

不同基质中三氯乙烯的好氧代谢研究

王雪莲¹, 席彩杰², 杨琦¹, 甘小莉¹, 尚海涛¹

(1. 中国地质大学水资源与环境学院, 北京 100083; 2. 北京市地质调查研究院, 北京 102206)

摘 要: 本实验选取了苯酚、苯甲酸、苯、甲苯、氯苯等五种化合物作为活性污泥的驯化基质, 以瓦呼仪作为测试手段, 分析了五种基质在驯化后的活性污泥中的可降解性及三氯乙烯(TCE)在不同基质驯化后的活性污泥中的可生化性, 并用计算出的 12 h 有机物氧化率表征有机物的可生化性难易度。苯酚、苯甲酸、甲苯、苯在 40 mg/L 时的氧化率达到最大值, 分别为 93.71%、64.67%、39.24%、9.15%。氯苯仅在 20 mg/L 时可降解, 氧化率为 46.09%, 据此推断出几种代谢基质的可降解性从易到难的顺序为: 苯酚 > 苯甲酸 > 甲苯 > 苯 > 氯苯。在甲苯、苯酚、苯甲酸、氯苯驯化后的活性污泥中 TCE 在 50 $\mu\text{g/L}$ 时, 其氧化率达到最大值, 分别为 54.14%、33.69%、23.91%、21.11%。在苯驯化后的活性污泥中 TCE 仅在 10 $\mu\text{g/L}$ 时可降解, 氧化率为 13.8%。据此可推断出 TCE 在五种代谢基质中的可生化性从高到低的顺序为: 甲苯 > 苯酚 > 苯甲酸 > 氯苯 > 苯。

关键词: 三氯乙烯(TCE); 可降解性; 瓦呼仪

中图分类号: X131

文献标识码: A

文章编号: 1672-4135(2006)01-0069-07

三氯乙烯(TCE)是一种氯代溶剂, 广泛用于脱脂业、洗染业、金属加工等行业。由于工业中的广泛应用及处置的不当, 使其成为地下水中常见有机污染物^[1]。据报道 1997 年在美国的一次调查中^[2], 1430 处国家级污染场地中就 有 852 处发现有 TCE。TCE 具较高的水溶性, 在土壤和含水层中具较高的流动性, 常常进入到地下水中^[3]。研究^[4]发现在距干洗店较近的地区, 饮用水中 TCE 的含量达到 100 $\mu\text{g/L}$, 土壤中的含量达到 4 000 ~ 5 000 $\mu\text{g/L}$, 远远超过饮用水中的标准(5 $\mu\text{g/L}$)。TCE 是一可疑的致癌物, 对人类的健康造成潜在的威胁。常见去除 TCE 的方法有物理、化学和生物法。物理方法只能将 TCE 从一个地方转移到另外的地方, 不能从环境中将它根本去除; 化学方法虽然处理效率高, 但费用较高; 生物法具有操作简单、易行、处理费用低等特点, 愈来愈受到人们的关注。TCE 的生物降解在厌氧和好氧条件下都能进行^[5], 厌氧降解 TCE 是通过还原脱氯的方式, 好氧降解则是通过共代谢的方式进行^[6]。TCE 的好氧共代谢需要合适的代谢基质(如苯酚、甲苯、葡萄糖、烷基苯、苯胺、苯甲酸盐、氨水

等)参与反应, 以代谢基质为碳源和能源的微生物, 释放出单加氧酶或双加氧酶, 这些酶将 TCE 降解^[7]。国外已有许多学者以芳香族化合物纯菌种作为共代谢基质, 研究了 TCE 的共代谢降解^[8,9], 但目前国内的研究尚处于起步阶段。本实验选取芳香族化合物中五种物质(苯酚、苯甲酸、苯、甲苯、氯苯)作为代谢基质驯化活性污泥, 在好氧条件下用活性污泥法培养出优势菌种降解 TCE, 并用瓦呼仪作为测试手段, 分析不同基质在其驯化后的活性污泥中的降解性, 及 TCE 在不同基质的驯化后的活性污泥中的可生化性, 为以后 TCE 的动力学实验提供必要的理论依据。

1 实验部分

1.1 实验设备

SKW-3 型瓦呼仪(上海科技大学研制生产), LDZX-40CI 型立式自动电热压力蒸汽灭菌器(上海申安医疗器械厂生产), 高速离心机(北京医用离心机厂生产), 磁力搅拌器。

