

宋新山, 张涛, 严登华, 等. 2010 不同布水方式下水平潜流人工湿地的水力效率 [J]. 环境科学学报, 30(1): 117–123

Song X S, Zhang T, Yan D H, *et al*. 2010. Hydraulic efficiency of horizontal subsurface flow constructed wetlands for different inflow configuration [J].

Acta Scientiae Circumstantiae, 30(1): 117–123

不同布水方式下水平潜流人工湿地的水力效率

宋新山^{1,*}, 张涛¹, 严登华², 陈燕¹, 袁瑞霞¹

1. 东华大学环境科学与工程学院, 上海 201620

2. 中国水利水电科学研究院水资源所, 北京 100044

收稿日期: 2009-05-19

修回日期: 2009-08-31

录用日期: 2009-11-14

摘要: 通过对 4 种布水方式 (一般水平流式、波流式、对角流式、多点进水式) 下水平潜流人工湿地的脉冲示踪剂试验, 获得了不同布水方式的水平潜流人工湿地的水力停留时间分布曲线, 并计算出水平潜流人工湿地的表观停留时间、平均停留时间、峰值停留时间。同时, 根据不同停留时间的对比关系计算不同布水方式的相对水力效率。最后, 由停留时间分布函数的对数正态分布拟合模型和连续混合反应器模型分别估算上述停留时间和相对水力效率。结果表明, 不同布水方式和不同计算方法得到的水力效率为波流式 > 一般水平流式 > 对角流式 > 多点进水式。

关键词: 水平潜流人工湿地; 示踪剂试验; 水力停留时间分布; 水力效率; 布水方式

文章编号: 0253-2468(2010) 01-117-07

中图分类号: X703

文献标识码: A

Hydraulic efficiency of horizontal subsurface flow constructed wetlands for differential inflow configuration

SONG Xinshan^{1,*}, ZHANG Tao¹, YAN Denghua², CHEN Yan¹, YUAN Ruixia¹

1. Environmental Science and Engineering College, Donghua University, Shanghai 201620

2. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100044

Received 19 May 2009;

received in revised form 31 August 2009

accepted 14 November 2009

Abstract According to tracer tests, four kinds of horizontal subsurface flow constructed wetlands with different inflow configurations (i.e. common horizontal flow, wave flow, diagonal flow, multiple point inflow) have different hydraulic residence time distribution density curves. Nominal retention time, mean retention time and peak retention time are calculated, and hydraulic efficiencies of constructed wetlands with different inflow configurations are calculated based on correlations among the retention times. The lognormal probability density distribution model and the completely stirred tank reactor model are applied to fit the hydraulic retention time distribution curve of the four kinds of subsurface flow constructed wetlands. Based on the different hydraulic retention time estimation from the model fits, the effective volume ratio, short-circuiting value and hydraulic efficiency are calculated. The hydraulic efficiencies of constructed wetlands with different inflow configurations are as follows: wave flow > common horizontal flow > diagonal flow > multiple point inflow. The above research results have reference value for designing constructed wetlands with high hydraulic efficiencies.

Keywords horizontal subsurface flow constructed wetlands (HSFCWs); tracer tests; hydraulic residence time distribution (RTD); hydraulic efficiency; inflow configuration

1 引言 (Introduction)

人工湿地脱除水中污染物的过程主要是依靠基质、微生物、植物根系之间的物理、化学和生物学过程的协同作用 (王世和等, 2003; Girali *et al*,

2009), 且主要发生在随水流动的过程中 (Wemer *et al*, 2000; 宋新山等, 2007, 2009)。由于潜流人工湿地中存在“短路”、“死区”、“弥散”现象, 同时, 进入的水流 (包括随水流迁移的物质) 并非如活塞流描述的那样能够同时到达出水口。所以, 该水力

基金项目: 国家自然科学基金创新群体基金 (No. 50721006); 国家重点基础研究发展计划 (973) 项目 (No. 2006CB403402-3); 国家水专项 (No. 2008ZX07207-006-04); 上海市重点学科项目 (No. B604)

Supported by the Creative Group Foundation of the National Natural Science Foundation of China (No. 50721006), the National Basic Research Program of China (No. 2006CB403402-3), the National Water Resource and Environment Special Item (No. 2008ZX07207-006-04) and the Key Subject Item of Shanghai (No. B604)

作者简介: 宋新山 (1972-), 男, 副教授 (博士), E-mail: newmountai@dhu.edu.cn * 通讯作者 (责任作者)

Biography: SONG Xinshan (1972-), male, associate professor (Ph.D.), E-mail: newmountai@dhu.edu.cn * **Corresponding author**

学过程可用停留时间分布模型描述 (Jenkins *et al* , 2005; Chazarenc *et al* , 2003). 潜流人工湿地中污染物的去除决定于水流中污染物与基质以及根系上生物膜的接触时间, 因此, 潜流人工湿地的设计中, 对由水力停留时间分布 (RTD) 决定的水力学特性的理解成为设计的关键环节 (Jenkins *et al* , 2005; Rohkanen *et al* , 2008).

