

# 生物稳定塘水流特征 的研究

文湘华 钱易

(清华大学环境工程系, 北京)

## 摘 要

对生物稳定塘水流特征的研究方法及一些有关问题进行了探讨,通过模型试验及理论分析,对方形塘、廊道形塘及多级塘的水流特征进行了研究,结果表明,流速是影响塘水流特征的重要因素;为改善塘水流特征而加设导流隔板的数目是一个可优化参数;方形塘与廊道形塘的水流特征不同;多级塘的水流特征优于廊道形塘。

关键词: 废水稳定塘; 水力效率; 示踪试验。

目前国内外运行的生物稳定塘多数是利用原有地形加以适当的修整建成,但研究工作及实践经验表明,生物稳定塘的构造直接影响塘内的水流特征,而塘内的水流特征对塘的运行特性有很大影响,因此有必要在研究生物降解机理的同时,对水流特征也加以研究,为稳定塘的合理设计提供科学依据。

关于稳定塘的水流特征,Pipes<sup>[1]</sup>在1961年的研究可能是最早的,他指出,通过合理选择塘的尺寸、形状和进出口布置,可以改善稳定塘的混合状态和负荷分配。以后,陆续发表的一些研究报告<sup>[2-12]</sup>对稳定塘的水流特征进行了深入探讨。

## 一、稳定塘水流特征研究方法讨论

在生物稳定塘水流特征的研究中,多数学者藉用了反应器的基本理论,对流态的研究采用了流动模型的研究方法。

流动模型系指在连续操作过程中,流体流经反应器时的流动状况。应用流动模型研究反应器的性能更多的是强调其时间返混造成的影响。常见的几种流动模型有:完全混合流模型、推流模型、扩散流模型。

完全混合流模型和推流模型是理想流动的两种极限情况。这两种模型的物理意义明确,数学表达简便(式(2),(3)).对理想推流模型作较小修正的方法主要有两种:一种是在实际流动模型之上添加一个费克定律的扩散项,以无量纲扩散系数 $d$ 表示;另一种是将实际流动视为多级串联的完全混合流模型,采用参数为当量级数 $N$ 。

判断反应器内的流态属于哪一种类型,可依据物料在反应器内的停留时间分布函数的测定。应用停留时间分布函数不仅可以定性判断反应器内的实际流动情况,还可以确定一些有关参数,如平均停留时间 $\theta_c$ ,扩散系数 $d$ 等。停留时间分布曲线可借示踪试验获

得。在稳定塘的研究中多采用脉冲法投加示踪剂,其操作及数学处理都比较方便。常用的示踪剂有食盐、染料和放射性荧光物质。

扩散流模型是描述非理想流动的主要模型之一,是用于入流的每个流体单元在反应器内的停留时间长短不一致的一种非理想流模型,其优点在于它能表示较普遍的情况。式(1)为在一级反应条件下扩散流模型的表达式,即Wehne-Wilhelm方程。

$$\frac{C_e}{C_o} = \frac{4ae^{1/2d}}{(1+a^2)^2 e^{a/2d} - (1-a)^2 e^{-a/2d}} \quad (1)$$

式中, $C_e, C_o$ ——出水及进水中某组分的浓度,mg/L;

$d$ ——无量纲扩散系数;

$$a = \sqrt{1 + 4k\theta d};$$

$\theta$ ——实际停留时间,h

$$\text{当 } d \rightarrow \infty, \text{ 式(1)退化为: } \frac{C_e}{C_o} = \frac{1}{1 + k\theta} \text{ (完全混合流模型)} \quad (2)$$

$$d \rightarrow 0, \text{ 式(1)退化为: } \frac{C_e}{C_o} = e^{-k\theta} \text{ (推流模型)} \quad (3)$$

不少研究者认为,式(1)是描述稳定塘的理想模型。因为它综合了稳定塘的水力特征( $d$ ),生物降解特性( $k$ ),和重要参数停留时间( $\theta$ )的影响。

