

# 固定化微生物去除地下水中氯苯研究

洪梅,毛霞飞,王冬,刘爽,杨帆,宋博宇

吉林大学环境与资源学院, 长春 130026

**摘要** 为探索固定化微生物技术去除地下水氯苯的最佳条件,采用聚乙烯醇(PVA)和海藻酸钠为包埋剂,培养了含氯苯的菌泥驯化培养的微生物,以制备固定化微生物小球,处理地下水中的氯苯。本研究从机械强度,传质性,氯苯降解率等方面综合考虑,利用正交实验确定了制备固定化微生物小球的最佳条件,并对固定化微生物和游离微生物降解氯苯的效果进行了比较。另外,还对固定化微生物降解地下水中氯苯的影响因素进行了探讨。实验结果表明,氯苯初始浓度大于 20mg/L,固定化微生物降解氯苯效果好于游离微生物的。当小球粒径为 1mm,菌液接种量为 8%,氯苯初始浓度为 80mg/L,pH 值为 7.0 左右,盐度低于 1.5%,控制培养温度为 10℃,摇床转速为 120r/min 时,固定化微生物降解性能较好。

**关键词** 氯苯;固定化;微生物

**中图分类号** X523

**文献标识码** A

**doi** 10.3981/j.issn.100-7857.2011.06.005

## Biodegradation of Chlorobenzene-contaminated Ground Water by Immobilized Microorganism

HONG Mei, MAO Xiafei, WANG Dong, LIU Shuang, YANG Fan, SONG Boyu

College of Environment and Resources, Jilin University, Changchun 130026, China

**Abstract** To study the optimal conditions for the biodegradation of chlorobenzene (CB)-contaminated ground water by immobilized microorganism, the CB-degrading bacteria are screened out from the CB-contaminated soil. Polyvinyl alcohol (PVA) and sodium alginate are used to encapsulate microorganisms to make immobilized bacteria beads. The optimal conditions of the immobilized beads were identified by the orthogonal experiment, with the effect factors including mechanical strength, penetrability and the removal efficiency of the CB. The factors influencing the immobilized microorganism degrading ability were studied. The results show that the removal efficiency of the immobilized beads is better than the free microorganism. When the immobilized beads are in the optimal condition with the diameter of the bead being 1mm, the concentration of bacterial suspension 8%, the initial concentration of CB 80mg/L, pH value about 7.0, the concentration of the NaCl less than 1.5%, the temperature 10℃, and the shaking table revolution 120r/min, the biodegrading performance is quite excellent.

**Keywords** chlorobenzene; immobilization; microorganism

### 0 引言

氯苯是毒性较大的难降解的挥发性有机污染物,容易残留在环境中而造成不同程度的污染危害,被很多国家列入环境优先控制污染物或者“黑名单”<sup>[1]</sup>之中。对于进入地下水环境中的挥发性有机物,常用气体抽提法和活性炭吸附去除,但实践证明其效果并不理想<sup>[2]</sup>,而原位生物修复法被推荐为可行的,它能缩短修复时间并能降低成本<sup>[3-4]</sup>。目前主要的生物修复方法有自然衰减、生物刺激和生物强化。生物包埋强化技术是近年来出现的一种基于生物强化技术的新兴含水层修复方法。

生物包埋(固定化)强化技术是通过化学或物理手段将人工筛选的游离微生物限定于一定的空间区域,使其保持活性并可以反复利用。固定化微生物与游离微生物相比具有细胞密度高、反应速度快、微生物流失少、产物易分离、反应过程易控制、适应环境能力强等优点<sup>[5]</sup>,因此在难降解有机物处理领域有独特的优势。经固定后的微生物可以用于异位修复(如加入到把地下水抽取到地表的反应器中),也可用于原位修复(如添加到生物渗透反应墙中或直接注入到地下水形成生物反应带)。近年来,国外学者对生物包埋强化技术及其应用开展了大量研究,尤其在有毒及难降解有机物的修复方面<sup>[6-8]</sup>。

收稿日期:2010-10-25;修回日期:2011-01-31

基金项目:国家水体污染控制与治理科技重大专项(2008ZX07207-007-05)

作者简介:洪梅,教授,研究方向为水土环境污染控制与治理,电子信箱:hongmeizhangbo@163.com

本研究以氯苯为实验对象,通过正交实验确定固定化微生物小球的最佳包埋条件和方 法,并对固定化微生物降解人工模拟地下水中氯苯的影响因素进行了初步探讨,以期得到固定化微生物原位修复法处理地下水中氯苯的适宜条件。