20世纪 90年代以前, 对人工湿地 (CW s) 的研究主要集中在污染物去除的生化降解影响因素及其动力学过程上, 但进行人工湿地实际设计时发现, 其水动力过程起着更为重要的作用. 为此学者们提出了一些衡量人工湿地水力效率的评价指标, 如有效体积比 (Thackston *et al* , 1987)、短路值 (Ta *et al* , 1998)、水力效率 (Persson *et al* , 1999) 等. 同时, 基于化学工程反应器理论的一些数学模型也被用于描述人工湿地的水流过程, 如推流模型 (PFM)、连续完全混合反应器模型 (CSTRM)、对流扩散模型 (DPFM)、非完全混合区域模型 (ZDM) (Wemer *et al* , 2000; Jenkins *et al* , 2005; Mollea *et al* , 2006).

目前, 关于水平潜流人工湿地 (HSSFCW s) 水力效率评价研究方面的不足主要体现在以下几个方面: ①上述水力效率评价指标的提出背景都是基于对一些人工塘的研究, 应用于潜流人工湿地的研究案例较少; ②对于上述评价指标的计算都是基于示踪剂试验后, 根据获得的停留时间分布数据直接进行计算, 未见有根据其停留时间分布拟合模型进一步进行估算的报道, 而后者可以比较方便地将人工湿地的水力效率应用于其设计过程中; ③基于水动力的驱动机制, 一些研究试图通过改变潜流人工湿地的布水方式来提高除污效果, 如多点进水、波流式等 (何成达等, 2006), 但对于这种新型布水工艺水力效率方面的研究未见有报道, 难以从理论上进行量化的设计改进. 基于此, 本文根据不同布水方式下脉冲示踪剂试验 RTD 曲线数据, 获得水平潜流人工湿地水力停留时间分布曲线的最佳拟合模型, 并估算不同的停留时间以及水力效率评价指标, 以期高效率水平潜流人工湿地的设计提供科学依据.

2 材料与方法 (Materials and methods)

2.1 试验装置

试验共设计 4 种布水方式 (图 1). 模拟人工湿

地用有机玻璃箱体 (0.493m × 0.350m × 0.400m) 构建, 内部填充厚 0.170~0.225m、粒径为 5~8mm 的沸石, 填料空隙率为 0.6. 恒流泵用以保持恒定进水.

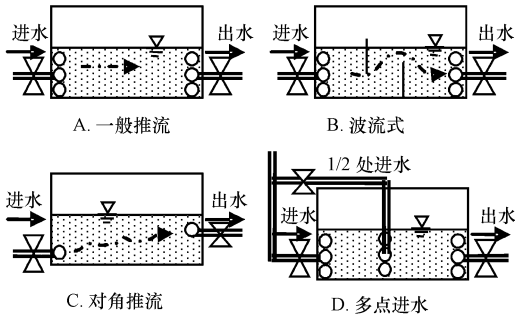


图 1 人工湿地不同布水方式剖面示意图

Fig. 1 Schematic layout of constructed wetlands with different inflow configurations

2.2 脉冲示踪剂试验

2.2.1 静态吸附试验 选取 NaCl 为示踪剂, 将 600mL 浓度分别为 250mg·L⁻¹ 和 1000 mg·L⁻¹ 的 NaCl 溶液加入装填 1L 沸石的 2L 容量瓶中, 每隔 20min 测定其溶液电导率变化, 10h 内, 两者电导率无明显变化, 说明吸附量很小.

2.2.2 电导与浓度线性关系测试 电导率和溶液浓度并非呈简单的线性关系, 稀溶液中, 电导率随溶液浓度增加而线性增加; 当浓度增大到一定程度后, 由于离子活度降低, 电导率反而下降. 为此配制 25~1200 mg·L⁻¹ 的 NaCl 溶液, 测试其电导率 (图 2). 由图 2 可知, NaCl 溶液浓度在 1200 mg·L⁻¹ 以下, 溶液电导率和浓度之间有简单的线性关系.