1.2 活性污泥的驯化及制备

活性污泥种泥取自某污水处理厂二次沉淀

收稿日期: 2005-11-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40102027)

作者简介: 王雪莲(1974-), 女, 中国地质大学水资源与环境学院博士研究生, 研究方向为水资源与环境工程,

万方数据

电话: 010-82320174(办), 13520834556; E-mail: xuelianwater@sina.com。

池的好氧活性污泥。取一部分污泥分别装在五个不同的细口瓶中,以苯酚、苯、甲苯、氯苯、苯甲酸等五种基质作为唯一碳源和能源进行驯化。五种物质浓度按从低到高分阶段进行驯化,驯化的最高浓度均为 50 mg/L。驯化时除分别加入一定量的上述物质外,还需加入适量的培养基。培养基由无机盐培养液(表 1)和微量元素溶液(表 2)组成,其中每升无机培养液中加入 1 mL 的微量元素溶液。驯化瓶置于 25 ℃ 的恒温培养箱内,间歇方式进行驯化,水力停留时间 1 天。瓦呼仪试验须将驯化后的活性污泥空曝 24 h,使其中的微生物处于内源代谢阶段,在 3 000 rpm 下离心 10 min,弃其上清液,加入蒸馏水洗涤,在磁力搅拌器上搅拌均匀后再离心,反复三次,最后用 pH = 7 磷酸盐缓冲溶液稀释制成活性污泥悬浊液。

表 1 无机盐培养液组成 I

Table 1 Composition of the nutrition solution

化学组分	浓度 / (mg · L ⁻¹)
Na ₂ CO ₃	100.0
MgSO ₄ · 7H ₂ O	59.3
(NH ₄) ₂ SO ₄	234.0
KH ₂ PO ₄	338.8
Na ₂ HPO ₄ · 12H ₂ O	890.7
CaCl ₂	3.9
FeSO ₄	0.3

表 2 微量元素溶液组成

Table 2 Composition of the trace elements solution

化学组分	浓度 / (mg · L ⁻¹)
FeCl ₂ · 4H ₂ O	1 500
CoCl ₂ · 6H ₂ O	190
MnSO ₄ · 7H ₂ O	100
ZnCl ₂	70
NiCl ₂ · 6H ₂ O	24
Na ₂ MoO ₄ · 2H ₂ O	24
MnCl ₂ · 4H ₂ O	6
CuCl ₂ · 2H ₂ O	2

1.3 分析方法及主要试剂

实验主要试剂 TCE、苯酚、苯、甲苯、氯苯、苯甲酸均为分析纯,磷酸盐缓冲溶液其配制方法参照文献^[10],所需试剂为化学纯。

本实验用瓦呼仪测定微生物耗氧量的方法,通过内源呼吸线和生化呼吸线的变化,反映

出上述五种有机物分别在其驯化后的活性污泥中的降解性能和特点,并判断出五种代谢基质驯化后的活性污泥对 TCE 生化处理的可能性。耗氧量的计算参照文献^[10]。本实验中除苯甲酸外其他四种物质均有一定的挥发性,做瓦呼仪实验时,采用灭菌污泥作为控制样尽量减少其挥发性及污泥吸附的影响。用计算出的生化累积耗氧量减去内源呼吸耗氧量,可得到相对累积耗氧量(相对累积耗氧量为生化累积耗氧量与内源呼吸耗氧量之差)。瓦呼仪实验测试时间为 12 h,根据相对累积耗氧量与理论耗氧量的比值,可求得表征受试物生物氧化程度的参数——12 h 有机物氧化率,其计算公式为:

$$12\text{ h 有机物氧化率} = \frac{12\text{ h 相对累积耗氧量}}{\text{理论耗氧量}} \times 100\%$$

2 实验结果与讨论

2.1 几种不同基质在其驯化后的活性污泥中的可生化性

分别取苯酚、苯、甲苯、氯苯、苯甲酸等五种基质驯化后的活性污泥,按上述方法配成菌悬液。瓦呼仪的工作体积为 3 mL,以加入等量有机物的相邻反应瓶作为一组平行样,反应瓶中所加组分详见表 3。

