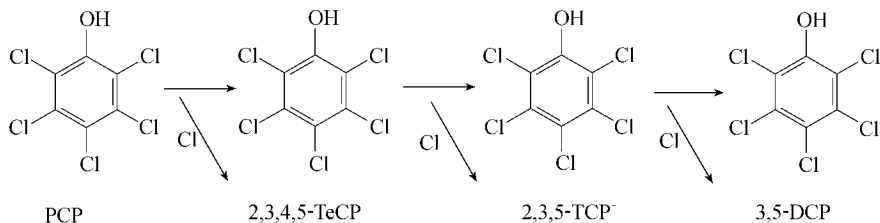


图2 PCP的降解过程

五氯酚在 EGSB 反应器中主要脱氯产物是 2,3,4,5-TeCP、2,3,5-TCP 以及 2,3,4,6-TeCP。五氯酚主要通过邻位脱氯产生 2,3,4,5-四氯酚,再脱氯产生 2,3,5-三氯酚,部分五氯酚首先间位脱氯产生 2,3,4,6-四氯酚(图2)。还原脱氯几乎是所有氯酚化合物厌氧生物降解的第一步,各种氯酚均可被相应的微生物菌群还原脱氯。单位碳原子含氯量越高,还原脱氯越容易,脱氯速率也越快,添加生物易利用有机物可刺激脱氯反应。

3.3 厌氧好氧降解协同作用机制

陈元彩等^[34]将厌氧颗粒污泥和 4 种氯酚的高效降解菌种固定化后,通过批处理实验较系统地研究了在有限供氧、完全厌氧及好氧条件下,在初始浓度为 28 $\mu\text{mol/L}$ 和 87 $\mu\text{mol/L}$ 时五氯酚的降解过程。完全厌氧过程尽管能有效降解低初始浓度 PCP,但在高初始浓度下由于厌氧微生物本身缺乏吸收、同化代谢产物单氯酚(MCP)和二氯酚(DCP)的能力,而导致了有毒代谢产物的积累,阻碍了其完全降解;在有限供氧条件下,通过厌氧颗粒中的厌氧菌群与好氧或兼性菌的协同作用,借助于好氧或兼性菌消除五氯苯酚厌氧过程中产生的抑制性低氯酚等中间产物,从而使氯酚较完全降解。与完全厌氧过程相比,混合固定化颗粒污泥在有限供氧系统具有较低的残留 TOC 值。厌氧好氧微生物菌群通过固定化,在有限供氧条件下能完全彻底降解含氯量高的氯酚。

3.4 共代谢降解机制

共氧化最早由 Lead better 于 1959 年提出^[31],定义为:生长基质存在时对非生长基质的氧化。后来 Jenson 将概念进行了扩展,称之为共代谢,不仅指生长基质存在时繁殖细胞对非生长基质的利用,也指生长基质不存在时休眠细胞对非生长基质的转化。Gibson 等认为是由于生长基质诱导产生的酶和辅助因子缺乏专一性所致,共代谢作用常使非生长基质发生结构转变,却不能彻底地将它降解^[35]。一般来说,生长基质与非生长基质在分子骨架结构类似时,生长基质诱导的酶很可能非专一性地共代谢非生长基质,许多氯酚类物质不能被微生物直接作为生长基质,但可选择一种合适的生长基质来诱导产生它们所需的酶及足够的能量驱动最初转化。比如安森

等^[36]研究了 2,4-二氯代酚的共代谢降解,结果表明苯酚和 4-MCP 能明显促进 2,4-DCP 的降解。Erkan 等^[37]也研究了经过 4-CP 驯化后的微生物处理 2,4-DCP 等的的能力。共代谢降解研究中,目前主要集中在 2 种污染物质之间,3 种以上污染物质的降解研究国内外开展得还不多。由于降解过程的复杂性以及降解物质的多样性,对实验仪器设备提出了新的要求。加之过程的复杂性,研究降解机制也很困难。

对氯酚的生物降解,大多学者研究的对象是单一菌种对单一底物,而实际废水要比单一底物的情况复杂得多。在实际废水中,多种成分存在会对微生物有毒害,或者会使微生物优先降解氯酚外的其他物质而对氯酚后降解或不降解,从而降低了氯酚的去除率,但也有可能会产生共代谢作用而有利于该物质的去除。由于微生物经固定化后对有毒物质的承受能力及降解能力都有明显的提高,因此细胞固定化技术在难降解污染物质的治理方面正成为热点。