## 1 材料和方法

### 1.1 材料

#### 1.1.1 微生物培养基

液体培养基:葡萄糖 1g,蛋白胨 1g,  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  0.5g,  $\text{K}_2\text{HPO}_4$  0.5g,  $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  0.2g,  $\text{CaCl}_2$  0.1g,  $\text{NaCl}$  0.2g,  $\text{MnSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$  痕量,质量分数 10%  $\text{FeCl}_2$  溶液 1 滴,蒸馏水定容至 1000mL 和适量氯苯(按实验要求配置不同的质量分数溶液),用质量分数为 10%  $\text{NaOH}$  溶液调节 pH 值为 7.0。固体培养基加质量分数为 1.5%~2.0% 的琼脂。氯苯和其他各种试剂均为 AR 级。

加富培养基:牛肉膏 3g,蛋白胨 10g,  $\text{NaCl}$  5g,蒸馏水 1000mL,琼脂 20g, pH 值为 7.2~7.4, 121℃ 高压蒸汽灭菌 20min。用于菌株的平板分离和活化(做活化培养基时不加琼脂)。

#### 1.1.2 人工模拟地下水

根据以上液体培养基的成分配制人工模拟地下水:  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  0.5g,  $\text{K}_2\text{HPO}_4$  0.5g,  $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  0.2g,  $\text{CaCl}_2$  0.1g,  $\text{NaCl}$  0.2g,  $\text{MnSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$  痕量,质量分数 10%  $\text{FeCl}_2$  溶液 1 滴,蒸馏水定至 1000mL, pH 值调至 7.0 左右,整个实验过程在温度为 10℃ 左右的振荡培养箱中进行。

#### 1.1.3 菌泥

取附近公园表面 3cm 以下的土壤 1kg,过筛,与含氯苯 100mg/L 的人工模拟地下水配制而成。

#### 1.1.4 固定化试剂

PVA,海藻酸钠,  $\text{CaCl}_2$ ,硼酸,生理盐水,己二胺等。

#### 1.1.5 主要仪器

YXQ-SG46-280S 不锈钢手提式压力蒸汽灭菌锅(上海博迅实业有限公司),全温振荡培养箱 HZQ-F160(哈尔滨市东联电子技术开发有限公司),SPX-250B-D 振荡培养箱(上海博迅实业有限公司医疗设备厂),GC-2010 气相色谱仪(日本岛津公司)

## 1.2 实验方法

### 1.2.1 微生物培养

称取第 1.1.3 节所述菌源污泥 10g,装入盛有 100mL 的已灭菌的液体培养基三角瓶中,加入经灭菌的氯苯,使培养液中氯苯浓度为 10mg/L,再将其放在恒温摇床 10℃,转速为 120r/min,培养 5d 后,吸取 1mL 菌液转接至新鲜培养液中。采用相同的培养方法,逐步增加氯苯含量以对微生物进行驯化,以 5d 为同一氯苯浓度的一个驯化周期,每个浓度连续驯化两个周期后再逐渐增加培养基中氯苯的浓度,氯苯每次增加的浓度梯度是 10mg/L,每批做 2 个转移接种的对比实验,每次均做不加菌种的对照,在每个周期结束时取 1mL 菌液以无菌操作移接至新鲜培养基中,进入下一个培养周期。为了避免氯苯挥发,菌种的驯化和培养在封闭体系中进行;为了

保证充足的氧气采用大体积小液量的体系和摇床振荡的培养方式。连续富集到氯苯浓度为 100mg/L 时,开始把菌液转接至含一定浓度氯苯的人工模拟地下水中,以验证是否有降解氯苯的能力。

### 1.2.2 固定化细菌制备

配制一定浓度的 PVA 和海藻酸钠溶液并加热溶解,冷却至 10℃ 左右,将富集驯化得到的菌液经离心分离后以一定浓度比加入至冷却后的以上混合物,并搅匀。再用针头直径分别为 1, 2, 4mm 的注射器把上述均匀黏稠状液体以恒定速率将其滴入  $\text{CaCl}_2$  的中性硼酸饱和溶液,室温下交联钙化 24h,得到粒径分别为 1, 2, 4mm 左右的固定化小球。再与己二胺固定一段时间后,用生理盐水冲洗固定化小球。

