

水流注入方式和填料层高度对人工湿地流态的影响

蒋绍阶, 黄新丽, 向平

(重庆大学城市建设与环境工程学院, 重庆 400045)

摘要 流态模拟实验作为评价人工净化湿地系统运行状况、物质在其中停留时间的有效工具,在污水处理领域具有重要作用。罗丹明B背景浓度低、重现性好,被选为评价升流式、降流式和填料层高度对水力流态影响的示踪剂。实验使用罗丹明B和NaCl作为示踪剂,在湿地系统中进行流态实验,探究升流式、降流式和填料层高度对人工净化湿地流态的影响。实验结果表明,升流式人工湿地比降流式人工湿地处理效果好,示踪剂水力停留时间(hydraulic retention time, HRT)的体积利用率分别为82.0%和76.8%,升流式人工湿地无效体积中死区占更大比例,而降流式人工湿地滞留区占无效体积的比例更大;人工湿地填料层高度对示踪剂停留时间分布影响不大,体积利用率都在80%以上,但是,其死区和滞留区随着填料层高度的变化在无效体积中所占的比例有所差异,死区所占的比例随着填料层高度的增加先增加后减少,滞留区所占的比例则先减少后增加。

关键词 人工湿地;水力停留时间;水力流态;升流式;降流式;示踪剂;填料层

中图分类号 X505 **文献标识码** A **文章编号** 1672-5948(2012)02-170-06

人工净化湿地,是一种人工强化的污水生态处理技术。经过预处理的污水通过埋在地下的穿孔布水管,缓慢地向周围土壤浸润、渗透和扩散,在土壤—微生物—植物等的综合作用下,污染物得以有效去除。自然净化系统主要分为四部分,从地面向下依次为土壤、填料、卵石和防渗膜。与其他生物处理技术相比,具有投资省、能耗低、运行费用低、管理简单等优点^[1,2]。因此,研究人工净化湿地的流态很有意义。

进入人工净化湿地系统的水流,由于不同的运动情况,在湿地中具有不同的停留时间,流到人工净化湿地系统出口将产生不同的处理效果。因而,水流在湿地中的停留时间分布是评价人工净化湿地系统运行的重要因素。随着湿地系统在污水处理领域逐渐被接纳使用,需要更好的理解水流在人工净化湿地系统中的运行规律。

对于真正的湿地系统,流动是非理想的,包含不同的水流路径、流速和扩散混合形式。即湿地系统各区域存在不同的水流交换,造成了停留时间分布(residence time distribution, RTD)曲线有很长的尾巴。为了更好地理解和设计人工湿地,简

化分析处理过程,一般将其理想为推流式人工净化湿地系统^[3]。

基于示踪—应答技术的流态实验可以有效的分析水力停留时间(hydraulic residence time, HRT, 或者称为理论停留时间),为人工净化湿地系统的设计提供指导并解决现有人工净化湿地系统低效率运行的问题,探索人工净化湿地系统水力特性和混合条件,已经在化工人工净化湿地系统、酶人工净化湿地系统及污水处理人工净化湿地系统甚至河流流态中得到应用^[4]。停留时间分布分析作为评估人工净化湿地系统运行的一个极为有用的分析工具^[5],决定着每一部分进入的物质在人工净化湿地系统中停留时间的多少,成为判断人工净化湿地系统运行的关键参数。同时停留时间分布允许在具有不同构造或区域的系统中具有可比性^[6-8]。

1 流态实验理论

流态实验的主要方法是示踪应答技术。在某一时刻,人工净化湿地系统的入口注入示踪剂,在出口处检测示踪剂的浓度变化,通过示踪剂跟踪

收稿日期 2011-07-11 修订日期 2011-11-15

基金项目 国家科技支撑计划项目(2006BAJ08B08)资助。

作者简介 蒋绍阶(1956-),男,湖南省邵阳县人,教授,主要从事给水处理理论研究。E-mail: zhiye999777@163.com

流体在系统内的停留时间。国内外使用较多的示踪剂有染料、无机盐和同位素三大类。其中,NaCl是被广泛使用的示踪剂;罗丹明不易吸附在表面上,对分散情况的研究特别有用,是评价废水处理装置使用最为广泛的染料示踪剂。

