

6 种挥发性有机物在甲苯驯化微生物中的好氧生物降解性能

张鹤清, 胡洪营*, 席劲瑛(清华大学环境科学与工程系环境模拟与污染控制国家重点联合实验室, 北京 100084)

摘要: 利用振荡摇瓶法测定了 6 种典型挥发性有机物, 甲苯、邻二甲苯、间二甲苯、对二甲苯、苯和氯苯在甲苯驯化微生物中的好氧生物降解性能。结果表明, 在本研究的液相浓度范围内(甲苯 $< 174 \text{ mg/L}$, 邻二甲苯 $< 149 \text{ mg/L}$, 间二甲苯 $< 129 \text{ mg/L}$, 对二甲苯 $< 133 \text{ mg/L}$, 苯 $< 234 \text{ mg/L}$, 氯苯 $< 146 \text{ mg/L}$), 3 种二甲苯、苯和氯苯的降解速率随其初始浓度的增大而增加, 符合一级反应, 这 5 种 VOCs 未对微生物产生明显的抑制或毒害作用; 甲苯的液相浓度大于 85 mg/L 时, 其降解速率不随初始浓度的增大而改变, 其降解规律符合 Monod 方程。

关键词: 挥发性有机物(VOCs); 好氧生物降解; 甲苯; 苯; 二甲苯; 氯苯

中图分类号: X131 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2003)06-07-0083

Aerobic Biodegradation Performance of Six Volatile Organic Compounds by Activated Sludge Acclimated with Toluene

Zhang Heqing, Hu Hongying, Xi Jinying(State Key Joint Laboratory of Environment Simulation and Pollution Control, Department of Environmental Science and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: The degradation performance of six volatile organic compounds (VOCs), toluene, α -xylene, m -xylene, p -xylene, benzene and chlorobenzene by activated sludge acclimated with toluene were studied. The experimental results showed that the biodegradation rates of α -xylene, m -xylene, p -xylene, benzene and chlorobenzene increased with increasing of their initial liquid concentration; when concentrations of α -xylene, m -xylene, p -xylene, benzene and chlorobenzene were less than 149 mg/L , 129 mg/L , 133 mg/L , 234 mg/L and 146 mg/L respectively, neither of them brought any notable inhibition or poisonous effects on microbes, and their aerobic biodegradation accorded with first-order reaction. When concentrations of toluene were more than 85 mg/L , its biodegradation rate didn't increase with increasing of its initial liquid concentration and the biodegradation of toluene accorded with the Monod equation.

Key words: volatile organic compounds; aerobic biodegradation; toluene; benzene; xylene; chlorobenzene

挥发性有机物(Volatile Organic Compounds: VOCs)是包含许多脂肪族和芳香族有机物的一类较难处理的有机物。在化工产品的生产和储运过程中以及大部分涉及有机溶剂的使用过程中都会产生大量的 VOCs, 日常的交通工具和污染物处理过程也会产生 VOCs。VOCs 对人体的危害较大, 一些物质具有“三致”效应^[1, 2], 所以一直以来 VOCs 的处理处置方法都是国际上的研究热点之一。生物法处理 VOCs 由于设备简单、运行费用低及无二次污染等优点, 已经成为一项主要的 VOCs 处理技术^[3]。由于大部分挥发性有机物属于难降解有机物, 所以探讨生物处理技术的前提之一就是对其生物降解性能进行较为系统的研究。

关于 VOCs 的生物降解性能评价, 国内外

均有一定研究。对于甲苯类同系物国外在 80 年代末期就有人开始关注, 但微生物主要是提取于特定环境的纯菌种或是天然条件下的菌种混合物; 国内关于 VOCs 生物降解性能的研究起步较晚, 主要开始于 1995 年之后, 受试有机物的选择多以氯代芳香化合物、苯酚及杂环化合物为主。

根据以往的研究和相关的污染源调查报告, 可见在实际排放的 VOCs 中, 苯系物的浓度高且往往占有较大比例, 是一类主要的污染源, 所以有必要对几种典型的苯系物进行详细研

基金项目: 清华大学 985 支持项目

作者简介: 张鹤清(1978-), 女, 硕士研究生。

收稿日期: 2003-02-25; 修订日期: 2003-06-06

* 通讯作者

究.高浓度的 VOCs 对微生物是否会产生相应的抑制或毒害作用,是影响 VOCs 混合物降解性能的重要因素之一;同时,分析高浓度下 VOCs 的降解性能也可以为实际工程中的设计和处理提供相应依据.本文主要考察了甲苯、邻二甲苯、间二甲苯、对二甲苯、苯和氯苯 6 种典型 VOCs 在甲苯驯化污泥中的降解性能.