### 1.2.3 氯苯检测方法

从摇瓶中取水样 10mL,用 5mL  $\text{CS}_2$  萃取,萃取样品经无水硫酸钠干燥后进入气相色谱仪分析,进样体积约为 2 $\mu\text{L}$ 。

实验中用的气相色谱仪, FID 检测器, DB-1 型毛细柱,柱长 30m, 内径 0.32mm, 膜厚 0.32 $\mu\text{m}$ 。

色谱条件:气化室温度 200℃,柱温初始温 40℃,程序升温至 60℃,升温速率 2℃/min,检测器温度 220℃,空气流量 400mL/min,氢气流量 43mL/min,  $\text{N}_2$  载气流量 3mL/min,分流比为 2:1。

## 2 结果与分析

### 2.1 固定化条件的选择

制备固定化小球过程中的许多操作条件会影响固定化小球降解氯苯的效果,其中包埋剂 PVA 和海藻酸钠的浓度,交联剂  $\text{CaCl}_2$  的浓度,包埋菌体量为主要的影响因素。利用以上 4 个因素的 3 个水平做正交实验(表 1),以确定上述 4 种因素在什么条件下使细胞经固定化后既保持高活性又能节省时间节省材料,同时还能使固定化小球具有较高的机械强度和传质性能。再将按以上各个因素的不同水平制备得到的固定化细胞分别加入到氯苯浓度为 80mg/L 的 100mL 人工模拟地下水中,调节 pH 值为 7.0 左右,在转速为 120r/min,温度控制为 10℃ 的摇床培养 24h 后,用气相色谱法测定废水中氯苯浓度,以氯苯降解率为指标,利用正交实验结果(表 2),进行固定化最优操作条件的确定。

表 1 固定化条件正交试验因素和水平

Table 1 Factors and levels of the cross-test experiment

	因素 A	因素 B	因素 C	因素 D
水平	(PVA) /(g·L <sup>-1</sup> )	(海藻酸钠) /%	(CaCl <sub>2</sub> ) /%	包埋剂胶液与 菌液体积比
1	100	1.0	1.5	30:1
2	90	0.8	1.0	25:1
3	80	0.6	0.5	20:1

注:表中百分数为质量分数。

Note: % in Table 1 refers to mass fraction.

表 2 正交试验结果分析

Table 2 Analysis of the experimental data

实验序号	因素 A	因素 B	因素 C	因素 D	降解率/%
1	1	1	1	1	69.0
2	1	2	2	2	72.7
3	1	3	3	3	67.4
4	2	1	2	3	80.2
5	2	2	3	1	69.7
6	2	3	1	2	75.1
7	3	1	3	2	87.6
8	3	2	1	3	79.4
9	3	3	2	1	76.2
$K_1$	208.5	236.8	223.5	214.9	
$K_2$	226.0	221.8	229.1	235.4	
$K_3$	243.2	218.7	224.7	227.0	
$R$	34.7	18.1	4.4	20.5	

注:  $K$  为同一因素降解率的合计值,  $R$  为同一因素最大与最小降解率之差。

Notes:  $K$  in Table 2 is the sum of the sum factor's degradation rates;  $R$  is the difference of the same factor's maximal degradation rate and minimal degradation rate.

通过比较上述正交实验结果中级差  $R$  的大小发现, 各个因素作用主次为  $A>D>B>C$ , 当 PVA 的浓度为 80g/L 时, 固定化小球对氯苯的降解效果较好。

在固定化小球的制备过程中, 观察到 PVA 的浓度大小对固定化操作过程具有较大的影响。当使用低浓度的 PVA 做载体时, 由于胶液比较稀, 制成的固定化小球较软, 强度较差, 对菌体的包埋效果较差; 当使用高浓度的 PVA 做载体时, 由于胶液比较黏稠, 成球时常出现拖尾现象, 使得固定化小球成形不好, 常出现小球黏连现象。而采用 80g/L 的 PVA 做载体时, 成球性好, 强度也较好。

对按  $A_3B_1C_2D_2$  制成的固定化小球进行性能测试<sup>[9-10]</sup>, 结果表明这些小球具有较好的机械强度和传质性能。

根据上述实验现象和正交实验结果, 可以确定降解氯苯的固定化小球制备最优条件为  $A_3B_1C_2D_2$ , 即 PVA 80g/L, 海藻酸钠 1.0%,  $CaCl_2$  1.0%, 包埋剂与菌液体积比 25:1。