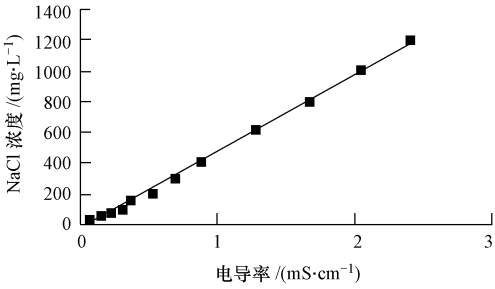


图 2 稀溶液中电导率和 NaCl 浓度的线性关系实验

Fig. 2 Linear relationship between NaCl concentration and dilute solution conductivity

2.2.3 脉冲实验 试验开始前在保持恒定进水 (无示踪剂) 情况下, A (一般推流式)、B (波流式)、C (对角流式) 装置将 15g NaCl 溶解于 150mL 水中, D (多点进水式) 装置将 15g NaCl 溶于 250mL 水中,

通过切换进水管, 以脉冲方式在 5s 内进入装置, 然后继续由恒流泵保持恒定水流, 每隔一定时间测定出水电导率。

2.3 数据处理方法

根据流体反应器理论, 脉冲示踪剂实验中测得的浓度相当于停留时间分布密度。对测得的电导率按照公式 (1) 进行标准化处理 (David *et al.*, 2009)。

$$N(t) = \frac{(E(t) - E_w)M_{NaCl}Q}{(\lambda_{Na} + \lambda_{Cl})m} \quad (1)$$

式中, E 为电导率 ($S \cdot m^{-1}$); E_w 为进水背景电导率 ($S \cdot m^{-1}$); M_{NaCl} 为 NaCl 摩尔质量 ($g \cdot mol^{-1}$); λ_{Na} 为 Na^+ 离子的摩尔电导率, 取值为 $5.01 \times 10^{-3} S \cdot m^2 \cdot mol^{-1}$; λ_{Cl} 为 Cl^- 离子的摩尔电导率, 取值为 $7.63 \times 10^{-3} S \cdot m^2 \cdot mol^{-1}$; t 为从示踪实验开始的时间 (h); Q 为流量 ($m^3 \cdot h^{-1}$); m 为加入的示踪剂总量 (g); N 为标准化的停留时间分布密度 (h^{-1})。

3 相关理论背景 (Theoretical background)

3.1 水力停留时间

表观停留时间 t_n (h) 假定水流以活塞流形式通过人工湿地, 同时, 进入的水流质点具有相同的停留时间, 即在相同时间到达出水口, 其计算过程如式 (2) 所示。平均停留时间 t_m (h) 定义为停留时间分布曲线的重心位置, 计算如式 (3)。峰值停留时间 t_p (h) 定义为示踪剂最高浓度出现的时间。

$$t_n = V/Q \quad (2)$$

$$t_m = \frac{\int_0^\infty t N(t) dt}{\int_0^\infty N(t) dt} \quad (3)$$

式中, V 为湿地体积 (m^3); Q 为体积流速 ($m^3 \cdot h^{-1}$); 其余符号同前。

上述停留时间的关系如图 3 所示。由于人工湿地的停留时间分布是一条右端脱尾的曲线, 表观停留时间一般大于平均停留时间 (Persson *et al.*, 1999), 因此, 一般顺序为 $t_p < t_m < t_n$ 。停留时间 t_{16} (h) 和 t_{50} (h) 分别定义为出口处示踪剂回收 16% 和 50% 的时间。

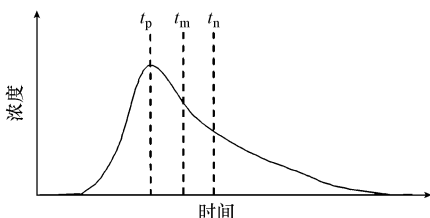


图 3 不同停留时间相互关系示意

Fig. 3 Illustration of tracer concentration over time

3.2 停留时间分布拟合模型

3.2.1 对数正态分布 根据 RTD (水力停留时间分布) 曲线的形状, 分别将正态分布、对数正态分布、卡方分布、瑞利分布与停留时间分布数据进行拟合分析, 发现对数正态分布能够较好地拟合 RTD 曲线。对数正态分布的概率密度的计算公式如下:

$$N(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma t} e^{-\frac{(\ln t - \ln t_m)^2}{2\sigma^2}} \quad 0 < t < +\infty \quad (4)$$

式中, σ 表示停留时间分布的标准差, 对数正态分布的期望平均停留时间为 $e^{t_m + \sigma^2}/2$, 其标准差为 $\sqrt{(e^{\sigma^2} - 1)e^{2t_m + \sigma^2}}$ 。标准化后的 RTD 密度函数具有归一化的性质, 即 $\int_0^\infty N(t) dt = 1$ 。分布密度函数的积分就是停留时间分布 ($F(t)$ 概率), 即 $F(t) = \int_0^t N(t) dt$ 。此处积分得到的 $F(t)$ 实际上表明了 t 时刻出口示踪剂的回收率 ($R(t)$), 当 $t \rightarrow \infty$ 时, 人工湿地出口处的 $F(t)$ 反映了试验结束时示踪剂的总回收率 (R)。