由于在非零级反应的情况下,推流反应器较之完全混合流反应器能获得更高的转化率。特别是在反应速率大,要求处理效率高的情况下,推流的优势更为明显。在稳定塘的研究中引入扩散流模型及其研究方法,可以求出有效扩散系数 $d$ 值,并以此及分布函数推测塘内水流情况与推流流动的偏离程度。评价其水流条件的优劣。但应指出,在稳定塘的研究过程中,模型中的 $d$ 值已失去化工反应器中 $d$ 值的明确物理意义,而是表示塘水流特征诸多影响因素的综合参数。总结前人的工作,影响 $d$ 值的主要因素可归纳为:塘的几何尺寸;塘的进、出口位置;塘内水流的混合程度;进水流速的大小及波动情况;单位容积内输入能量的大小等。

学者们在分析表征水流特征的参数时,指出无量纲扩散系数 $d$ 值有较好的统计意义和稳定性。其它一些参数的稳定性较差,不同文献的报道有相互矛盾的情况。无量纲扩散系数可按下列公式借计算机求得:

平均水力停留时间:

$$\bar{\theta}_o = \frac{\sum_{i=0}^n \theta_i C_i \Delta t_i}{\sum_{i=0}^n C_i \Delta t_i} \quad (4)$$

方差:

$$\sigma^2 = \frac{\sum (t_i - \bar{t})^2 \cdot \Delta t_i C_i}{\sum \Delta t_i C_i} \quad (5)$$

$$\sigma_{\theta}^2 = \frac{\sigma^2}{\bar{\theta}_o} = 2d - 2d^2(1 - e^{-d}) \quad (6)$$

式中,  $t_i$ ——取样时间, h,

$C_i$ ——所取样品中的示踪物质浓度, mg/L,

$\Delta t_i$ ——取样间隔时间, h,

$$\bar{t} = \bar{\theta}_c$$

## 二、试验结果及其分析

为探讨不同形式塘内的水流特征及适当的研究方法, 我们在几种不同形式的塘内进行了一系列试验。

### 1. 试验装置

(1) 室内对比塘模型 B, M (见图 1)。

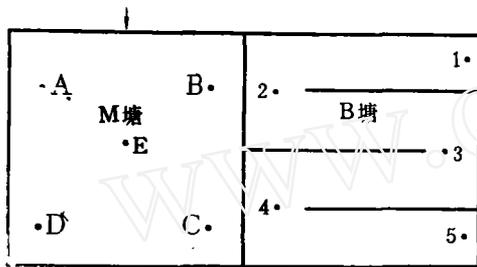


图1 稳定塘对比模型平面图

Fig.1 Plan of the contrast ponds

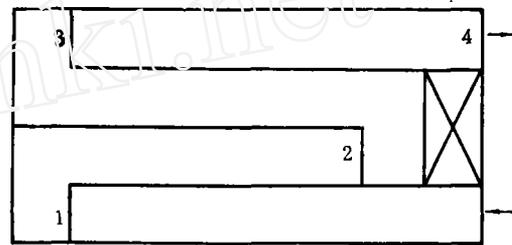


图2 多级塘平面图

Fig.2 Plan of the multistage pond

模型用聚氯乙烯板焊制, B, M 塘尺寸均为  $0.8\text{m} \times 0.8\text{m} \times 0.5\text{m}$ 。B 塘内设置三块隔板, 使塘分为四个宽为  $0.194\text{m}$  的廊道, 模拟推流型水流; M 塘内不设隔板, 模拟完全混合型水流。

(2) 多级塘 (图 2) 分为四级, 1, 2, 4 级尺寸为  $1.6\text{m} \times 0.194\text{m}$ , 塘深均为  $0.5\text{m}$ 。

上述两装置均设于恒温水槽内, 控制水温为  $25 \pm 1^\circ\text{C}$ , 并以日光灯模拟日光, 塘水面照度约  $5000\text{lX}$ 。

(3) 室外塘 (图 3) 为三级串联系统, 本文只叙述利用该系统中 2\*, 3\* 塘进行水力示踪试验的情况。

### 2. 试验内容及方法

采用示踪试验的方法, 利用溴酚蓝作示踪剂, 以 721 分光光度计检测示踪剂浓度, 进行了几组水力示踪试验。利用试验得到的停留时间分布曲线及求出的扩散系数  $d$  和平均停留时间  $\bar{\theta}$  等参数对水流特征进行分析。利用室内对比塘还进行了几组有机物降解试验。试验控制条件见表 1。