## 2.2 氯苯初始浓度对两种微生物降解氯苯的影响

将游离微生物(菌液接种量为 8%)和含同等菌量的粒径为 1mm 的固定化微生物(在最优操作条件下制备)分别置于氯苯初始浓度分别为 30, 40, 50, 60, 70, 80mg/L, pH 值为 7.0 左右的模拟地下水中, 于 10℃, 120r/min 条件下进行振荡培养 24h。比较不同氯苯初始浓度条件下固定化微生物和游离微生物的氯苯降解情况, 结果如图 1 所示。

从图 1 可以看出, 氯苯的初始质量浓度的变化对两种微生物的降解性能有一定影响, 且有相似的影响趋势。氯苯的降解率随着其初始浓度的提高而下降, 当氯苯浓度高于 80mg/L 时, 固定化微生物降解率下降到 70% 以下。为了保证

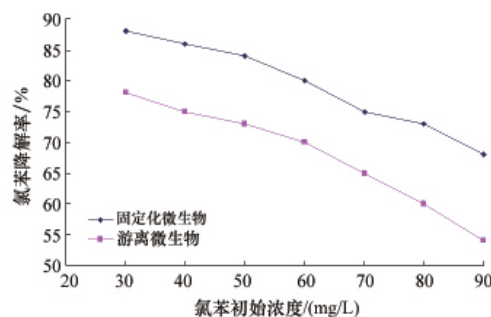


图 1 氯苯初始浓度对两种微生物降解氯苯的影响

Fig. 1 Effect of different initial concentration of CB on CB removal

氯苯的一定初始浓度并且保持较高的降解率, 后续实验氯苯初始浓度设为 80mg/L。从图 1 还可以看出, 被固定化后的微生物的氯苯降解率要高于游离微生物的。

## 2.3 pH 值对两种微生物降解氯苯的影响

将游离微生物(菌液接种量为 8%)和含同等菌量的粒径为 1mm 的固定化微生物(在最优操作条件下制备)分别置于氯苯初始浓度为 80mg/L, pH 值分别为 4.0, 5.0, 6.0, 7.0, 8.0, 9.0, 10.0 的模拟地下水中, 于 10℃, 120r/min 条件下进行振荡培养 24h。比较不同 pH 值条件下固定化微生物和游离微生物的氯苯降解情况, 实验结果如图 2 所示。

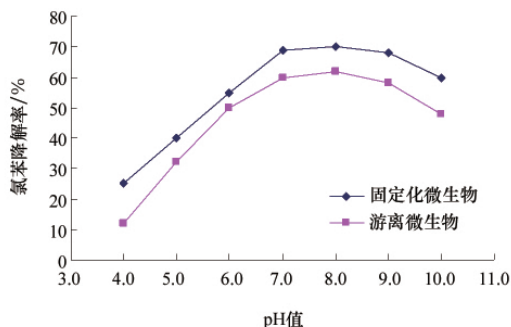


图 2 pH 值对两种微生物降解氯苯的影响

Fig. 2 Effect of initial pH on CB removal

由图 2 可以得到, pH 值的变化对固定化微生物和游离微生物降解氯苯的影响相似。当 pH 值在 7.0-9.0 时, 两种微生物对氯苯的降解率较好。同时还可以看出, 在各个 pH 值范围内, 固定化微生物的降解率要高于游离微生物的。

## 2.4 菌液接种量对两种微生物降解氯苯的影响

将游离微生物和含菌量分别为 2%, 4%, 6%, 8%, 10%, 12% 的粒径为 1mm 的固定化微生物(在最优操作条件下制备)分别置于氯苯初始浓度为 80mg/L, pH 值为 7.0 左右的含氯苯的模拟地下水中, 于 10℃, 120r/min 条件下进行振荡培养 24h, 比较不同菌液接种量条件下固定化微生物和游离微生物的氯苯降解情况, 结果如图 3 所示。