3.2.2 连续完全混合反应器模型 (CSTRM) 由反应器理论, 如果把人工湿地考虑为 n 个连续反应器, 则出口处停留时间分布密度函数如式 (5) 所示。

$$N(t) = \begin{cases} 0 & t \leq t_d \\ \frac{n}{t_{CSF}(n-1)!} \left[N \left(\frac{t-t_d}{t_{CSF}} \right) \right]^{n-1} & t > t_d \\ \exp \left[-n \frac{(t-t_d)}{t_{CSF}} \right] & t > t_d \end{cases} \quad (5)$$

式中, t_d 为出口处示踪剂延迟时间 (h); t_{CSF} 为整个湿地系统的理论停留时间 (h); 其余符号同前。

3.3 水力效率评价指标

3.3.1 有效体积比 e Thackston 等 (1987) 通过对一些文献中关于浅水塘 (ponds) 示踪剂试验的数据分析, 指出人工湿地的形状对停留时间分布具有重要影响, 并提出有效体积比的概念, 计算方法如下:

$$e = \frac{V_{eff}}{V_{total}} = \frac{t_m Q}{t_n Q} = \frac{t_m}{t_n} \quad (6)$$

式中, V_{eff} 表示用于通过示踪剂的有效体积 (m^3), 即示踪剂在其中运动并最终能够迁移到出水口的有效空间; V_{total} 表示总体积 (m^3), 可表示为潜流人工湿地装置体积和介质空隙率的乘积; 一般 e 值越大, 表示人工湿地中用于去除污染物的有效体积比例越大。Chazarenc 等 (2003) 指出, 当 $e > 1$ 时, 提示人工湿地中有“短路”存在, 水流沿优先流通道快速达到出口, RTD 密度曲线出峰很早; 当 $e < 1$ 时, 提示人工

湿地中有“死区”或“滞水区”存在, 水流进入这部分区域后, 很难再流到出水口.

3.3.2 短路值 s 为了对比不同人工湿地的水力效率, Ta等 (1998) 提出短路值及其计算公式 (7). 一般而言, s 值越大, 表明 RTD 密度曲线的出峰越陡, 反之则出峰会比较平缓.

$$s = t_{16} / t_{50}$$

(7)

3.3.3 水力效率 λ Persson等 (1999) 在对多个人工湿地进行研究的基础上, 认为有效体积比有时不能反映湿地系统内部的水力学特征, 因此, 提出水力效率概念及其计算公式 (8). λ 和 e 相比, 计算更为便捷, 因为峰值停留时间 t_p 可以方便地从 RTD 曲线上读取. 或者可依有效体积比为基础计算水力效率 (式 (9)), 其中, n 可根据停留时间分布曲线的统计特征值进行计算, 即 $n = t_p^2 / \sigma^2$.

$$\lambda = t_p / t_n$$

(8)

$$\lambda = e(1 - 1/n)$$

(9)

4 结果 (Results)

4.1 基于脉冲示踪剂数据直接进行的水力效率评价

根据式 (1) 对脉冲示踪剂试验获得的电导率数据进行标准化处理后, 得到脉冲示踪试验的停留时间分布密度 (图 4). 根据图 4 数据以及公式 (2) ~

(3)、(7) ~ (9), 直接估算不同布水方式下水平潜流人工湿地的各个水力学参数 (表 1). 由表 1 可知, 波流式潜流人工湿地的有效体积比、水力效率在 4 种布水方式中均最高, 表明这种方式布水的潜流人工湿地可能更有利于污染物的去除. 若按有效体积比排序, 则为 B(波流) > D(多点进水) > A(一般推流) > C(对角流). 按示踪剂回收率评价, 则为 B(波流) > A(一般推流) > C(对角流) > D(多点进水). 由于各系统的有效体积比 e 均小于 1, 因此, 上述系统中都存在一定的“死区”现象. 这就意味着示踪剂通过分子扩散或机械弥散进入“死区”后难于再次进入主流通道而达到出水口, “死区”越多, 则示踪剂最终回收量会越少. 因此, 在各系统对示踪剂吸收、吸附效果相同的情况下, 可用示踪剂回收率作为对其水力效率的评价指标. 如果按照式 (8) 计算的水力效率评价, 则为 B(波流) > A(一般推流) > C(对角流) > D(多点进水), 和按照示踪剂回收率的评价结果相同, 其中, D(多点进水) 的水力效率和其它系统相比要低很多. 若按照式 (9) 计算的水力效率进行评价, 则为 B(波流) > D(多点进水) > A(一般推流) > C(对角流), 评价排序结果和按照有效体积比的排序结果相同, 这是因为式 (9) 是以有效体积比为基础.