瓦呼仪批试验苯酚、苯、甲苯、氯苯浓度在 20 ~ 80 mg/L,苯甲酸浓度在 40 ~ 100 mg/L;测试时间为 12 h,不同浓度的苯酚、苯、甲苯、氯苯在其驯化后的活性污泥中累积耗氧量曲线见表 4、图 1。从图 1 可以看出:苯甲酸和苯酚的生化呼吸线均在内源呼吸线之上(图 1a,图 1b),表明两者可生化性相对较好,可以被驯化后的活性污泥利用并将其降解;甲苯、氯苯和苯的可生化性相对降低,表现为有机物浓度低时可被微生物利用,生化呼吸线在内源呼吸线之上(图 1c、d、e);浓度高时则对微生物的活性产生抑制作用,生化呼吸线位于内源呼吸线下方。甲苯浓度在 20 ~ 60 mg/L 均可被降解,浓度达到 80 mg/L 时,表现为对微生物产生抑制作用(图 1c)。苯浓度在 20 ~ 40 mg/L 可微生物被降解,浓度达到 60 mg/L 时,对微生物活性产生抑制作用(图 1e)。氯苯的可生化性最低,浓度仅

在 20 mg/L 时可被微生物降解(图 1d)。从计算出的 12 h 有机物氧化率来看,除氯苯外,其它四种代谢基质苯酚、苯甲酸、甲苯、苯在 40 mg/L 时,其氧化率达到最大值,分别为 93.71%、64.

67%、39.24%、9.15%。氯苯在 20 mg/L 时,氧化率为 46.09%。据此可推断出几种代谢基质的可降解性的从易到难的顺序为:苯酚 > 苯甲酸 > 甲苯 > 苯 > 氯苯。

表 3 各反应瓶中所加组分的对照表

Table 3 Composition of the reaction solution in each reaction bottle

测定项目	反应瓶号	蒸馏水(mL)	营养基(mL)	灭菌污泥	活性污泥	中央小杯	受试物
				悬浊液(mL)	悬浊液(mL)	KOH 溶液(mL)	
温压校正	1,2	3				0.2	不加
内源呼吸	3,4	2			1	0.2	不加
生化呼吸	5,7,9,11		2	1 *		0.2	加
	6,8,10,12		2		1	0.2	加

* 苯甲酸试验不加灭菌污泥,加活性污泥

根据芳香族化合物生物降解的原理,其降解有几个共同的步骤^[11],第一步,化合物通过自由扩散或者其他方式,主要是需要消耗能量的被动形式,如微生物细胞的主动吸收,而进入微生物细胞内;第二步,微生物产生合适的酶,酶在细胞体内与芳香族化合物反应,生成一种中间产物,或者是苯环裂解的前体物;第三步,苯环裂解后前体物在酶的进一步作用下而发生裂解;第四步,苯环裂解后被再转化为其他中间产物;最后,将各种裂解后的中间产物转化为可被微生物细胞所利用的物质,最终代谢为简单的化合物,如 CO₂、CH₄、H₂O。其降解性能与苯环上取代基的性质密切相关。甲基、羧基、羟基等取代基,使苯环上的电子云密度增加,更容易发生亲电子反应,容易被氧化,使得生物降解性能有所改善。而氯苯由于苯环上引入了氯原子,引起了分子特性的大大改变,由于其自身的极性,使苯环上的电子云密度减弱,使苯环的氧化更难。本实验表明可以通过瓦呼仪试验对化合物降解性能进行比较。

2.2 TCE 在几种基质驯化后的活性污泥中的可生化性

经上述批试验可知,几种基质在其驯化后的活性污泥中均发生不同程度的降解。活性污泥驯化的目的主要是选择适合于 TCE 降解的代谢基质,未驯化的活性污泥不能降解 TCE^[9],因此下面的批试验对 TCE 在苯酚、苯甲酸、甲苯、苯、氯苯等代谢基质驯化后的活性污泥中的可生化性进行了研究。测试时间为 12 h,不同浓度的 TCE 在苯酚、苯、甲苯、氯苯驯化后的活

性污泥中累积耗氧量如表 5、图 2 所示。

批试验中受试物 TCE 的浓度为 10 ~ 200 μg/L,批试验的结果存在着一个共性,即 TCE 浓度超高 100 μg/L 时不可降解,并对微生物活性产生抑制作用;TCE 浓度相对较低时可被微生物利用并降解,在 10 ~ 50 μg/L 时,TCE 在苯甲酸、苯酚、甲苯、氯苯等基质驯化后的活性污泥中表现出较好的可生化性(图 2a、b、c、d),但在苯驯化后的活性污泥中 TCE 浓度仅在 10 μg/L 时是可被降解(图 2e)。从计算出的 12 小时 TCE 的氧化率分析,在苯酚、苯甲酸、甲苯、氯苯驯化的活性污泥中 TCE 在 50 μg/L 时,其氧化率达到最大值,分别为 33.69%、23.91%、54.14%、21.11%。在苯驯化后的活性污泥中 TCE 在 10 μg/L 时,氧化率仅有 13.8%。由此可推断出 TCE 在五种代谢基质中的可生化性从高到低的顺序为:甲苯 > 苯酚 > 苯甲酸 > 氯苯 > 苯。这与代谢基质自身的可降解性的顺序稍有不同。