图 3 说明, 菌液接种量对以上两种微生物降解氯苯具有相同影响。当接种量小于 8% 时, 降解率随着接种量的增大而

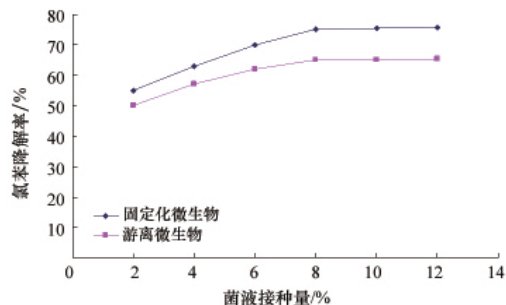


图3 菌液接种量对两种微生物降解氯苯的影响

Fig. 3 Effect of bacterial suspension concentration on CB removal

上升;当接种量超过8%后,降解率随着接种量的增加而没有明显增大。所以此实验接种量设为8%。

### 2.5 摇床转速对两种微生物降解氯苯的影响

将游离微生物(菌液接种量为8%)和含同等菌量的粒径为1mm的固定化微生物(在最优操作条件下制备)分别置于氯苯初始浓度为80mg/L,pH值为7.0左右的模拟地下水中,于10℃条件下进行振荡培养24h。比较不同摇床转速条件下固定化微生物和游离微生物的氯苯降解情况,结果如图4所示。

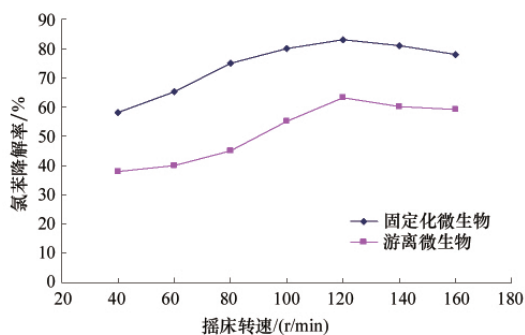


图4 摇床转速对两种微生物降解氯苯的影响

Fig. 4 Effect of shaking table revolution on CB removal

在实验室条件下,一般采用摇床为废水提供好氧状态,在一定范围内,摇床转速表征供氧速度。摇床的转速间接影响废水中溶解氧大小,并且影响微生物絮体的生长情况。由图4可以看出,当摇床转速为120r/min时,两种微生物对氯苯的降解效率较高。

### 2.6 NaCl浓度对两种微生物降解氯苯的影响

为研究盐度对游离微生物和固定化微生物降解氯苯能力的影响,实验对含有NaCl浓度分别为0.5%,1.0%,1.5%,2.0%,2.5%,3.0%的氯苯废水进行研究。将游离微生物(菌液接种量为8%)和含同等菌量的粒径为1mm的固定化微生物(在最优操作条件下制备)分别置于氯苯初始浓度为80mg/L的模拟地下水中,于10℃,pH值为7.0左右,120r/min条件下进行振荡培养24h。比较不同NaCl浓度条件下固定化微生物和游离微生物的氯苯降解情况,结果如图5所示。

由图5可以看出,盐度对游离微生物降解氯苯的抑制效

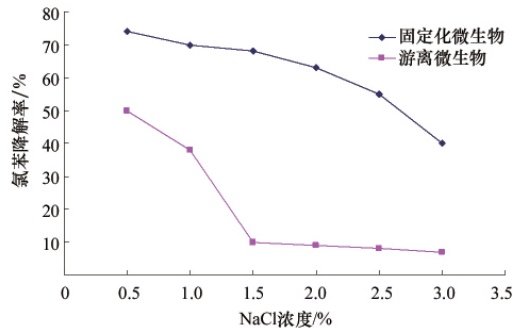


图5 NaCl浓度对两种微生物降解氯苯的影响

Fig. 5 Effect of NaCl concentration on CB removal

果较大。与之相比,经固定化后的微生物还能保持较高的氯苯降解率。

### 2.7 固定化小球粒径对降解氯苯的影响

将含同等菌量的粒径分别为4,2,1mm的3种固定化微生物(在最优操作条件下制备)分别置于pH值为7.0,氯苯浓度为80mg/L的模拟地下水中,于10℃,120r/min条件下进行摇床振荡培养32h。对比3种固定化微生物对氯苯降解情况,结果如图6所示。