4 氯酚生物降解的展望

从以上对氯酚生物降解机理、影响因素、降解菌种类研究等来看,氯酚生物降解主要有以下几个方面发展方向:

a. 氯酚的微生物降解机理研究虽然取得了一些成果,但主要是在低氯碳比氯酚的降解方面,对高氯碳比氯酚的降解机理仍不是很清楚,尤其是降解中间产物和降解步骤。因此,进一步研究和了解氯酚类物质的降解机理仍是今后研究的一个难点。

b. 目前对氯酚的生物降解大都集中在液相,特别是对高浓度污染废水的生物降解,对大气和土壤、甚至海洋中氯酚的污染降解才刚刚起步^[38-40],尤其是受污染的高盐度废水和土壤地下含水层中利用微生物降解氯酚的研究仍是一个很大的难点。同样,研究轻度污染水体尤其是氯消毒后城市生活用水里氯酚类物质的生物降解也是一个难点。

c. 生物强化技术,尤其是共代谢技术在氯酚的生物降解中被广泛使用,但由于自然环境的复杂性,以及生物降解反应的难确定性,在实验阶段建立起来的一些降解模型大多仅考虑了抑制、毒性等较少的的影响,其在生产实践中运用的准确性仍有待检验。

d. 生物降解主要通过降解酶的作用来实现,目前大量的研究集中在某一属或几属微生物对一种或几种氯酚的降解上,从分子生物水平尤其是降解酶的角度研究得不多^[41]。同时,生物降解与物理、化学降解手段的协同作用研究也比较少。由于三种手段各有优势,可以互为补充,今后的研究应将这三种方式有机地结合起来。

参考文献：

[1] CONTRERASA S, RODRIGUEZ M, AL MOMANIA F, et al. Contribution of the ozonation pre-treatment to the biodegradation of aqueous solutions of 2,4-dichloropheno[J]. Water Research 2003, 37 :3164-3171.

[2] TARIGHIAN A, HILL G, HEADLEY J, et al. Enhancement of 4-chlorophenol biodegradation using glucose [J]. Clean Technology and Environmental Policy 2003, 5 :61-65.

[3] SMITH A K, SUTHERS I M. Effects of sewage effluent discharge on the abundance condition and mortality of hula fish [J]. Environ Pollut, 1999, 106 :97-106.

[4] JONG T, PARRY D L. Removal of sulfate and heavy metals by sulfate reducing bacteria in short-term bench scale upflow anaerobic packed bed reactor run[J]. Water Research 2003, 27 :3379-3389.

[5] HELEN W. Oil refineries :a review of their ecological impacts on the aquatic environment[J]. Coastal and Shelf Science, 2005, 62 :131-140.

[6] MANGAT S, ELEFSINIOTIS P. Biodegradation of the herbicide 2,4-dichlorophenoxyacetic acid in sequencing batch reactors [J]. Water Research, 1999, 33 :861-867.

[7] Cho Nam-seok, Rogalski J, Jaszek M, et al. Effect of coniferyl alcohol addition on removal of chlorophenols from water effluent by fungal laccase[J]. The Japan Wood Research Society, 1999, 45(4) :174-178.

[8] 孙贤波, 赵庆祥. 有机物生物降解极限浓度的探讨[J]. 城市环境与城市生态, 2002, 15(4) :16-18.

[9] 李建华, 戴友芝, 杨大森. 几种氯酚的生物降解性及其对厌氧产甲烷毒性的试验研究[J]. 湖南工程学院学报, 2006, 16(3) :83-88.

[10] 姚琚, 赵野, 何苗. 共代谢对难降解有机物生物降解性能的影响[J]. 环境科学与技术, 2006, 29(3) :11-13.

[11] ERKAN S, FILIZ B D. Effect of feeding time on the performance of a sequencing batch reactor treating a mixture of 4-CP and 2,4-DCP [J]. Journal of Environmental Management 2007, 83 :427-436.

[12] 肖利平, 刘智勇. 氯酚类化合物厌氧生物降解性与其定量结构关系的研究[J]. 计算机与应用化学, 2003, 23(6) :541-544.

[13] 徐文国, 王丹, 朱丽, 等. 氯代苯酚类化合物毒性的构效关系研究[J]. 内蒙古工业大学学报, 2005, 24(2) :101-104.

[14] 周享春, 余训爽. 应用拓扑指数研究氯代苯酚化合物结

构与活(毒)性的相关性[J]. 长江大学学报 :自然科学版 2005, 2(1) :31-33.