1 实验方法

1.1 活性污泥的驯化

活性污泥种泥取自燕山石化污水处理厂,采用活性污泥反应器用甲苯气体驯化 30d 以上.甲苯气体连续进入反应器,每隔 48h 停止曝气,静置 2~3h 后排去上清液,加入营养液,如此循环.反应器内污泥浓度 6g/L 左右(以 SS 计,下同),DO 值为 6 mg/L, pH 值为 6~8.驯化初期以葡萄糖作为唯一碳源, COD=300 mg/L, 并加入 N、P、Mg、Ca、Fe 等营养元素,使 C:N:P=100:5:1.随着驯化天数的增加,逐渐减少葡萄糖的进样量,增加甲苯气体的流量,最终甲苯气体的浓度为 0.5 mg/L.

实验前测定活性污泥反应器内的污泥浓度,空曝 1h 去除残余甲苯,备用.

1.2 生物降解实验

VOCs 的生物降解实验采用摇瓶法^[4~6],所用密闭式摇瓶如图 1 所示,摇瓶主体的材料是玻璃,封口塞的材料是橡胶.通过估算 6 种 VOCs 的完全氧化需氧量,并参照 VOCs 的溶解度等参数(见表 1)确定实验所用摇瓶的体积,保证其气相部分含氧量大于完全氧化需氧量的 90%,以满足好氧生物降解的基本条件.每组实验均做 2 个平行样,计算结果为 2 组平行样的平均值,具体操作步骤如下:

依照营养液配方表(见表 2),往摇瓶中加入一定量的营养储备液;将一定量甲苯驯化的污泥加入摇瓶中,使摇瓶内污泥浓度为 500 mg/L;将去离子水加入到摇瓶中,使摇瓶内的溶液达到 100 mL;密闭摇瓶,用液体微量进样器加入待测的液态 VOCs,放入 25℃、130r/min 的全温立式振荡器(哈尔滨东联电子技术开发有限公司)中开始反应,定时测定气相中 VOCs 的

浓度.

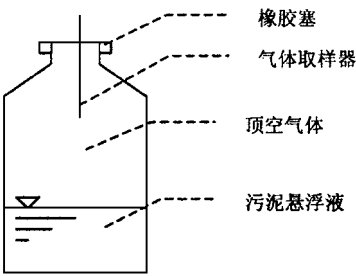


图 1 试验用密闭式摇瓶

Fig.1 Reaction system made of glass bottles with Teflon caps

表 1 6 种 VOCs 的物理参数(25℃)^[7,8]

物质	Table 1 Parameters of VOCs(25℃)			
	分子量/ g·mol ⁻¹	密度/ g·mL ⁻¹	溶解度/ mg·L ⁻¹	亨利系数
甲苯	92.13	0.8669	534.8	0.2602
邻二甲苯	106.17	0.876	220.8	0.1712
间二甲苯	106.17	0.861	174	0.2772
对二甲苯	106.17	0.858	201.7	0.2517
苯	78.11	0.8765	1780	0.2269
氯苯	112.61	1.106	200	0.1853

表 2 生物降解实验的营养液配方

Table 2 Nutrient solution of biodegradation experiments

营养物质	浓度/ mg·L ⁻¹
NH ₄ Cl	1000
KH ₂ PO ₄	1000
MgSO ₄ ·7H ₂ O	200
FeSO ₄ ·7H ₂ O	10
CaCl ₂	10
MnSO ₄ , CuSO ₄ , ZnSO ₄ CoCl ₂ , Na ₂ MoO ₄ ·2H ₂ O	各 0.5

1.3 分析方法

(1) VOCs 用气体微量取样器(ITO MICRO SYRINGE)从摇瓶中抽取 50μL 的顶空气体,其中 VOCs 的浓度用气相色谱仪(岛津公司)测定,检测器为氢火焰离子化检测器,分离柱为 0.25 mm I. D. × 30 mL 的毛细管柱.测定条件为:毛细管柱温 100℃.进样室温度 150℃、检测器温度 150℃.