根据示踪剂注入的方式不同,主要分为脉冲法(impulse)和阶跃法(step)。脉冲法有运行时间相对较短和示踪剂使用量较少两个优点,但是示踪剂必须尽快加入,并且需要进行大量的数据计算,包括RTD函数的标准化和物料平衡的检验。阶跃法最大的优点是无需进行大量的数据计算得到RTD函数,缺点是示踪剂使用量大,容易造成密度流。理论上,脉冲法和阶跃法在对反应器的平均停留时间及流态检验中具有相同的结论。

定义理论停留时间为人工净化湿地系统体积与流量的比值。实际上,在某一时刻进入系统的液体体积所包含的无数微元种,每一微元在系统中的停留时间都是不相同的。这种现象称为停留时间的展形。为了描述和研究这一现象,定义了下列函数。

$C(t)$ (concentration function)曲线是由反应器出口处示踪剂浓度随时间的变化绘制而成,是由流态实验得到的未经处理的原数据。一般情况下,需要将其归一化得到停留时间分布函数 $E(t)$ (residence distribution function)曲线进行分析。

$E(t)$ 定义为:

$$E(t) = C(t) / \int_0^{\infty} C(t) dt \quad (1)$$

$$\text{或 } E(t) = C(t) / \sum_{i=0}^n \frac{C(t_i) + C(t_{i+1})}{2} \Delta t \quad (2)$$

式(1)和(2)中,分母代表反应器中加入的示踪剂总量,但示踪剂的流出量变化很大时, $E(t)$ 的计算结果会因为总量的计算出现明显的不同。为了避免这种情况,定义使用示踪剂的流出量为计算依据。在某一时刻从反应器流出的物质中,在反应器内曾经停留在 t_1 与 $t_1 + dt_1$ 时间间隔内所占的分

数等于 $E(t)dt_1$ 。累计液龄分布函数 $F(t)$ (cumulative exit-age distribution function)定义为对 $E(t)$ 从0到 t 的累积,其意义为,在这段时间流出反应器的示踪剂累积量占示踪剂总量的比。由其定义可以得到:

$$F(t) = \int_0^t E(t) dt = \int_0^t \left(\int_0^t C(t) dt / \int_0^{\infty} C(t) dt \right) dt; E(t) = dF(t)/dt \quad (3)$$

为了避免除曲线形状外的因素对曲线形状造成影响,需要对得到的数据进行进一步的规范化。使用无因次函数,定义 $\theta = t/\tau$, τ 为理论停留时间,则 $E(t)$ 和 $F(t)$ 函数分布可以转换为 $E(\theta) = \tau E(t)$; $E(\theta) = F(t)$ 。

平均停留时间($\bar{t}$)的计算公式为:

$$\bar{t} = \int_0^{2\tau} t E(t) dt \quad (4)$$

轴向的分散系数(d)的计算公式为:

$$d = \frac{\int_0^{2\tau} t^2 E(t) dt}{2\tau^2 \int_0^{2\tau} E(t) dt} - \frac{\bar{t}^2}{2\tau^2} \quad (5)$$

为了更好的说明 $E(t)$ 和 $F(t)$ 函数图形,定义一系列指标对其进行说明(表1)。

表1 响应曲线的指标

Table 1 Indicators of response curve

术 语	定 义
t_i	示踪剂首次出现的时间
t_p	观察到示踪剂峰值浓度的时间
t_g	达到停留时间分布曲线形心的平均时间
t_{10}, t_{50}, t_{90}	10%、50%、90%示踪剂通过系统的时间
t_{90}/t_{10}	Morrill分散指数(Morrill dispersion index, MDI)。理想平推流反应器的MDI值是1,而完全混合系统的MDI值大约为22。
t_i/t	短路指数。对于理想平推流系统,比值为1。随着混合的增强,该值趋近于零。
t_p/t	众数停留时间指数
t_g/t	平均停留时间指数
t_{50}/t	中间停留时间指数

2 实验装置及方法

人工湿地模型装置:长2 m,宽1 cm,高1 m,由整理箱改装而成。湿地内底层填充直径为3~5 cm的碎石30 cm厚,上层为70 cm厚的沙土,不同填料层高度可以调节。处理床上种植芦苇(*Phragmites australis*)。实验在温室内进行。湿地进水通过进水箱重力流入湿地模型装置,从另一端出水口处取水样,装置底部装有泄水阀门(图1)。