[15] 陈皓, 黄爱群. 重金属对 2-氯酚厌氧降解及微生态结构的影响[J]. 中国环境科学 2006, 26(5) :519-523.

[16] 陈皓, 陈玲, 王虹, 等. Ni^{2+} 对 2-氯酚厌氧降解系统的影响[J]. 环境科学研究 2006, 19(5) :126-131.

[17] LI Deng-yu, EBERSPACHER J, Wager B, et al. Degradation of 2,4,6-trichlorophenol by *Azotobacter* sp. strain GPI[J]. Appl Environ Microbiol 1991, 57 :1920-1928.

[18] VIDAL G, DIEZ M C. Influence of feedstock and bleaching technologies on methanogenic toxicity of kraft mill wastewater [J]. Water Sci Technol 2003, 48 :149-155.

[19] SOFER S S, LEWANDOWSK G A, LODAYA M P, et al. Degradation of 2-chlorophenol by immobilized cell[J]. Water Pollu Control Fed, 1990, 62(1) :73-80.

[20] BOUCHARD B, BEAUDET R, VILLEMUR R, et al. Isolation and characterization of *Desulfotobacterium frappieri* sp. nov, an anaerobic bacterium which reductively dechlorinates pentachlorophenol to 3-chloropheno[J]. International Journal of Systematic Bacteriology, 1996, 46(4) :1010-1015.

[21] MENG Wei, LIU Zheng-tao, FAN Wei. Study on pollutant characters of main estuary of Bohai Bay[J]. Research of Environmental Sciences 2004, 17(6) :66-69.

[22] SIDDIQUE M H, PIERRE C C S, BEWTRA J K, et al. Immobilized enzyme catalyzed removal of 4-chlorophenol from aqueous solution[J]. Water Research, 1993, 27 :883-890.

[23] 李群, 谭国民, 赵华. 抑制条件下白腐菌降解氯代酚作用研究[J]. 中国造纸学报 2003, 18(1) :48-51.

[24] STEINLE P, STUCKI G, STETTLER R, et al. Aerobic mineralization of 2,6-dichlorophenol by *Ralstonia* sp. strain RK[J]. Appl Environ Microbiol 1998, 64 :2566-2571.

[25] JONG T, PARRY D L. Removal of sulfate and heavy metals by sulfate reducing bacteria in short-term bench scale upflow anaerobic packed bed reactor run[J]. Water Research 2003, 27 :3379-3389.

[26] TIROLA M A, MÄNNISTÖ M K, PUHAKKA J A, et al. Isolation and characterization of *Novosphingobium* sp. strain MT1, a dominant polychlorophenol-degrading strain in a groundwater bioremediation system [J]. Appl Environ Microbiol 2002, 68 :173-180.

[27] HU Zhong-cheng. Adsorption and biodegradation of pentachlorophenol by polyurethane-immobilized flavobacterium [J]. Environ Sci Technol, 1994, 28 :491-496.

[28] SCHENK T, MULLER R, MORSBERGER F, et al. Enzymatic dehalogenation of pentachlorophenol by extracts from *Arthrobacter* sp. strain ATCC 33790 [J]. Journal of Bacteriology, 1989, 171(10) :5487-5491.

[29] SHAR S, THAKUR I S. Enrichment and characterization of a microbial community from tannery effluent for degradation of penta-chlorophenol[J]. World Journal of Microbiology and Biotechnology 2002, 18(7) :693-698.

(下转第 82 页)

b. 努力探索江河湖库健康生命规律。包括研究江河湖库不同状况下的污染降解自净能力,不同的引排条件和地理气候特征,对江河湖库水资源开发利用和水生态环境承载能力的影响等等。

c. 抓紧建立水资源环境监控预警系统。按照流域和区域的水系特点和水文特征,抓紧建立水资源环境监控和预警系统,密切监控入河(江、湖、库)污染物排放强度,及时掌握水系的关键区域和节点的水文情报,分析河湖水量水质变化趋势并向社会作出预报,对局部突发性水污染事件及其影响范围,超前发出预警报告并提出预防措施。

d. 努力实践水资源环境占用补偿机制。在基本建立水资源有偿使用制度的基础上,继续研究依据河湖环境承载能力,建立环境资源有偿占用制度,真正做到“谁排污、谁付费,谁减排、谁受益”,通过强化经济杠杆的作用,加快建立起全社会节约水资源、保护水环境的发展方式。

参考文献：

[1] 江苏省水文与水资源勘测局. 江苏省水资源调查与评价 [R]. 南京: 江苏省水文与水资源勘测局, 2003.