TCE 在几种代谢基质驯化的活性污泥中的降解,主要是通过代谢基质诱导微生物产生加氧酶来实现的,即单加氧酶和双加氧酶。甲苯和苯酚是两种有效地代谢基质^[8-9],经室内试验得出,苯酚是更能促进 TCE 降解的代谢基质^[9],也有报道称甲苯是 TCE 共代谢降解的最有效地基质^[12],目前有现场试验表明甲苯和苯酚作为代谢基质降解 TCE 是等效的^[13]。其研究结果稍有不同,原因可能是反应条件不同所致。TCE 降解的速率主要决定于微生物释放的加氧酶的浓度。加氧酶对代谢基质如甲苯、

表 4 不同基质驯化后活性污泥的内源呼吸耗氧量(mg/g)和其浓度不同时在驯化活性污泥中累积耗氧量(mg/g)

Table 4 Endogenous respiration oxygen consumption of different substrates and oxygen consumption at different concentrations by different substrate-acclimated activated sludges

不同基质	时间 (h)	内源呼吸 耗氧量 (mg/g)	基质不同浓度的耗氧量(mg/g)			
			40 mg/L	60 mg/L	80 mg/L	100 mg/L
苯甲酸(图 1 a)	0.25	4.488	12.394	21.574	22.619	21.460
	0.5	6.564	14.404	26.878	34.098	35.390
	1	8.465	16.41	29.3543	37.136	39.532
	2	11.408	21.437	33.245	41.863	45.556
	3	15.038	26.798	38.904	47.602	52.333
	4	17.629	29.143	41.025	49.965	54.968
	5	17.629	29.143	41.025	76.974	54.968
	6	28.152	55.439	58.178	76.974	67.957
	7	28.054	58.956	60.477	78.830	70.404
	8	34.093	60.464	61.715	80.687	72.851
	9	37.201	64.986	64.367	85.245	76.428
	11	41.523	71.686	70.733	90.647	82.452
	12	42.560	71.686	70.733	91.997	84.334
苯酚(图 1 b)	0.25	3.126	6.320	24.081	20.504	0.780
	0.5	4.437	11.882	27.036	22.348	16.124
	1	8.867	17.891	29.822	25.324	13.102
	2	10.834	18.650	44.360	37.782	21.382
	3	17.238	25.121	50.952	43.180	24.104
	4	21.409	33.138	59.466	46.002	32.690
	5	22.057	42.493	66.680	54.667	38.963
	6	23.482	48.048	70.515	59.508	46.635
	7	25.296	56.585	77.589	68.681	55.159
	8	28.694	55.285	87.099	66.664	53.296
	9	30.519	60.839	95.350	73.808	59.130
	10	30.781	62.313	99.087	76.358	63.719
	11	30.781	66.358	102.368	81.454	69.971
	12	32.085	73.689	109.575	88.086	72.920
甲苯(图 1 c)	0.25	2.815	0	1.251	0	0
	0.5	2.902	1.402	4.353	0	0
	1	3.516	7.989	6.532	0.726	0
	2	7.734	12.084	15.386	4.867	2.898
	3	9.412	16.448	24.310	10.568	3.738
	4	9.500	17.642	25.030	11.273	3.927
	5	11.694	21.703	28.519	14.891	6.889
	6	13.899	23.922	29.059	21.082	7.774
	7	15.565	28.134	34.415	24.179	8.275
	8	16.361	32.571	36.217	27.275	9.012
	9	18.464	33.325	40.777	29.007	9.012
	10	20.751	36.202	43.725	33.994	10.567
	11	20.751	38.847	49.761	34.486	12.678
	12	23.656	39.444	49.761	36.201	13.115
氯苯(图 1 d)	0.25	0.138	2.963	0	0	0
	0.5	0.138	2.963	0	0	0
	1	5.728	7.977	0.312	2.386	0
	2	9.089	12.018	2.071	5.938	2.582
	3	12.716	17.898	1.827	8.397	5.324
	4	15.234	21.670	8.514	12.204	7.099
	5	21.794	26.471	14.239	15.474	5.685
	6	22.778	31.590	14.239	18.207	8.732
	7	24.734	34.554	16.836	21.731	9.628
	8	26.692	37.749	18.106	23.353	12.676
	9	31.024	44.129	20.011	25.475	13.896
	10	31.024	44.129	20.011	25.475	13.896
	11	33.262	51.124	22.936	27.597	11.656
	12	35.371	53.010	22.936	27.597	11.656
苯(图 1 e)	0.25	2.418	5.623	7.338	0	0
	0.5	3.113	7.242	9.566	0	0
	1	5.892	9.925	14.522	4.803	0
	2	15.250	18.969	23.020	2.113	0
	3	20.449	27.353	33.287	11.588	5.776
	4	28.070	34.031	42.570	17.004	13.457
	5	29.980	37.216	47.703	20.215	15.358
	6	36.385	44.454	52.731	31.201	23.786
	7	42.276	44.406	54.502	37.854	32.568
	8	45.580	47.424	57.688	40.632	32.568
	9	45.580	51.448	57.688	42.223	37.254
	10	55.603	56.897	70.872	45.165	31.495
	11	59.069	56.897	70.872	45.165	32.249
	12	61.678	63.575	79.151	45.194	38.765