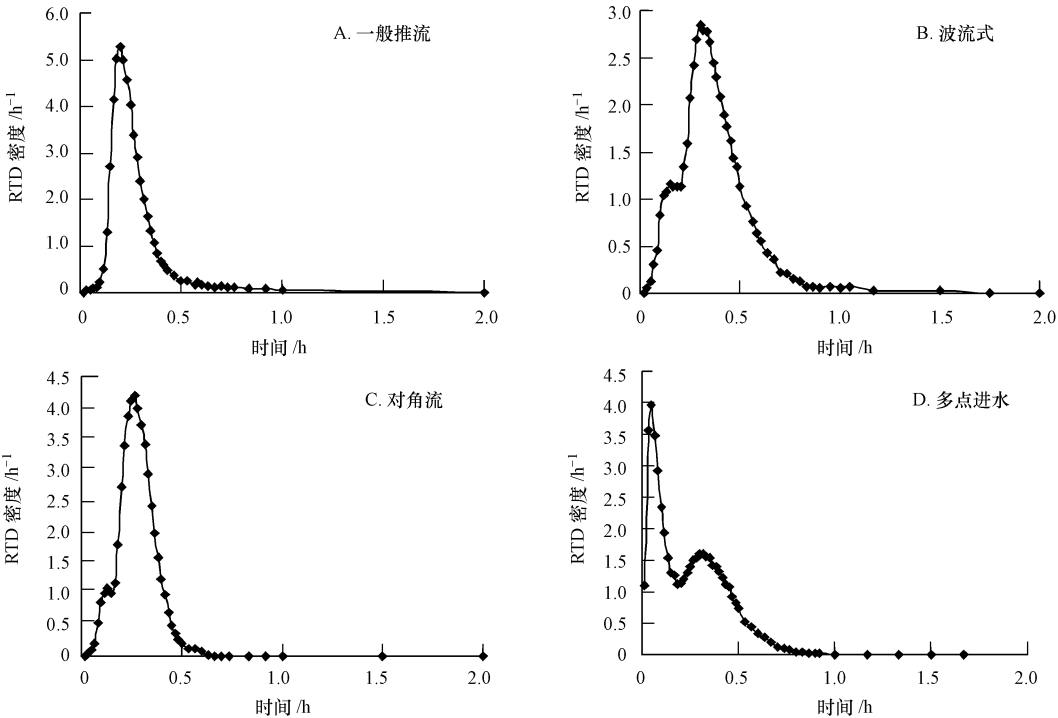


图 4 脉冲示踪剂试验获得的 RTD 密度曲线

Fig 4 Nomal retention time density distribution curve by impulse tracer test

表 1 基于脉冲示踪剂数据直接估算的相关水力学参数

Table 1 Estimated hydraulic parameters directly based on impulse tracer test data								
布水方式	$Q /$ ($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)	流速 $v /$ ($\text{m} \cdot \text{h}^{-1}$)	t_h / h	标准差 $\sigma /$ h	方差 $\sigma^2 /$ h^2	t_m / h	反应单元数 n	无量纲标准 化方差
A(推流式)	0.0817	2.1035	0.3906	0.1407	0.0198	0.274	7.7064	0.2637
B(波流式)	0.0789	1.7475	0.4702	0.2030	0.0412	0.377	5.3661	0.2899
C(对角流)	0.0789	1.8328	0.4483	0.0894	0.0080	0.277	25.1243	0.1043
D(多点进水)	0.0807	1.7079	0.4811	0.1483	0.0220	0.341	10.5202	0.1892
布水方式	t_{16} / h	t_{50} / h	t_p / h	e	s	回收率 R	λ (式(8))	λ (式(9))
A(推流式)	0.170	0.240	0.24	0.7014	0.7083	0.9181	0.6153	0.6104
B(波流式)	0.217	0.350	0.30	0.8018	0.6200	0.9248	0.6380	0.6524
C(对角流)	0.190	0.283	0.26	0.6179	0.6714	0.8513	0.5799	0.5933
D(多点进水)	0.050	0.210	0.05	0.7088	0.2381	0.6034	0.1039	0.6414

4.2 基于对 RTD 的拟合模型进行的水力效率评价

根据概率分布模型(式(4)~(5)),利用 MATLAB 中的非线性拟合 `nlinfit()` 函数编程对脉冲示踪剂实验数据进行了模拟分析(表 2)。由表 2 得到的拟合模型,分别用 MATLAB 的 `logninv()` 函数和 `quad()` 定积分函数获得对数正态分布拟合模型和 CSTRM 拟合模型中的相应水力停留时间,并对系统的水力效率进行评价,结果见表 3。