仪 器 设 备:LEC6S2-PTC3-091 计 量 泵, DDG-403B(LCD-A)型电导率仪(自带温度补偿), UVmini-1240型紫外可见分光光度计。

实验装置显示(见图1),进水由计量泵从水箱输送到湿地模型,经穿孔管布水,流经填料后,由集水管网收集流出。设计表面负荷为300 L/(m²·d),

模拟降流式时,直接把进水管接到出水管。

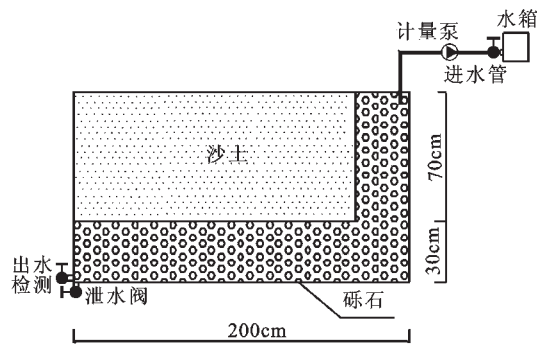


图1 人工湿地结构图

Fig.1 Structure of constructed wetland

采用脉冲加入方法,选取自来水本底水平较
低的罗丹明B和NaCl作为示踪剂进行可行性实
验研究。罗丹明B浓度使用分光光度计在553~
554 nm波长处检测,NaCl使用电导率仪测定出
水示踪剂浓度变化。经验证,填料对罗丹明B和Na-
Cl的吸附很小。计算运行时间为 2τ 的平均停留时
间(mean residence time, MRT)和扩散系数。

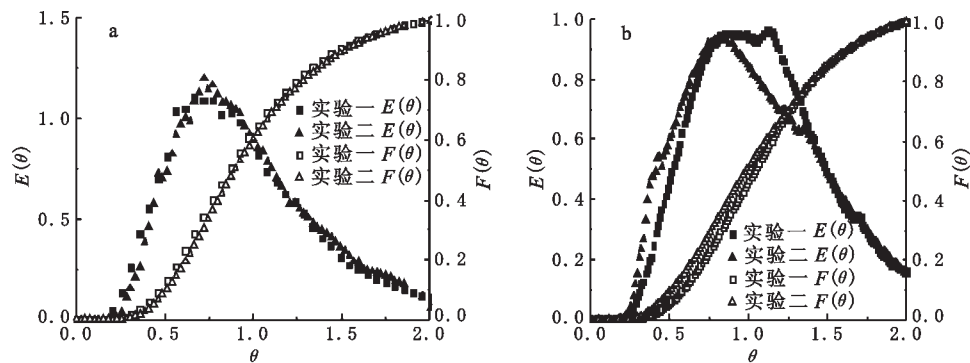


图2 示踪剂罗丹明B(a)和NaCl(b)的停留时间和累计液龄分布函数曲线

Fig.2 Curves of residence distribution function and cumulative exit-age distribution function of
Rhodamine B (a) and NaCl (b) tracer agents

表2 示踪剂罗丹明B和NaCl模拟曲线的表征响应指标和参数

Table 2 Response indexes and parameters of simulation curves of Rhodamine B and NaCl tracer agents

$\tau=12\text{h}$	表征响应指标										参 数			
	t_i	t_μ	t_{10}	t_{50}	t_{90}	t_{90}/t_{10}	t_i/τ	t_μ/τ	t_{50}/τ	t_{90}/τ	回收 率(%)	平均停 留时间	$\bar{t}(\theta)$	d
NaCl平行	2.63	11.00	5.88	10.75	20.19	3.436	0.291	0.219	0.917	0.896	96.198	10.451	0.871	0.070 2
NaCl	2.50	7.88	5.13	10.04	18.13	3.537	0.283	0.208	0.656	0.837	87.9	10.883	0.907	0.064 7
罗丹明B	2.00	6.50	4.75	8.75	16.50	3.474	0.288	0.167	0.542	0.729	92.6	9.645	0.804	0.047 8
罗丹明B 平行	2.50	7.00	5.00	9.00	16.35	3.270	0.306	0.208	0.583	0.750	92.025	9.83	0.819	0.047 2