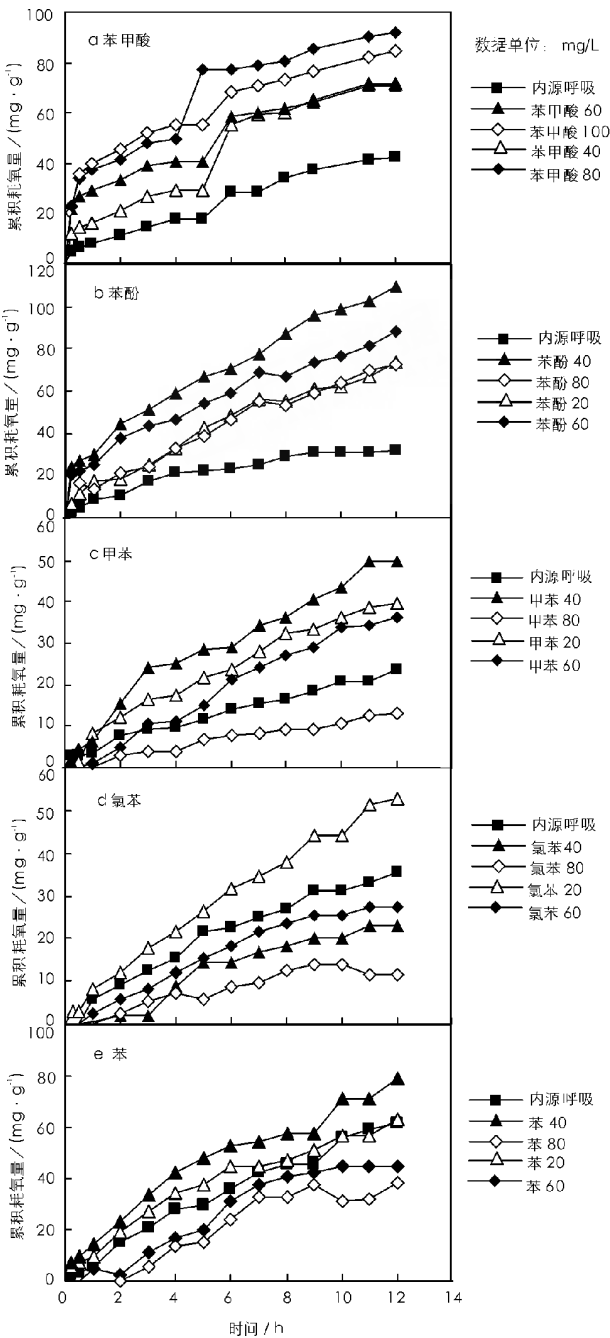


图 1 几种不同的代谢基质在其驯化后的活性污泥中的累积耗氧量曲线

Fig. 1 Curves of oxygen consumption about different metabolic substrates at different concentrations

苯酚等的亲合力要大于对 TCE 的亲合力^[12],本实验中相对于代谢基质的氧化率,TCE 的氧化率则较低,这与前人的观点是一致的。另外本实验研究 TCE 的可生化性时,只是分析 TCE 在代谢基质驯化后的活性污泥中的降解特性,以代谢基质为碳源的微生物释放出加氧酶,加氧酶在代谢