(2) 污泥浓度 用悬浮固体浓度表征污泥的浓度,具体测定方法如下:取定性滤纸一张,打湿后放入称量瓶中,用烘箱烘干至恒重;取一定体积的污泥悬浊液用该定性滤纸过滤后,放

入称量瓶中,在 105 ℃干燥箱内烘干至恒重. $SS [mg/L] = (烘干后总重 - 烘干前总重) / 污泥体积$.

2 结果与讨论

2.1 摇瓶密闭性和污泥吸附影响的对照试验

在研究 VOCs 的生物降解性能之前,首先要对实验体系的可靠性进行验证.就具体的摇瓶试验来讲,由于测定的是挥发性有机物,所以对摇瓶的密闭性有较高要求.此外,污泥吸附有机物对生物降解造成影响的大小也需要通过试验确定.

为此,设计了 3 组对照实验,同时测定摇瓶的密闭性能.污泥的吸附量和污泥的降解量,以甲苯为受试 VOCs,所用污泥都是甲苯驯化的活性污泥($SS = 500 mg/L$).在检测摇瓶密闭性的实验中,摇瓶中只加入定量的无机盐和 VOCs,用去离子水稀释到液相体积为 100 mL;在判定污泥吸附作用的实验中,摇瓶中加入定量的高压灭菌后污泥、无机盐和 VOCs,用去离子水稀释到 100 mL;在污泥的生物降解实验中,如前所述,摇瓶中加入定量甲苯驯化的污泥、无机盐和 VOCs,同样用去离子水稀释到 100 mL.

图 2 ~ 4 分别为甲苯液相初始浓度为 5.2 mg/L、20.8 mg/L、51.9 mg/L 时的 3 组对照实验结果.图中,曲线 1) 为不加活性污泥时摇瓶内甲苯的气相浓度随时间的变化曲线,曲线 2) 为活性污泥高压灭菌后摇瓶内甲苯气相浓度变化曲线,曲线 3) 为甲苯在甲苯驯化污泥中的降解曲线.

从图 2 ~ 4 可见: ①在甲苯由低到高的 3 个浓度范围内,3 条曲线的共同规律是:曲线 1) 和曲线 2) 中,甲苯的气相浓度随反应时间缓慢降低,在测定时间范围内减少的量值可以忽略不计.曲线 3) 中由于甲苯驯化微生物的降解作用,气相甲苯浓度随反应时间迅速减少,甲苯作为唯一碳源在较短时间内全部降解. ②本研究中所用的摇瓶具有良好的密闭性能,摇瓶泄漏或瓶身吸附的 VOCs 量值可以忽略不计.另外,污泥絮体在降解过程中对于 VOCs 的吸附作为也可以忽略不计.所以,本试验中摇瓶所测得的

VOCs 浓度随时间变化的降解曲线可以较为客观地反应生物降解作用.