对比表 1 和表 3 中的有效体积比 e 、水力效率 λ 和短路值 s 等数据可以发现,就 A(一般推流)、B

(波流)、C(对角流)3 种布水方式而言, B(波流式)潜流人工湿地的有效体积比、水力效率在 4 种布水方式中最高,其短路值也最小,采用 RTD 曲线数据直接估算和采用对数正态分布以及 CSTRM 拟合模型进行估算的结果具有一致的趋势。对于 D(多点进水)布水方式,计算得到的有效体积比和水力效率(式(9))都比较高,并且其短路值最低,这和人们的直观认识相矛盾,因为在这种布水方式中,部分水流只利用一半的体积(图 1),很难认为其有效体积比大于一般水平流布水方式。

表 2 停留时间分布拟合模型

Table 2 Model fits of retention time distribution						
布水方式	对数正态分布			CSTRM		
	数学期望 $/ \text{h}$	标准差 $/ \text{h}$	残差 $/ \text{h}^2$	估算反应 单元数 n	估算的总 停留时间 $t_{\text{CSTR}} / \text{h}$	残差平方和 $/ \text{h}^{-2}$
A(一般推流)	0.250	0.089	0.116	4.9886	0.2318	0.3021
B(波流)	0.416	0.205	0.085	3.0797	0.4061	0.1262
C(对角流)	0.306	0.109	0.124	10.9152	0.2768	0.3021
D(多点进水)	0.480	0.893	0.193	10.6689	0.3239	1.7470

表 3 基于停留时间分布拟合模型的系统水力效率评价

Table 3 Estimated hydraulic parameters based on model fits										
拟合模型	布水方式	t_m / h	反应单元数 n	t_{16} / h	t_{50} / h	t_p / h	e	s	λ (式(8))	λ (式(9))
对数正态分布	A(一般推流)	0.2499	/	0.1671	0.2355	0.2127	0.64	0.7095	0.5454	/
	B(波流)	0.416	/	0.2343	0.3726	0.3054	0.8847	0.6288	0.6495	/
	C(对角流)	0.306	/	0.2041	0.2882	0.2490	0.6826	0.7081	0.5558	/
	D(多点进水)	0.480	/	0.0674	0.2275	0.0560	0.9977	0.2962	0.1164	/
CSTRM	A(一般推流)	0.2318	4.9886	0.1428	0.2288	0.2035	0.5934	0.6241	0.5210	0.4745
	B(波流)	0.4061	3.0797	0.1921	0.3540	0.2813	0.8637	0.5427	0.5983	0.5832
	C(对角流)	0.2768	10.9152	0.2138	0.3021	0.2591	0.6174	0.7077	0.5780	0.5609
	D(多点进水)	0.3293	10.6689	0.2918	0.6235	0.3095	0.6845	0.4680	0.6433	0.6203

注:“/”表示由于采用对数正态分布进行拟合,不能得到反应单元数,因此不能根据式(9)计算得到水力效率 λ 。

4.3 多点进水的连续混合反应器叠加模拟

由图 4 可知, D(多点进水)布水方式出现两个峰值,因此,用单一的 CSTRM 并不能较好地对其进

行拟合,这可能也是导致 4.2 节中的评价结果和人们的直观认识矛盾的原因。由于 D(多点进水)布水方式中,示踪剂进入人工湿地有两种途径,而单一

的 CSTRM 仅是模拟单一进水位置情况下出水口示踪剂变化.若采用多个 CSTRM 叠加,则模拟结果可能会更准确.由于本试验中多点进水实际上相当于有两个进水口,为此对 D 采用式 (5) 的叠加模式进行模拟.

利用 MATLAB 中的 $nlinfit()$ 函数进行拟合,得到两套参数,分别是 $n_1 = 11.7174$, $t_{m1} = 0.3583h$ 和 $n_2 = 5.5000$, $t_{m2} = 0.0853h$, 估计残差平方和为 $0.2559h^{-2}$ (该值远小于表 2 中的 $1.747h^{-2}$), 拟合结果如图 5 所示.

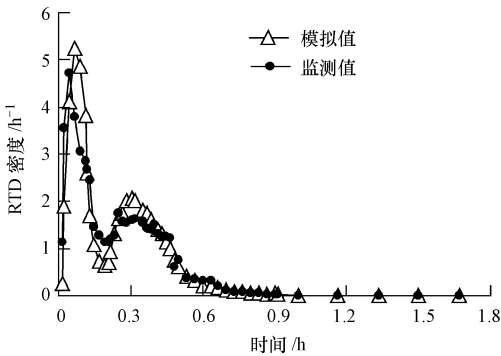


图 5 D 布水方式下 CSTRM 的叠加模拟

Fig 5 Fold up fitting curve of ‘D’ constructed wetlands based on CSTRM

由 MATLAB 中的定积分函数 $quad()$ 可以求得 $t_{16} = 0.0789h$, $t_{50} = 0.2541h$, $t_p = 0.0998h$. 若取 $t_m = (t_{m1} + t_{m2}) / 2$, $n = (n_1 + n_2) / 2$, 则得 $e = 0.4610$, $s = 0.3105$, 按式 (8) 计算的水力效率 $\lambda = 0.2074$, 按式 (9) 计算的水力效率 $\lambda = 0.4074$. 该评价结果和利用 RTD 曲线数据直接估算的数据变化趋势比较一致, 4 种布水方式的水力效率排序为 B(波流) > A(一般推流) > C(对角流) > D(多点进水).