### 3. 试验结果及其分析

(1) 室内对比塘模型示踪试验数据列于表 2, 所得到的停留时间分布曲线示于图 4—图 7。

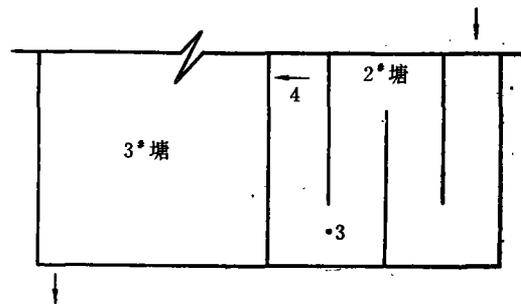


图3 室外塘平面图

Fig.3 Plan of the outdoor ponds

表1 试验控制条件

Table 1 Test conditions

试验组别	水力停留时间, d	进水 COD 浓度, mg/L		
		1	2	3
I-1,2,3	5	152.33	230.39	341.58
II-1,2,3	3	142.58	240.87	332.88

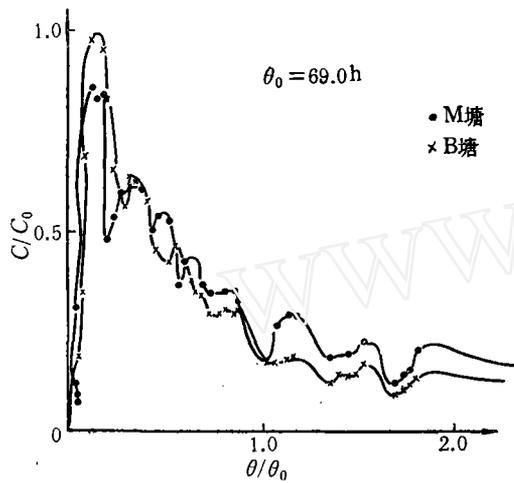


图4 室内对比塘模型的停留时间分布曲线  
Fig.4 Detention time distribution curve for the contrast pond

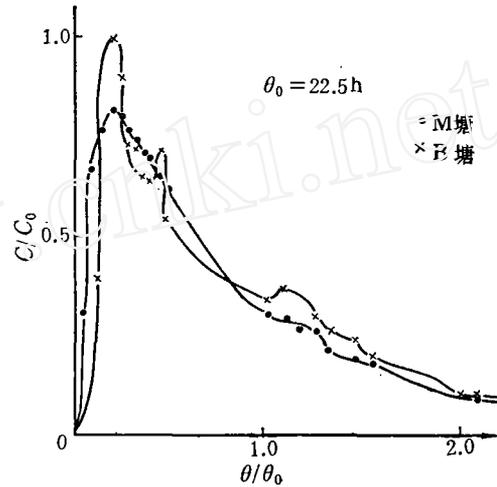


图5 室内对比塘模型的停留时间分布曲线  
Fig.5 Detention time distribution curve for the contrast pond

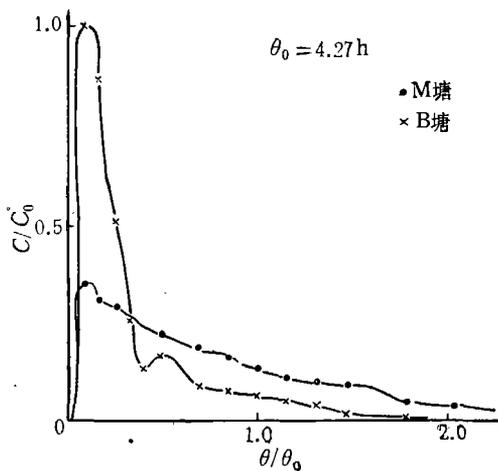


图6 室内对比塘模型的停留时间分布曲线  
Fig.6 Detention time distribution curve for the contrast pond