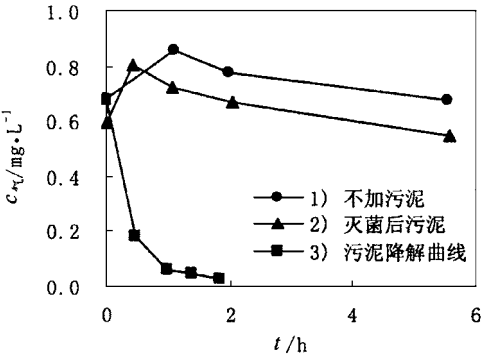


图 2 甲苯初始浓度为 5.2 mg/L 时的 3 组对照曲线

Fig. 2 Control experiment results when toluene's concentration is 5.2 mg/L

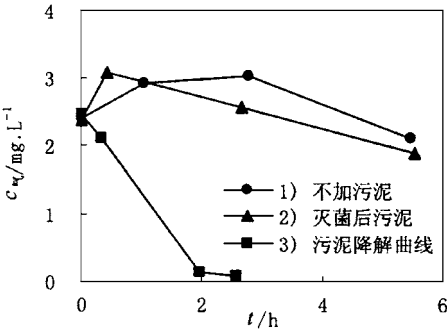


图 3 甲苯初始浓度为 20.8 mg/L 时的 3 组对照曲线

Fig. 3 Control experiment results when toluene's concentration is 20.8 mg/L

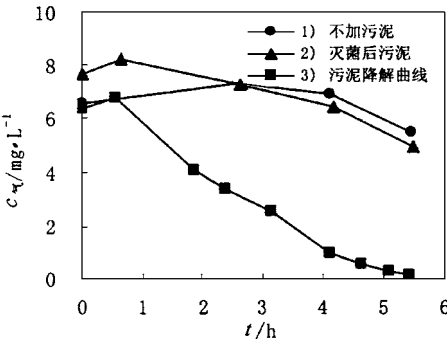


图 4 甲苯初始浓度为 51.9 mg/L 的 3 组对照曲线

Fig. 4 Control experiment results when toluene's concentration is 51.9 mg/L

2.2 6 种 VOCs 在甲苯驯化污泥中的降解性能 (1) 甲苯在甲苯驯化污泥中的降解曲线

图 5 为 甲苯在 5 种液相初始浓度 (26.3 mg/L、

65.8 mg/L、86.9 mg/L、130.4 mg/L、173.8 mg/L) 下的气相浓度随反应时间的变化曲线。由降解曲线可见,随着甲苯初始浓度的增加,反应时间也相应增长。可以定性判断出:当液相初始浓度大于 86.9 mg/L 时,甲苯的降解速率不再随液相浓度的增加而增大,而是在一个固定数值附近波动。

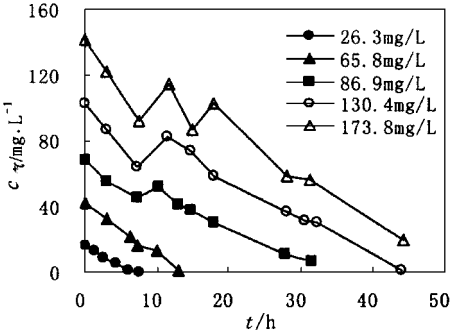


图 5 不同浓度甲苯在甲苯驯化污泥中的降解曲线
Fig.5 Biodegradation curves of toluene at various initial concentrations

(2) 邻二甲苯在甲苯驯化污泥中的降解曲线 图 6 为邻二甲苯在 6 种液相初始浓度 (14.9 mg/L、37.2 mg/L、74.5 mg/L、111.7 mg/L、134.7 mg/L、149.0 mg/L) 下的气相浓度随反应时间的变化曲线。当邻二甲苯浓度较低 (14.9 mg/L、37.2 mg/L) 时,从 $t = 0\text{h}$ 时刻就基本进入生物降解期,气相浓度不断降低;当初始液相浓度高于 74.5 mg/L 时,在反应开始后的 0 ~ 3h 内,邻二甲苯的气相浓度有所增加,之后才逐渐降低,此阶段称为迟滞期,这可认为是高浓度的 VOCs 在进入反应器的初期存在吸附、溶解、挥发的气液固三相转换的平衡,迟滞期之后主要是液相的微生物发挥生物降解的作用。在对 VOCs 的降解性能进行动力学等相关分析时,应该排除迟滞期阶段,从生物降解阶段开始分析。

(3) 间二甲苯在甲苯驯化污泥中的降解曲线 图 7 为间二甲苯在 5 种液相初始浓度 (12.9 mg/L、32.2 mg/L、64.3 mg/L、96.5 mg/L、128.7 mg/L) 下的气相浓度随反应时间的变化曲线。

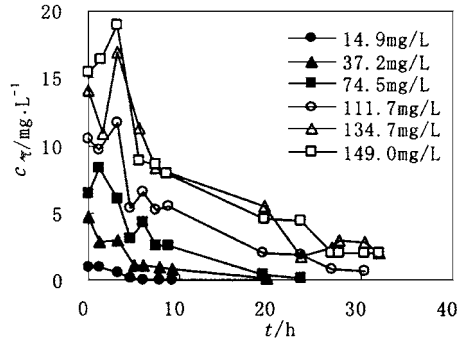


图 6 不同浓度邻二甲苯在甲苯驯化污泥中的降解曲线
Fig.6 Biodegradation curves of o-xylene at various initial concentrations

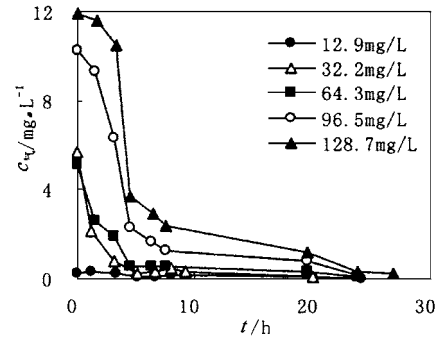


图 7 不同浓度间二甲苯在甲苯驯化污泥中的降解曲线
Fig.7 Biodegradation curves of m-xylene at various initial concentrations