5 讨论 (Discussion)

5.1 不同方法下的水力效率评价

无论是用 RTD 曲线数据直接估算还是根据 RTD 拟合模型估算相关停留时间进行的水力效率评价, B(波流式)布水方式的水力效率都最高.其原因可能是这种布水方式通过在湿地内部有规则地设置导流板, 对传统水平潜流湿地的水流条件进行改进, 以波式流态取代水平流态, 充分利用了湿地内的有效体积. 何成达等 (2006) 对这种布水方式下污染物去除效果的研究表明, 波流式布水方式比传统的水平潜流湿地对污染物具有更高的去除效率.

利用示踪剂数据直接估算相应的停留时间得

到的评价结果中 (表 1), 按式 (8) 得到的水力效率评价结果为 B(波流) > A(一般推流) > C(对角流) > D(多点进水), 这符合人们对潜流人工湿地水流分布的一般认识. 波流式通过在流路上安装挡板, 延长了流路, 并且从宏观上看, 其中的流场既有水平流也有垂直流, 增加了水流通过系统的时间, 相当于增加了系统的有效体积; 而对角流中, 只在系统的横向对角处设置进水、出水口, 其流场分布中, 可能会在进水口和出水口直线距离之间形成“优先流”, 而在系统的另外两个角区域会存在滞水区, 这相当于减少了系统的有效体积; 一般水平流布水方式的有效体积则介于上述二者之间, 即理想的流场是各层水流水平匀速通过湿地, 但实际上由于潜流湿地进出水并非如一般的活塞流那样受均匀推动, 因此, 其流场空间也不会均匀. D(多点进水)布水方式考虑到人工湿地脱氮过程中, 湿地后段因碳源供应不足而使反硝化不彻底, 因此, 设计后段进水以补充碳源. 但是, D 布水方式中, 部分水流实际上只流过系统后段体积, 并未充分利用所有体积, 因此, 如果仅按水力效率计算, 其水力效率应该最低.

5.2 评价模式的适用性

利用示踪剂数据直接估算相应的停留时间得到的评价结果中 (表 1), 按式 (9) 评价所得的水力效率结果为 B(波流) > D(多点进水) > A(一般推流) > C(对角流), 这和式 (8) 的评价结果相矛盾. 这种矛盾可以从两方面解释: ①式 (9) 中的 e 最初是从对氧化塘类型的表面流湿地研究中总结出来的 (Thackston *et al.*, 1987), 不一定适用于潜流人工湿地; ②式 (9) 中的 n 也是从单一进水的脉冲实验 RTD 曲线出发得出的, 不一定适用于多点进水方式. 因此, 直接采用式 (9) 对于 D 布水方式的水力效率评价可能并不合适.

在利用单一 CSTRM 对 RTD 曲线拟合得到的相关停留时间并进行水力效率评价中, D(多点进水)布水方式的水力效率反而最高, 其短路值也最小 (表 3). 这说明利用单一的 CSTRM 估计多点进水方式 (D) 的相关停留时间并进行水力效率评价可能是不可行的. 表 2 中的估计残差平方和也表明, 无论采用单一的对数正态分布还是单一的 CSTRM, 其对 D 布水方式拟合的残差平方和都最大. 在 4.3 节中, 通过对 D(多点进水)布水方式进行叠加拟合, 得到的评价结果和利用 RTD 曲线数据直接估算的数据变化趋势一致.

在利用模式拟合得到的评价结果中(表3), A(一般推流)和C(对角流)的水力效率差别不大,并且和表1的排序结果不相一致,出现这种现象的原因可能是本研究中湿地的长宽比($0.493/0.35=1.41$)不显著,使得一般水平流和对角流进水的水力效率差别不大。研究认为,潜流人工湿地长宽比对其水力效率有影响,根据实际工程场地,潜流人工湿地长宽比可以介于1:1~10:1,长宽比越大,水力效率越大(Persson *et al.*, 2003)。也有研究表明,长宽比达到一定程度后,其对水力效率的影响并不显著(Jenkins *et al.*, 2005),一般最佳长宽比4~5。本文不同布水方式的长宽比一致,研究结果具有可比性。