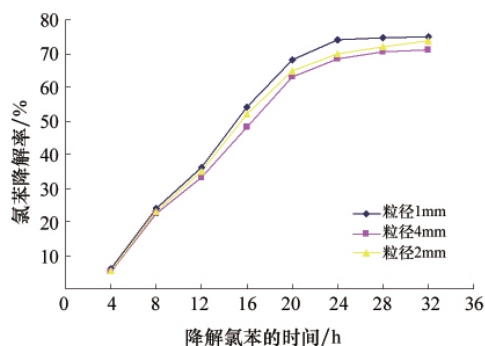


图6 固定化小球粒径对降解氯苯的比较

Fig. 6 Effect of diameter of the bead on CB removal

由图6可以看出,氯苯降解效率随着粒径的减小而升高。固定化小球的粒径越小,传质性能越好,越有利于载体固定化细胞的生长,即氯苯降解率也越大。

### 2.8 固定化微生物与游离微生物降解氯苯的比较

将游离微生物(菌液接种量为8%)和含同等菌量的粒径为1mm的固定化微生物(在最优操作条件下制备)分别置于pH值为7.0左右的含氯苯为80mg/L的模拟地下水中,于10℃,120r/min条件下进行振荡培养32h。比较两种微生物对氯苯降解情况,结果如图7所示。

由图7可以看出,固定化微生物对氯苯的降解效果好于游离微生物。当反应时间少于24h时,随着时间的延长两种微生物对氯苯的降解率提高幅度较大,当超过24h后,降解率不再有显著提高,所以在后续实验中设定摇床振荡培养的时间为24h。

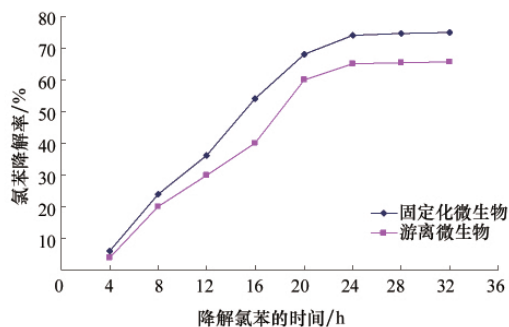


图7 固定化微生物与游离微生物降解氯苯的比较

Fig. 7 A comparison of the CB removal between immobilized and free microorganism

### 3 讨论

#### 3.1 氯苯初始浓度对两种微生物降解氯苯的影响

本实验结果表明,氯苯的降解率随着其初始浓度的提高而下降。根据前人的研究<sup>[11-12]</sup>结论,氯苯浓度高于10mg/L时,已经对微生物活性产生抑制作用。本实验采用的最低初始浓度为20mg/L,因此固定化微生物对氯苯的降解率始终高于游离微生物的。处于固定化状态的微生物受到载体的保护作用,可以耐受较高的氯苯浓度,有利于微生物生长。

#### 3.2 pH值对两种微生物降解氯苯的影响

本研究表明,降解氯苯的微生物适应在pH值为7.0~9.0的范围内。同时还可以看出在各个pH范围内,固定化微生物的降解率要高于游离微生物的,这主要是因为固定化载体的屏蔽和保护作用。

#### 3.3 NaCl浓度对两种微生物降解氯苯的影响

本文结果还表明,地下水中盐度突然升高会导致游离微生物去除有机物的能力下降,这可能是因为盐度过高会破坏细胞的运输系统或造成某些酶类失活,但固定化能提高微生物对盐度变化的耐受能力,这主要是由于固定化载体对其的保护和屏蔽作用。

#### 3.4 固定化小球粒径对降解氯苯的影响

本研究认为,小球粒径越小,氯苯降解率越大。小球粒径越小,传质性能越好,越有利于载体固定化细胞的生长。同时粒径越小的球在含水层中越易于迁移,越有利于降解氯苯。但小球粒径太小,不能包埋足够微生物而导致小球活性降低<sup>[13]</sup>。局限于实验条件,本实验的固定化小球采用的粒径为1mm。

#### 3.5 固定化微生物与游离微生物降解氯苯的比较

本研究结果表明,固定化微生物对氯苯的降解效率好于游离微生物,这与陶凌燕等<sup>[14]</sup>结论一致,一方面固定化载体内部具有较大孔隙度,有利于微生物利用氯苯进行增殖,另一方面是因为固定化载体保护了其中的微生物,减少了周围环境对微生物的毒害作用,从而增强微生物抵抗毒性的能力。在以上两因素作用下,固定化微生物的降解效果得到了优化。

### 4 结论

(1) 采用包埋固定化后的微生物处理地下水中的氯苯是

可行的,并且降解效果好于游离微生物降解氯苯。

(2) 通过正交实验确定了降解氯苯的固定化小球制备最优条件是:PVA 80g/L,海藻酸钠 1.0%,CaCl<sub>2</sub> 1.0%,包埋剂与菌液体积比 25:1。