(4) 对二甲苯在甲苯驯化污泥中的降解曲线 图 8 为对二甲苯在 6 种液相初始浓度 (13.3 mg/L、33.2 mg/L、66.5 mg/L、99.8 mg/L、110.7 mg/L、133.0 mg/L) 下的气相浓度随反应时间的变化曲线。

(5) 苯在甲苯驯化污泥中的降解曲线 图 9 为苯在 4 种初始浓度 (27.5 mg/L、68.8 mg/L、93.7 mg/L、234.2 mg/L) 下的气相浓度随反应时间的变化曲线。

(6) 氯苯在甲苯驯化污泥中的降解曲线 图 10 为氯苯在 4 种初始浓度 (29.2 mg/L、73.0 mg/L、109.4 mg/L、145.9 mg/L) 下的气相浓度随反应时间的变化曲线。

2.3 6 种 VOCs 的降解速率综合比较

为综合比较 6 种 VOCs 在甲苯驯化污泥中的降解性能,定量描述 VOCs 的浓度对降解性

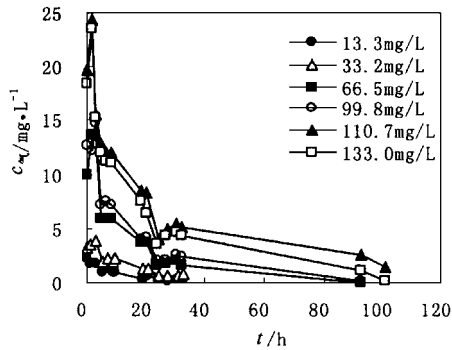


图 8 不同浓度对二甲苯在甲苯驯化污泥中的降解曲线

Fig.8 Biodegradation curves of p-xylene at various initial concentrations

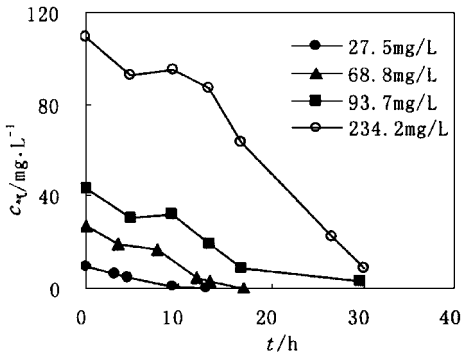


图 9 不同浓度苯在甲苯驯化污泥中的降解曲线

Fig.9 Biodegradation curves of benzene at various initial concentrations

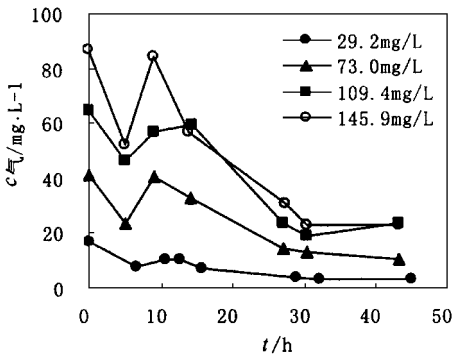


图 10 不同浓度氯苯在甲苯驯化污泥中的降解曲线

Fig.10 Biodegradation curves of chlorobenzene at various initial concentrations

能的影响,以下根据迟滞期之后的降解曲线计算出了 VOCs 的初始反应速率(见(1)式),计算

方法^[9-12]如下所示:

假定,摇瓶中气液两相的 VOCs 浓度遵守亨利定律: $c_g = H \cdot c_l$

则,有机物的比生物降解速率 $v [h^{-1}]$ (即液相反应速率)为:

$$v = - \frac{d m}{X \cdot V_l \cdot dt} = - \frac{d (c_g V_g + c_l V_l)}{X \cdot V_l \cdot dt}$$
$$= - \left[\frac{N}{X} + \frac{1}{H \cdot X} \right] \frac{dc_g}{dt} \quad (1)$$

同时,对于 n 级的基元反应:

$$v = k_l \cdot c_l^n = k_g \cdot c_g^n \quad (2)$$

其中, v : 比生物降解速率, h^{-1} ; m : VOCs 的质量, mg ; X : 污泥浓度(以 SS 计), mg/L ; c_g : 气相 VOCs 的浓度, mg/L ; c_l : 液相 VOCs 的浓度, mg/L ; V_g : 摇瓶中气相部分的体积, L ; V_l : 摇瓶中液相部分的体积, L ; t : 生物反应时间, h ; k_l : 液相反应速率常数, $L^n/(h \cdot mg^n)$; k_g : 以气相浓度表征的反应速率常数, $L^n/(h \cdot mg^n)$; n : 反应级数; H : 亨利系数; N : V_g/V_l .