5.3 基于非均一性介质水平潜流人工湿地的水力效率评价

上述研究针对的是相对均一性介质,实际上,潜流人工湿地一般是用非均一性介质进行分层填充的,其粒径、孔隙率、导水率、空隙水流速等水力学参数是不一样的。因此,在脉冲示踪剂实验中,RTD曲线可能会出现不同的峰值。空隙流速大的填料层较早出现峰值,流速小的层较晚出现峰值。此时,直接采用上述的水力效率估算评价方法可能不适合。应该根据示踪剂实验数据,将对数正态分布或CSTRM进行叠加模拟,并进行水力效率评价。这种研究方法可以确定不同填充方案的水力效率,为潜流人工湿地的设计提供理论依据。

6 结论(Conclusions)

1) 4种布水方式中,按水力效率的排序是波流式>一般水平流式>对角流式>多点进水式,其中,波流式的水力效率最高,其短路值较一般水平流式和对角流式低也佐证了这一点。

2) 利用对RTD曲线数据的分析和拟合可以对潜流人工湿地的水力效率进行评价,这为设计水力效率较高的潜流人工湿地提供了研究方法和理论依据。同时,实际应用中应考虑潜流人工湿地的长宽比以及填充方案对水力效率的影响,结合有机污染物的去除效果进一步验证上述水力效率的评价结果,并耦合有机污染物降解动力学和潜流人工湿地的水动力机制,开发水平潜流人工湿地设计模型。

责任作者简介: 宋新山(1972—),男,博士,副教授,主要从事人工湿地水污染控制、环境评价与规划和环境数学模拟方面研究。

参考文献(References):

- Chazarenc F, Merlin G, Gonthier Y. 2003. Hydrodynamics of horizontal subsurface flow constructed wetlands[J]. *Eco Eng* 21: 165—173
- Ginaldi D, Vitturi M M, Zaramella M, *et al.* 2009. Hydrodynamics of vertical subsurface flow constructed wetlands: Tracer tests with rhodamine WT and numerical modeling[J]. *Eco Eng* 35: 265—273
- 何成达, 王惠民, 钱小青, 等. 2006. 波式潜流人工湿地基质与污水磷素去除关系研究[J]. *农业环境科学学报*, 25(1): 175—178
- He C D, Wang H M, Qian X Q, *et al.* 2006. Relations between phosphorus removal in sewage and medium in wavy subsurface constructed wetland[J]. *Journal of Agro-Environment Science* 25(1): 175—178 (in Chinese)
- Jenkins G A, Greenway M. 2005. The hydraulic efficiency of fringing versus banded vegetation in constructed wetlands[J]. *Eco Eng* 25: 61—72
- Molle P, Lienard A, Grasmick A, *et al.* 2006. Effect of reeds and feeding operations on hydraulic behaviour of vertical flow constructed wetlands under hydraulic overloads[J]. *Wat Res* 40: 606—612
- Persson J, Somers N L G, Wong T H F. 1999. Hydraulic efficiency of constructed wetlands and ponds[J]. *Wat Sci and Technol* 40(3): 291—300
- Persson J, Wittgren H B. 2003. How hydrological and hydraulic conditions affect performance of ponds[J]. *Eco Eng* 21: 259—269
- Ronkanen A K, Klive B. 2008. Hydraulics and flow modelling of water treatment wetlands constructed on peatlands in Northern Finland[J]. *Wat Res* 42: 3826—3836
- 宋新山, 邓伟. 2007. 基于连续性扩散流的湿地表面水流动力学模型[J]. *水利学报*, 37(10): 1166—1171
- Song X S, Deng W. 2007. Mathematical model for continuous diffusion flow in wetland surface[J]. *Journal of Hydraulic Engineering* 37(10): 1166—1171 (in Chinese)
- 宋新山, 柳建设, 陈燕, 等. 2009. 构建湿地系统水力学参数的设计模型研究[J]. *环境科学与技术*, 32(3): 34—38
- Song X S, Liu J S, Chen Y, *et al.* 2009. Model design of hydraulics parameters for constructed wetland wastewater treatment system[J]. *Environmental Science & Technology* 32(3): 34—38 (in Chinese)
- Ta C T, Brignal W J. 1998. Application of computational fluid dynamics technique to storage reservoir studies[J]. *Wat Sci and Technol* 37(2): 219—226
- Thackston E L, Shields J F D, Schroeder P R. 1987. Residence time distribution of shallow basins[J]. *Environ Eng* 113: 1319—1332
- 王世和, 王薇, 俞燕. 2003. 水力条件对人工湿地处理效果的影响[J]. *东南大学学报(自然科学版)*, 33(3): 161—164
- Wang S H, Wang W, Yu Y. 2003. Influence of hydraulic condition on treatment effect of constructed wetland[J]. *Journal of Southeast University (Natural Science Edition)*, 33(3): 161—164 (in Chinese)
- Wemer T M, Kadlec R H. 2000. Wetland residence time distribution modeling[J]. *Eco Eng* 15: 77—90