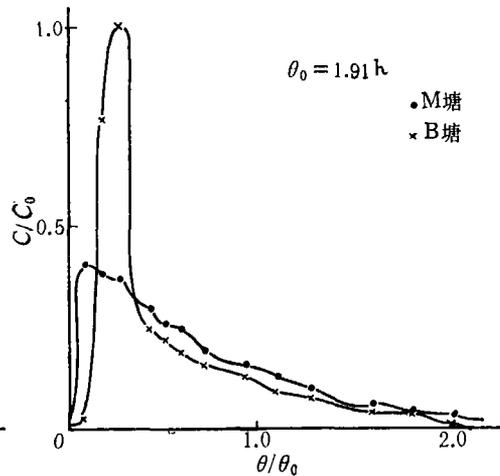


图7 室内对比塘模型的停留时间分布曲线  
Fig.7 Detention time distribution curve for the contrast pond

表2 室内对比塘示踪试验结果

Table 2 Tracer test results of the contrast ponds

流量, ml/min	理论停留时间 $\theta_0, h$	塘名称	流速, mm/s	扩散系数 $d$	平均停留时间 $\bar{\theta}, h$	峰值出现时间 $t_p, h$	方差 $\sigma^2$	$\frac{\bar{\theta} - \theta_0}{\theta_0}, \%$
72	69.0	B	0.0124	0.6594	45.57	10.0	0.6400	-28.1
		M	0.0030	0.5028	56.20	8.0	0.5692	-18.5
222	22.5	B	0.0381	0.2969	20.17	4.0	0.4236	-10.4
		M	0.0092	0.3860	18.81	4.0	0.4963	-16.5
1170	4.27	B	0.2010	/	/	0.33	/	/
		M	0.0487	0.4355	3.00	0.33	0.5299	-29.7
2610	1.91	B	0.448	0.6230	1.10	0.50	0.6257	-42.4
		M	0.109	0.4570	1.28	0.17	0.5431	-32.6

由表2及图4--图7所示结果可以看出,在不同的停留时间下,M塘的停留时间分布曲线均较B塘的曲线有较低的峰值,峰值点出现也较早.当停留时间较短时,M塘的分布曲线较B塘平缓得多.说明M塘较之B塘表现了更多的完全混合流的特征.两塘的扩散系数和平均停留时间并未表现出显著的规律性差别,说明这二者还不能代表完全混合和推流这两种典型的水流特征.主要原因是因为模型塘尺寸较小,塘内水流流速较低,边壁效应及射流等的影响都较大,这些因素都起着掩盖二者水流特征差别的作用.

试验结果还表明,当塘内水流速度增加时,扩散系数先减少,接着又增大.例如B塘,当流速从0.0124mm/s增加至0.0381mm/s时, $d$ 值从0.6594减小至0.2969,但流速再增加至0.448mm/s时, $d$ 值又增加至0.6230. M塘的数据也有相同规律.这说明在一定范围内流速的提高有利于水流特征的改善,但当流速大于某临界值时,又会产生射流等一些因素,对水流特征不利.

(2)室外塘示踪试验结果列于表3,所得停留时间分布曲线示于图8.

不难看出,室外塘2和3在形状及构造上分别相应于室内对比塘B和M,只是尺寸放

表3 室外塘示踪试验结果

Table 3 Tracer test results of the outdoor ponds

流量, ml/min	理论停留时间 $\theta_0, h$	塘名称	流速, mm/s	扩散系数 $d$	平均停留时间 $\bar{\theta}, h$	方差 $\sigma^2$	$\frac{\bar{\theta} - \theta_0}{\theta_0}, \%$
3600	24.26	3#	0.030	0.4574	18.75	0.5434	-22.7
3600	19.44	2*(3)	0.0857	0.4481	13.46	0.5377	-30.8
3600	25.92	2*(4)	0.0857	0.3599	17.74	0.4768	-31.6

大了而已.试验结果表明,塘2的扩散系数 $d$ 较塘3为小,即塘2的水流特征较塘3为好.因为塘2的体积与塘3基本相同,可以认为塘2水流特征较优是加设导流墙的结果.加