根据以上方法分别计算出 6 种 VOCs 在不同浓度时的初始反应速率,计算结果为 2 组平行样的平均值.并分别作出这 6 种 VOCs 的初始反应速率与初始液相浓度的关系曲线,如图 11~16 所示.由图 11~16 可见:

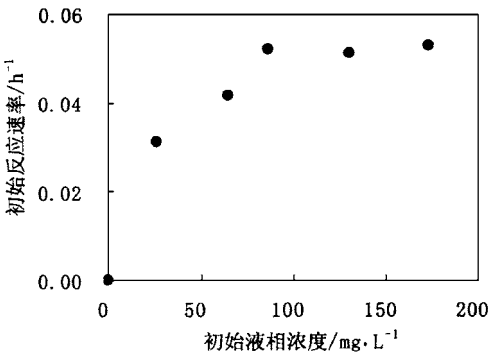


图 11 甲苯的初始反应速度随液相浓度的变化关系

Fig.11 Relationship between initial biodegradation rate and liquid concentration of toluene

(1) 当甲苯的液相浓度小于 $85 mg/L$ 左右时,其降解速率与液相浓度基本上成正比关系,随着甲苯液相浓度的增大,降解速率不再增加,而是呈现一个不随浓度变化的平台,可见在试

验浓度范围内,甲苯的降解规律符合 Monod 方程^[10],即 $v = \frac{v_{\max} c_l}{K_S + c_l}$. 由 $\frac{1}{v} - \frac{1}{c_l}$ 曲线(见图 17)可求出甲苯的基本动力学常数:

$v_{\max} = 6.18 \times 10^{-12} \text{ h}^{-1}$; $K_S = 25.94 \text{ mg/L}$.

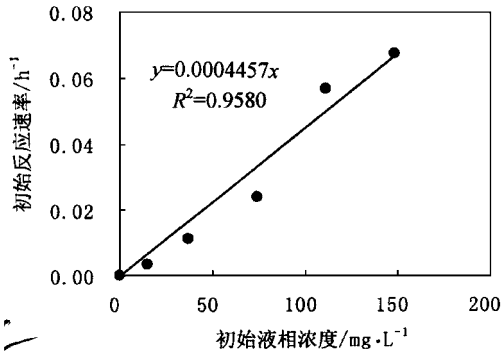


图 12 邻二甲苯的初始反应速率随液相浓度的变化关系

Fig.12 Relationship between initial biodegradation rate and liquid concentration of o-xylene

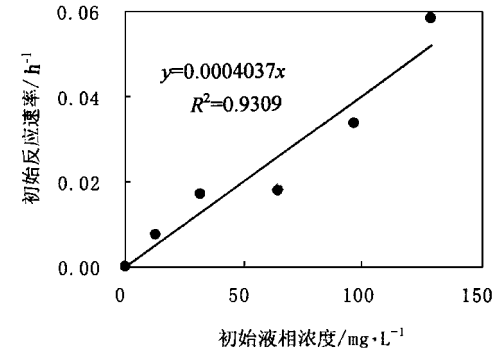


图 13 间二甲苯的初始反应速率随液相浓度的变化关系

Fig.13 Relationship between initial biodegradation rate and liquid concentration of m-xylene

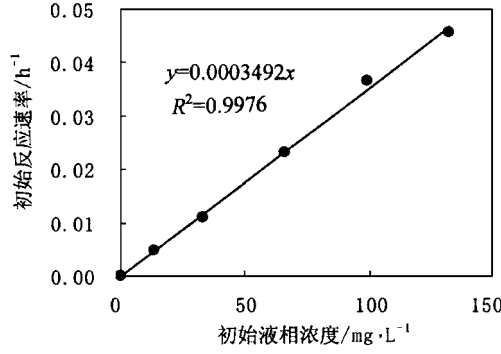


图 14 对二甲苯的初始反应速率随液相浓度的变化关系

Fig.14 Relationship between initial biodegradation rate and liquid concentration of p-xylene

(2) 邻二甲苯、间二甲苯、对二甲苯、苯和氯苯这 5 种 VOCs,在试验浓度范围内,降解速率都与各自的液相浓度成正比关系,符合一级反应.通过对图 12~16 中曲线的拟合(相关系数均大于 0.96),可求出比例系数,即这 5 种 VOCs 的一级反应速率常数.已有文献报道过用氯苯驯化的污泥降解一些氯代芳香烃时,VOCs 的降解规律也符合一级反应^[13,14].