(3) 氯苯为 80mg/L 时,当固定化微生物小球的粒径为 1mm,菌液接种量为 8%,pH 值为 7.0 左右,控制盐度低于 1.5%,在摇床温度为 10℃,转速为 120r/min 的条件下进行振荡培养 24h 时,氯苯的降解效果较好。

### 参考文献 (References)

- [1] 舒月红,贾晓珊. CTMAB-膨润土从水中吸附氯苯类化合物的机理——吸附动力学与热力学[J]. 环境科学学报, 2005, 25(11): 1530-1536. Shu Yuehong, Jia Xiaoshan. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2005, 25(11): 1530-1536.
- [2] Haley J L, Hanson B, Enfield C, *et al.* Evaluating the effectiveness of groundwater extraction systems [J]. *Groundwater Monit Rev*, 1991, 11(1): 119-124.
- [3] Skeen R S, Luttrell S P, Brouns T M, *et al.* 1993. In-situ bioremediation of Hanford groundwater[J]. *Remediation Journal*, 1993, 3(3): 353-367.
- [4] Saaty R P, Showalter W E, Booth S R. Cost effectiveness of in situ bioremediation at Savannah river[C]/Hinchee R E, Leeson A, Semprini L. ed. *Bioremediation of Chlorinated Solvents*. Columbus: Battelle Press, 1995: 289-295.
- [5] 高宝玉,岳钦艳. 固定化细胞在废水处理中的应用[J]. 山东环境, 1999, 89(2): 3-5. Gao Baoyu, Yue Qingyan. *Shandong Environment*, 1999, 89(2): 3-5.
- [6] Ansezmo A M, Mateus M, Cabral J M S, *et al.* Degradation of phenol by immobilized cells of *Fusarium flocciferum* [J]. *Biotechnol Lett*, 1985, 7(12): 889-894.
- [7] O'Reilly K T, Crawford R L. Degradation of pentachlorophenol by polyurethane-immobilized flavobacterium cells[J]. *Appl Environ Microbiol*, 1991, 55(9): 2113-2118.
- [8] Fersch H A, Loidl M, Ditzelmüller G, *et al.* Continuous degradation of 3-chloroaniline by calcium-alginate-entrapped cells of *Pseudomonas acidovorans* CA28: Influence of additional substrates [J]. *Appl Microbiol Biotechnol*, 1991, 35(4): 544-550.
- [9] 王里奥,崔志强,袁辉,等. 固定化微生物处理甲醇废水的包埋条件优化选择[J]. 重庆大学学报: 自然科学版, 2005, 28(6): 113-117. Wang Li'ao, Cui Zhiqiang, Yuan Hui, *et al.* *Journal of Chongqing University: Natural Science Edition*, 2005, 28(6): 113-117.
- [10] 郎兴华,王瑾,郭平,等. 固定化细菌吸附铅和镉最佳包埋条件的确定[J]. 环境保护科学, 2007, 33(4): 107-109, 117. Lang Xinghua, Wang Jin, Guo Ping, *et al.* *Environmental Protection Science*, 2007, 33(4): 107-109, 117.
- [11] 王永强,毕贵芹,张洪林,等. 氯苯降解菌的筛选及其降解特性的研究[J]. 工业用水与废水, 2003, 34(6): 35-36. Wang Yongqiang, Bi Guiqin, Zhang Honglin, *et al.* *Industrial Water & Wastewater*, 2003, 34(6): 35-36.
- [12] 温钢. 氯苯降解菌的筛选及降解条件研究 [J]. 氨基酸和生物资源, 2009, 31(2): 1-3, 8. Wen Gang. *Amino Acids & Biotic Resources*, 2009, 31(2): 1-3, 8.
- [13] Moslemy P, Neufeld R J, Millette D, *et al.* Transport of gellan gum microbeads through sand: An experimental evaluation for encapsulated cell bioaugmentation [J]. *Journal of Environmental Management*, 2003, 69(3): 249-259.
- [14] 陶凌燕,蔡文祥,吴静,等. 固定化微生物法处理对氯苯酚废水的研究[J]. 环境污染与防治, 2007, 29(9): 701-703. Tao Lingyan, Cai Wenxiang, Wu Jing, *et al.* *Environmental Pollution & Control*, 2007, 29(9): 701-703.

(责任编辑 吴晓丽)