表 5 不同基质驯化后活性污泥的内源呼吸耗氧量(mg/g)和不同浓度的 TCE 在不同驯化活性污泥中的累积耗氧量(mg/g)

Table 5 Endogenous respiration oxygen consumption of different substrates and oxygen consumption about TCE at different concentrations by different substrate-acclimated activated sludges

不同基质	时间 (h)	内源呼吸 耗氧量 (mg/g)	不同浓度的 TCE 在不同驯化 活性污泥中的累积耗氧量(mg/g)			
			10	50	100	200
			μg/L	μg/L	μg/L	μg/L
苯甲酸 (图 2 a)	0.25	2.260	8.371	8.486	0	1.951
	0.5	4.520	11.553	10.486	1.649	2.017
	1	6.770	16.009	14.635	2.647	2.017
	2	10.725	26.921	26.763	3.746	2.017
	3	20.785	24.550	32.588	4.408	2.696
	4	19.674	27.697	34.563	5.408	2.696
	5	19.674	27.227	40.443	8.157	2.696
	6	29.817	34.774	45.204	9.405	3.922
	7	30.328	38.048	48.236	12.505	3.922
	8	34.526	38.048	51.692	15.405	3.922
	9	39.665	37.954	58.688	16.993	3.922
	10	43.929	44.683	58.688	18.993	3.922
	11	45.192	46.957	62.144	24.023	3.922
	12	47.380	47.851	66.506	24.023	3.922
苯酚 (图 2 b)	0.25	0	1.516	2.135	0	0.391
	1.593	0.5	0.916	3.286	2.936	0
	1	2.479	6.316	6.272	0	1.199
	2	2.479	6.316	9.752	0	0.181
	3	7.826	16.158	12.965	6.012	0.181
	4	8.607	20.582	16.568	8.687	0.181
	5	9.648	17.978	21.154	13.401	0.181
	6	16.559	23.731	22.622	15.312	0.181
	7	17.739	26.006	23.690	17.350	0.181
	8	21.374	28.661	26.226	19.261	0.181
	9	23.406	34.153	29.691	24.887	0.256
	10	23.406	34.153	31.026	32.786	0
	11	23.406	34.406	31.026	32.786	0
	12	24.985	38.204	32.754	34.361	0
甲苯 (图 2 c)	0.25	0	0	0.9515	0	1.332
	0.5	3.431	2.520	3.351	2.379	2.101
	1	5.211	2.594	5.968	5.128	2.222
	2	8.312	10.412	12.908	10.324	3.505
	3	11.088	17.800	21.191	15.096	3.505
	4	13.636	24.761	28.952	19.293	3.548
	5	16.194	30.731	35.836	20.854	2.850
	6	20.299	37.477	43.437	28.022	2.530
	7	22.628	44.105	49.694	32.439	0.891
	8	23.741	46.889	54.473	34.177	0.891
	9	25.965	49.673	57.658	36.204	0.891
	10	29.076	54.351	62.722	40.041	0.357
	11	32.079	59.170	69.663	43.360	0
	12	32.853	62.566	75.368	46.111	0
氯苯 (图 2 d)	0.25	2.647	0	1.055	0.513	0
	0.5	5.298	0	1.055	0.513	0
	1	6.185	5.394	8.361	3.326	0
	2	8.839	8.801	9.266	4.682	0
	3	15.784	13.882	19.007	8.543	0
	4	16.882	16.011	19.007	12.297	0
	5	19.688	21.832	26.883	14.562	0
	6	20.861	22.683	28.693	16.225	0
	7	25.283	25.990	33.372	20.356	0
	8	26.167	29.681	37.595	21.368	0
	9	27.937	31.101	37.595	22.450	0
	10	30.735	34.503	42.757	25.963	0
	11	32.357	35.781	44.717	27.101	0
	12	32.654	38.560	49.544	29.168	0
苯 (图 2 e)	0.25	4.407	6.296	0	1.305	0
	0.5	8.640	11.006	2.097	5.419	1.495
	1	15.364	14.386	4.267	7.490	6.114
	2	23.306	22.452	8.001	11.114	9.386
	3	27.195	29.222	11.183	16.533	11.018
	4	34.259	37.050	18.600	21.711	16.792
	5	37.803	43.857	20.635	25.853	16.906
	6	42.577	48.87	23.896	28.517	15.617
	7	47.698	51.704	23.896	30.070	16.964
	8	51.235	56.221	31.305	34.557	20.429
	9	55.112	64.621	34.468	37.859	16.650
	10	57.243	64.621	34.468	37.859	16.650
	11	61.481	64.477	35.642	41.012	20.500
	12	65.541	67.808	38.400	46.257	21.836