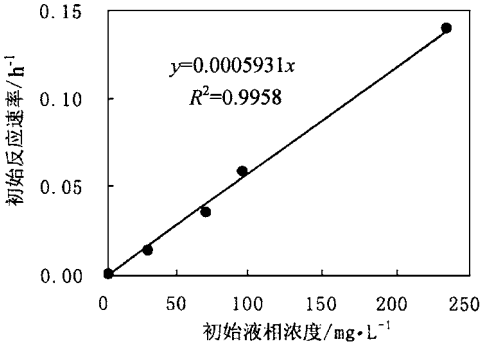


图 15 苯的初始反应速率随液相浓度的变化关系

Fig.15 Relationship between initial biodegradation rate and liquid concentration of benzene

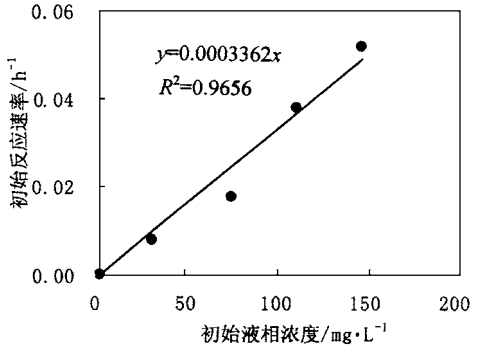


图 16 氯苯的初始反应速率随液相浓度的变化关系

Fig.16 Relationship between initial biodegradation rate and liquid concentration of chlorobenzene

(3) 表 3 列出了 6 种 VOCs 在甲苯驯化污泥中的降解规律和动力学常数.由表 3 可见,在试验浓度范围内,符合一级反应的 5 种 VOCs 的一级反应速率常数的大小关系为:苯>邻二甲苯>间二甲苯>对二甲苯>氯苯.

(4) 对比图 11 和图 12~16,可见当 VOCs 的浓度小于 50 mg/L 时,6 种 VOCs 中甲苯的降解速率是最快的.当甲苯的液相浓度高于

表 3 6 种 VOCs 的降解规律及动力学常数
Table 3 Kinetic results of biodegradation

VOCs 名称	降解规律	动力学常数
甲苯	Monod: $v = \frac{v_{\max} c_l}{K_S + c_l}$	$v_{\max, \text{Tol}} = 6.18 \times 10^{-2} \text{ h}^{-1}$, $K_{S, \text{Tol}} = 25.94 \text{ mg/L}$
邻二甲苯	一级: $v = k_1 c_l$	$k_{1, \text{o-Xyl}} = 4.457 \times 10^{-3} \text{ L/(h} \cdot \text{mg)}$
间二甲苯	一级: $v = k_1 c_l$	$k_{1, \text{m-Xyl}} = 4.037 \times 10^{-3} \text{ L/(h} \cdot \text{mg)}$
对二甲苯	一级: $v = k_1 c_l$	$k_{1, \text{p-Xyl}} = 3.492 \times 10^{-3} \text{ L/(h} \cdot \text{mg)}$
苯	一级: $v = k_1 c_l$	$k_{1, \text{Ben}} = 5.931 \times 10^{-3} \text{ L/(h} \cdot \text{mg)}$
氯苯	一级: $v = k_1 c_l$	$k_{1, \text{Cf-Ben}} = 3.362 \times 10^{-3} \text{ L/(h} \cdot \text{mg)}$

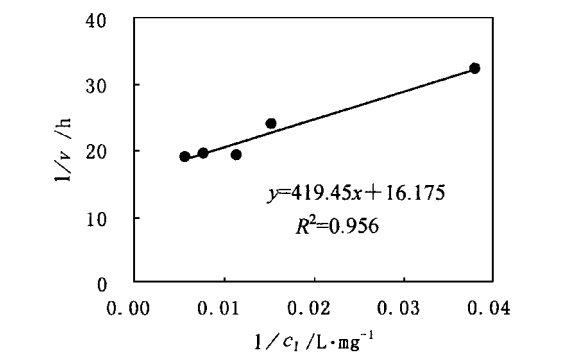


图 17 甲苯的初始反应速率与液相浓度的倒数关系曲线
Fig.17 Reciprocal relationship between the initial biodegradation rate and liquid concentration of toluene