[2] 江苏省防汛防旱指挥部. 江苏省水旱灾害[R]. 南京: 江苏省防汛防旱指挥部, 2007.

[3] 江苏省水利厅. 江苏省水资源综合规划报告[R]. 南京: 江苏省水利厅, 2007.

[4] 江苏省统计局. 江苏省统计年鉴[M]. 南京: 江苏省统计局, 2000~2006.

[5] 江苏省水利厅. 江苏省水功能区通报[R]. 南京: 江苏省水利厅, 2005~2007.

[6] 水利部太湖流域管理局. 太湖生态环境地图集[M]. 北京: 科学出版社, 2001.

[7] 王苏民, 龚鸿身. 中国湖泊志[M]. 北京: 科学出版社, 1998.

[8] 刘凌, 崔广柏, 王建中. 太湖底泥氮污染分布规律及生态风险[J]. 水利学报, 2005, 36(8): 900-905.

[9] 中水淮河工程有限公司. 南水北调东线一期工程可行性研究总报告[R]. 蚌埠: 中水淮河工程有限公司, 2005.

[10] 江苏省水利勘测设计院有限公司. 连云港疏港航道结合送水(通榆河北延)工程可靠性研究报告[R]. 扬州: 江苏省水利勘测设计院有限公司, 2007.

[11] 王成新, 姚士谋, 张落成. 中水回用对解决城市水资源问题的实证分析——以江苏省为例[J]. 干旱区资源与环境, 2004, 18(3): 82-87.

(收稿日期: 2008-01-18 编辑: 傅伟群)

(上接第 62 页)

[30] MIDDELDO R P, PJM D W. Enrichment and properties of a 1, 2, 4- trichlorobenzene-dechlorinating methanogenic microbial consortium[J]. Applied and Environmental Microbiology, 1997, 63(4): 1225-1229.

[31] POTRAWFKE T, TIMMIS K N, WITTICH R M. Degradation of 1, 2, 3, 4-tetrachlorobenzene by pseudomonas chlororaphis RW 71[J]. Applied and Environmental Microbiology, 1998, 64(10): 2574-2552.

[32] FURUDAWA K N, Tom I, Kam A I. Effect of chlorine substitution on the bacterial metabolism of various polychlorinated biphenyls[J]. Appl Environ Microbiol, 1979, 38(2): 301-310.

[33] 周洪波, 邱冠周. 应用 EGSB 反应器处理五氯苯酚废水 [J]. 中国环境科学, 2006, 26(2): 141-144.

[34] 陈元彩, 蓝惠霞. 固定化好氧菌和厌氧颗粒污泥在不同供氧条件下降解氯酚的研究[J]. 环境科学学报, 2005, 25(2): 171-174.

[35] SPLESS E, SOMMER C, GORISCH H. Degradation of 1, 2, 4-dichloro-benzene by xanthobacter favus 14[J]. Applied and Environmental Microbiology, 1995, 61: 3884-3888.

[36] 安森, 周琪. 2, 4-二氯代酚的共代谢降解研究[J]. 中国给水排水, 2005, 21(12): 53-55.

[37] ERKAN S, FILIZ B D. Biodegradation kinetics of 2, 4-dichlorophenol by acclimated mixed cultures[J]. Journal of Biotechnology, 2007, 127: 716-726.

[38] OKEKE B C, PATERSON A, SMITH J E. Comparative biotransformation of pentachlorophenol in soils by solid substrate cultures of lentinula edodes[J]. Applied and Environmental Microbiology, 1997, 63(4): 563-569.

[39] REDDY G B, GOLD M H. Degradation of pentachlorophenol by phanerochaete chrysosporium: intermediates and reactions involved[J]. Microbiology, 2000, 146(2): 405-413.

[40] TOMASINI A, FLORES V, CORTES D, et al. An isolate of rhizopus nigricans capable of tolerating and removing pentachlorophenol[J]. World Journal of Microbiology and Biotechnology, 2001, 17(2): 201-205.

[41] TAMER E, MAGDY A. Sequential photochemical-biological degradation of chlorophenol[J]. Chemosphere, 2007, 66: 2201-2209.

(收稿日期: 2007-04-16 编辑: 傅伟群)