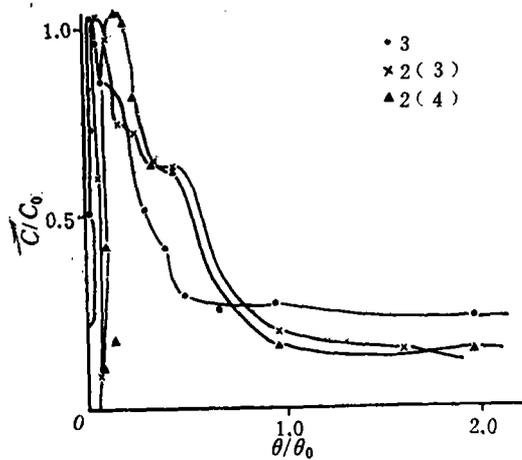


图8 室外塘停留时间分布曲线

Fig. 8 Detention time distribution curve for the outdoor pond

设导流墙可减小过水断面,增大塘的长宽比,这是有利于提高水力效率的.但同时导流墙的设置也会使边壁面积增大,引起流速分布的不均匀,这是不利于提高水力效率的.这正反两种影响作用的大小取决于导流墙的数目.所以在塘内设置导流墙的数目是一个可优化参数,存在最佳值.

室外塘在几何上和室内对比塘相似,但其结果却能比较清楚地显示出加设导流墙的作用,主要是因为室外塘中流速远大于室内对比塘,且边壁效应及射流等因素的影响又相应减弱了的缘故.

(3)多级塘的试验结果列于表4,

表4 多级塘示踪试验结果  
Table 4 Tracer test results of the multistage ponds

流量 ml/min	理论停留时间 $\theta_0, h$	塘名称	流速 mm/s	扩散系数 $d$	平均停留时间 $\bar{\theta}, h$	方差 $\sigma^2$	$\frac{\bar{\theta} - \theta_0}{\theta_0}, \%$
146	17.12	1	0.024	0.1231	15.28	0.2159	-10.7
146	34.25	2	0.024	0.0778	32.56	0.1434	-4.9
146	51.37	3	0.024	0.0438	53.92	0.0832	5.0
146	68.50	4	0.024	0.0512	71.20	0.0512	3.9

其停留时间分布曲线示于图9.

从图9及表4中可以清楚地看到示踪剂分级前进的情况,级与级之间不存在水流混合,这使试验所得的停留时间分布曲线与理论停留时间分布曲线具有相同的型式.

当水流速度一定时,多级塘相应各级的扩散系数是逐程逐渐减小的,停留时间的相对误差绝对值也逐级减少.这说明随着级数的增加,水流条件不断得到改善,级数越多,水流条件将越好,即越接近于推流型.

将多级塘与廊道型的B塘相比较,可以看出多级塘有较低的扩散系数和较小的停留时间相对误差,即其水流特征明显地

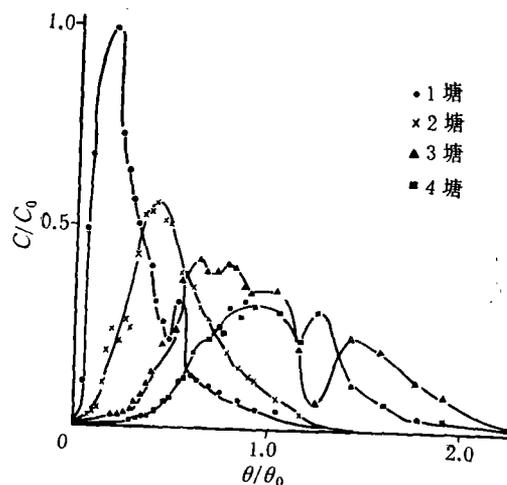


图9 多级塘停留时间分布曲线

Fig. 9 Detention time distribution curve for the multistage pond

优于廊道形塘.这是因为多级塘可以大大减弱塘内的扩散和射流的影响.可以认为扩散与流速对塘内的水流特征起着同等重要的作用.

(4)对比塘模型中COD的分点测定结果列于表5,表6,测点分布示于图1.