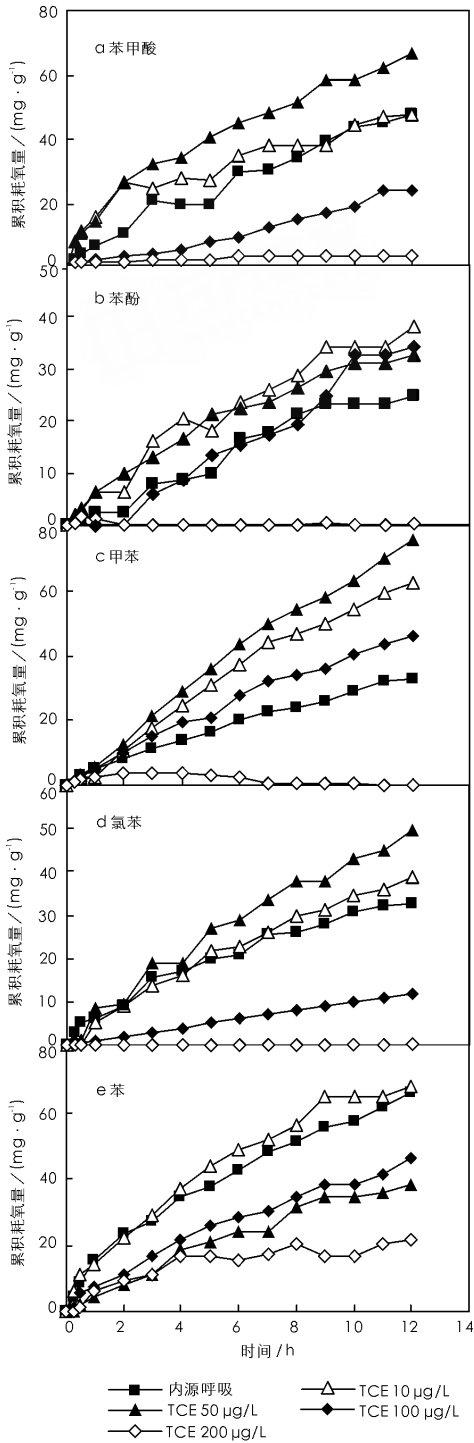


图 2 不同浓度的 TCE 在不同基质驯化后的活性污泥中的累积耗氧量曲线

Fig. 2 Curves of oxygen consumption about TCE at different concentrations by different acclimated sludge

基质不存在的情况下仍具有一定的活性,故可以将 TCE 降解。有研究表明,当代谢基质消耗完时 TCE 起始的降解速率,与代谢基质存在时 TCE 起始的降解速率基本相同^[9],表明基质消耗完时,活性污泥中酶的活性依然能维持一段时间。因此该批试验能反映 TCE 在哪种代谢基质中更容易降解,并为以后的动力学试验提供一定的依据。

3 结 论

瓦呼仪实验可以简洁清晰的反映有机物的可生化性,并根据 12 h 有机物氧化率推断出几种代谢基质可生化性的难易程度,从易到难的顺序为:苯酚 > 苯甲酸 > 甲苯 > 苯 > 氯苯。这与苯环上的取代基有关,甲基、羧基、羟基等取代基,使苯环上的电子云密度增加,容易被氧化,使得其生物降解性能有所改善。苯环上引入了氯原子,由于氯原子自身的极性,使苯环上的电子云密度减弱,使苯环更难氧化。TCE 在几种基质驯化后的活性污泥中的可生化性实验表明:TCE 在苯酚、苯甲酸、甲苯、苯、氯苯等代谢基质驯化后的好氧活性污泥中可降解,表明几种代谢基质能增强 TCE 的降解性,据计算出的 12 h TCE 的氧化率可得出,适合于 TCE 降解的代谢基质的顺序为:甲苯 > 苯酚 > 苯甲酸 > 氯苯 > 苯。但对于定量的分析代谢基质和 TCE 的降解动力学、降解速率等,还有待于进一步研究。

参考文献:

- [1] Nakano Y, Nishijima W, Soto E, et al. Relationship between growth rate of phenol utilizing bacteria and the toxic effect of metabolic intermediates of trichloroethylene [J]. Water Research, 1999, 33 (4): 1085 - 1089.
- [2] Richard E. Doherty. A history of the production and use of carbon tetrachloride, tetrachloroethylene, trichloroethylene and 1,1,1-trichloroethane in the United States; Part 2 - trichloroethylene and 1,1,1-trichloroethane [J]. Journal of Environmental Forensics, 2000 (1): 83 - 93.
- [3] Babu Z. Fathepure and Stephen A. Boyd. Dependence of tetrachloroethylene dechlorination on methanogenic substrate consumption by *Methanosarcina* sp. Strain DCM+ [J]. Applied and Environmental Microbiology, 1988 (54): 2 976 - 2 980.
- [4] Hirvonen A., Tuhkanen T. and Kalliokoski P.. Treatment of TCE and PCE contaminated groundwater using UV/H₂O₂ and O₃/H₂O₂ oxidation processes[J]. Water Science and Technology, 1996, 33 (6): 67 - 73.
- [5] M. Lenczewski, P. Jardine, L. McKay, et al. Natural attenuation of trichloroethylene in fractured shale bedrock [J]. Journal of Contaminant Hydrology, 2003 (64): 151 - 168.
- [6] Daniel J A. Understanding the diversity of trichloroethene co - oxidations [J]. Environmental Biotechnology, 1995, 6: 352 - 358.
- [7] Wen - ming Chen, Jo - shu Chang, Chih - hui Wu, et al. Characterization of phenol and trichloroethene degradation by rhizobium *Ralstonia taiwanensis* [J]. Research in Microbiology, 2004 (155): 672 - 680.
- [8] M C Tom Kuo, K F Liang, Y L Han, et al. Pilot studies for in - situ aerobic cometabolism of trichloroethylene using toluene - vapor as the primary substrate [J]. Water Research, 2004, 38: 4 125 - 4 134.
- [9] Lu C J, Lee C M, Chung M S. The comparison of trichloroethylene removal rates by methane - and aromatic - utilizing microorganisms [J]. Water Science and Technology, 1998, 38 (7): 19 - 24.
- [10] 王雪莲,杨琦,甘小莉,等. 地下水中三氯乙烯—苯酚的好氧共代谢的实验研究[J]. 现代地质, 2005, 19(4): 634 - 638.
- [11] 夏北成. 环境污染物生物降解[M]. 北京:化学工业出版社,2002.
- [12] Jean Pierre Arcangeli and Erik Arvin. Modeling of the cometabolic biodegradation of trichloroethylene by toluene - oxidizing bacteria in a biofilm system [J]. Environmental Science and Technology, 1997, 31 (11): 3 044 - 3 052.
- [13] G D Hopkins, L. Semprini, and P. L. McCarty. Microcosm and in situ field studies of enhanced biotransformation of trichloroethylene by phenol - utilizing microorganisms [J]. Applied and Environmental Microbiology, 1993 (59): 2 277 - 2 285.

Study on Trichloroethylene Aerobic Degradation by Different Substrate

WANG Xue-lian¹, XI Cai-jie², YANG Qi¹, Gan Xiao-li¹, SHANG Hai-tao¹

(1. School of Water Resources & Environment, China University of Geosciences, Beijing 100083, China;
2. Beijing Geological Survey, Beijing 102206, China)

Abstract: In this study, phenol, benzoic acid, benzene, toluene and chlorobenzene are used as acclimated substrates in an activated sludge system. The biodegradability of the five acclimated substrates and that of trichloroethylene (TCE) are conducted by measuring oxygen consumption with Warburg respirometer. The biodegradability parameter is expressed with bio-oxidation ratio in twelve hours. The oxidation ratio of phenol, benzoic acid, toluene and benzene at 40 mg/L is up to the maximum and they are 93.71%, 64.67%, 39.24% and 9.15% respectively. But chlorobenzene can be degraded only at 20 mg/L and its oxidation ratio is 46.09%. Based on this, the biodegradability relationship of the five compounds is concluded: phenol > benzoic acid > toluene > benzene > chlorobenzene. TCE biodegradability ratio for TCE concentration of 50 μg/L, by acclimated sludge using toluene, phenol, benzoic acid and chlorobenzene as substrates, reached the maximum and they are 54.14%, 33.69%, 23.91% and 21.11% respectively. While in benzene acclimated sludge, TCE can be degraded only at 10 μg /L and its oxidation ratio is just 13.8%. Then TCE biodegradability relationship by the five acclimated sludge is as follows: toluene > phenol > benzoic acid > chlorobenzene > benzene.

Key words: trichloroethylene (TCE); biodegradability; aerobic degradation; Warburg respirometer