85 mg/L 左右时,其降解速率不再增加,说明高浓度的甲苯对微生物产生了一定的毒害或抑制作用;而在试验浓度范围内,3 种二甲苯、苯和氯苯的降解速率分别随其浓度的增加而增加,没有对甲苯驯化的微生物产生毒害或抑制作用。

3 结论

- (1) 研究结果表明,甲苯驯化的污泥亦可有效降解邻二甲苯、间二甲苯、对二甲苯、苯和氯苯。
- (2) 在甲苯的液相浓度小于 174 mg/L 的范围内,其生物降解规律符合 Monod 方程。当邻二甲苯、间二甲苯、对二甲苯、苯和氯苯的液相浓度分别小于 149 mg/L、129 mg/L、133 mg/L、234 mg/L 及 146 mg/L 时,这 5 种 VOCs 的生物降解均符合一级反应。
- (3) 3 种二甲苯、苯和氯苯的一级反应速率常数大小关系为:苯 > 邻二甲苯 > 间二甲苯 > 对二甲苯 > 氯苯。

(4) 当液相浓度小于 50 mg/L 时,甲苯驯化的污泥降解 6 种 VOCs 的速率由大到小排序为:甲苯 > 苯 > 邻二甲苯 > 间二甲苯 > 对二甲苯 > 氯苯。

参考文献:

- 1 山根靖弘等编著. 环境污染物质与毒性. 成都:四川科学技术出版社, 1985. 20 ~ 37.
- 2 周文敏等. 环境优先污染物. 北京:中国环境科学出版社, 1989. 1 ~ 15.
- 3 李国文,胡洪营,郝吉明,张鹤清. 生物炭降解苯和甲苯混合废气性能研究. 环境科学, 2002, 23(5): 13 ~ 17.
- 4 Bielefeldt A R, Stensel H D. Evaluation of Biodegradation Kinetic Testing Methods and Longterm Variability in Biokinetics for BTEX Metabolism. Water Research, 1999, 33 (3): 734 ~ 740.
- 5 Young-Sook Oh, Zarook Sharrefdeen, Basil C Baltzis, Richard Bartha. Interaction between Benzene, Toluene, and p Xylene during their Biodegradation. Biotechnology and Bioengineering, 1994, 44: 533 ~ 538.
- 6 Pedro J J Alvarez, Timothy M Vogel. Substrate Interactions of Benzene, Toluene, and p Xylene during Microbial Degradation by Pure Cultures and Mixed Culture Aquifer Slurries. Applied and Environmental Microbiology, 1991. 2981 ~ 2985.
- 7 Carl Yaus. Chemical Properties Handbook. 世图出版社, 1999. 189 ~ 206.
- 8 李伯冀. 化学化工实验师手册. 大连:大连理工大学出版社, 1995.
- 9 Myung-Keun Chang, Thomas C Voice, Craig S Criddle. Kinetics of Competitive Inhibition and Cometabolism in the Biodegradation of Benzene, Toluene, and p Xylene by Two Pseudomonas Isolates. Biotechnology and Bioengineering, 1993, 41: 1057 ~ 1065.
- 10 Erik Arvin, Bjorn K Jensen, Anders Torp Gundersen. Substrate Interactions during Aerobic Biodegradation of Benzene. Applied and Environmental Microbiology, 1989. 3221 ~ 3225.
- 11 钱易,汤鸿霄,文湘华. 水体颗粒物和难降解有机物的特性与控制技术原理(下卷). 北京:中国环境科学出版社, 1999. 25 ~ 30.
- 12 Bielefeldt A R, Stensel H D. Modeling Competitive Inhibition Effects during Biodegradation of BTEX Mixtures. Water Research. 1999, 33(3): 707 ~ 714.
- 13 瞿福平,张晓健,何苗,顾厦声. 氯苯驯化活性污泥对同类有机物的好氧降解性比较研究. 环境科学, 1997, 18 (4): 21 ~ 24.
- 14 瞿福平, 张晓健, 何苗, 顾厦声. 氯苯类有机物生物降解性及共代谢作用研究. 中国环境科学, 1997, 17(2): 142 ~ 145.