表5 M塘COD分点测定数据表  
Table 5 COD values of the pond M

进水体积负荷, $g \cdot COD/m^3 \cdot d$	COD 测定值				
	A	B	E	C	D
44.56	26.75	/	32.92	/	24.69
66.06	85.42	/	124.99	/	87.50
79.13	57.65	/	84.12	/	55.76
46.83	28.99	25.36	34.42	25.36	25.36

表6 B塘COD分点测定数据表  
Table 6 COD values of the pond B

进水体积负荷, $g \cdot COD/m^3 \cdot d$	COD 测定值				
	1	2	3	4	5
44.56	28.39	32.92	21.81	28.81	43.21
66.06	79.17	79.17	99.99	83.33	83.33
79.13	57.65	61.44	57.65	60.49	57.65
46.83	28.99	25.36	34.42	25.36	25.36

试验结果表明,在不同条件下,M塘在四角处的COD测定值均较中部的测定值低.这说明单一进出口的稳定塘四角存在死角,塘内沿进出口连线有水流短路现象. B塘内各点的COD测值差异较小,说明水流比较均匀. 断面流速分析表明,B塘内近隔数处及隔板端部水流转弯处流速很低,也相当于死角. 可见,M与B塘各有其不利于水流特征的因素,M塘中主要是由于短流流动造成了死角. B塘内设置了隔板,减少了短流现象,却增加了边壁效应,也形成了死区. 更由于模型尺寸较小,使得二者水流的总效应没有显著差别了.

### 三、主要结论与建议

1. 水流速度是影响稳定塘水流特征的重要因素. 在某一临界流速下,提高流速有利于改善水流特征. 在稳定塘内设置导流墙可以增大水流速度,在一定范围内改善水流特征. 但增加导流墙会使边壁效应增大. 因此,导流墙的设置数目是可优化参数,存在最佳值.

2. 方形塘与廊道形塘内的水流特征不同. 方形塘在进出口连线上形成短流,四角为死区. 廊道形塘在隔板近壁点及隔板端部水流转弯处形成死区.

3. 多级塘的水流特征优于廊道形塘,级数越多,水流越接近于推流塘.

4. 我们对稳定塘水流特征及有关研究方法进行了初步探讨. 建议进一步进行这方

面的研究工作。根据分析,仅用示踪试验获得的参数描述塘的水流特征还不够全面、细致。要从根本上弄清稳定塘这种特殊构筑物的水流动情况,有的放矢地进行流态的优化工作,还应藉水力学中描述流动的基本方程,对塘的特殊边界求解。

#### 参 考 文 献

- [1] Pipes W O. *Water and Sewage Works*, 1961, 108 (4) : 131
- [2] Shindala A *et al.* *Water and Sewage Works*. 1969, 139 (10) : 391
- [3] Benefield L D. 邢建等译. 废水生物处理过程设计, 北京: 中国建筑出版社, 1981
- [4] Thirumurthi D *et al.* *Water and Sewage Works*, 1967, 30 (1) :R208
- [5] Thirumurthi D *J of Sanitary Eng Div ASCE*, 1969 95 (2) :311
- [6] Thirumurthi D. *JWPCF*. 1974, 46 (9) :2094
- [7] Thirumurthi D. *JWPCF*. 1979, 41 (11) :R405
- [8] Mangelson K A *et al.* *J of Sanitary Eng Div ASCE*, 98 (AS2) :407
- [9] Arceivala S J. *Wastewater Treatment and Disposal*. Inc. , New York, 1981
- [10] 许晓明. 好气氧化塘的微生物研究, [硕士论文], 北京市环保局, 1987

1989年1月5日收到

## A STUDY ON THE HYDRAULICS OF WASTE STABILIZATION POND

Wen Xianghua, Qian Yi

(Department of Environment Engineering, Tsinghua University, Beijing)

### ABSTRACT

The flow characteristics of three kinds of waste stabilization ponds with different configuration or size was studied. The flow velocity was found to be an important factor affecting the pond hydraulics and the number of inserting baffles can be optimized. The flow characteristics of a square pond was different from that of a baffled pond and the hydraulic efficiency of a multistage pond is superior to that of the baffled pond.

**Keywords:** waste stabilization pond, hydraulic efficiency, tracer test.