3 结果与分析

3.1 适合湿地系统流态实验的示踪剂

从图2可以看出,罗丹明B作为示踪剂,两组
平行实验得到的曲线和统计得到的数据基本一
致;而NaCl作为示踪剂时,两组实验得到的曲线
基本不重合,而且对应的平均停留时间、扩散系
数值相差较大(表2)。同时,回收率(流出的示踪剂
和加入的之比)相差很大,说明实验具有很大的偶
然性。因此,NaCl作为示踪剂不适合于湿地系统
的流态实验,应选取罗丹明B作为流态实验的示
踪剂。

3.2 水流注入方式对流态的影响

由图3和表3可以看出,升流式和降流式湿地
的 $E(\theta)$ 图形都是向左倾斜,并且降流式比升流式
倾斜程度大。首次检测到示踪剂、峰值出现时间
还有10%示踪剂流量时间,降流式湿地都比升流
式早1~2 h,但是,90%示踪剂流出的时间却远远
晚于升流式湿地,出现严重的拖尾现象,造成了降

流式湿地的MDI指数高于升流式。因而,降流式湿地的 $F(\theta)$ 曲线的斜率在开始阶段远高于升流式湿地,但是到了 1τ 之后,其 $F(\theta)$ 的上升幅度远低于升流式湿地。综合各曲线的指标,显示升流式湿地的流态效果更接近于推流式湿地的流态。

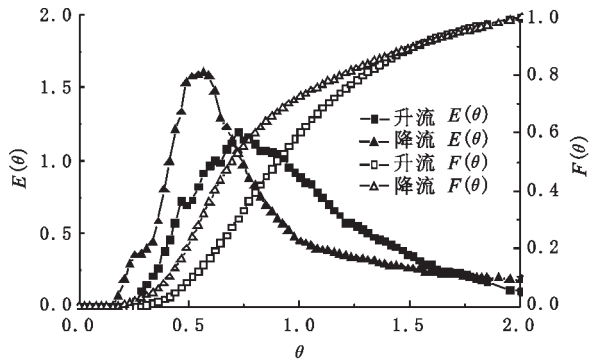


图3 升流式和降流式湿地的示踪剂停留时间和累计液龄分布函数曲线

Fig.3 Curves of residence distribution function and cumulative exit-age distribution function of tracer agents in up-flow and down-flow constructed wetlands

由表3可知,以 2τ 运行时间进行计算,得到升流式湿地的平均停留时间比降流式大,升流式湿地体积效率为82.0%,降流式为76.8%;但是二者扩散系数却相差很大,升流式示踪剂的扩散属于低扩散度,而降流式则是中等扩散。综合以上的分析,升流式湿地比降流式湿地具有更大的体积

效率,降流式湿地中运行无效的体积是由于死区(即水流在此体积内不流动)的增加造成的,并且滞留区(即水流在此体积内流动比较缓慢)的比例一定比升流式湿地的大很多,降流式湿地 $E(\theta)$ 曲线峰后斜率急剧变化但依然有很大的拖尾现象,说明滞留区中流速并不是均匀渐变的,而是比正常区域流速低很多的相对独立的水流。

3.3 填料层高度对流态的影响

由图4和表4可知,不同填料层高度下,示踪剂的回收率相近,这说明实验具有相同的准确程度;不同填料层高度的数据曲线相差不大,上升和下降段基本重合,反映展型及推流程度的 t_i/τ 、 t_μ/τ 和 t_{50}/τ 值基本相同,都是在 0.3τ 左右首次检测到示踪剂的存在, 0.73τ 出现峰值。平均停留时间都在 0.85τ 以上。从对应的扩散系数来看,填料层高度为54 cm最好,其两边的展型最为对称,最符合正态分布。在 $E(\theta)$ 曲线的最后一段,其 $E(t)$ 值也最小,说明滞留区占比例很小,因而其水流在有效利用的体积中流态更为接近推流式,但是死区所占的比例要相对于其他高度偏大,因而造成了填料层高度为54 cm时的 $\bar{t}$ 却最小,其他高度由于死区相对较小,流速渐变的滞留区比例较大,造成总体水流的示踪剂扩散系数更大。可以看出,随着填料层高度的增加,有效填料层体积先下降后升高,

表3 不同水力流态模拟曲线的表征响应指标和参数

Table 3 Response indexes and parameters of the simulation curves of different hydraulic flow states

$\tau=12\text{h}$	表征响应指标									参 数					
	t_i	t_μ	t_{10}	t_{50}	t_{90}	t_{90}/t_{10}	t_i/τ	t_μ/τ	t_{50}/τ	运行 时间	回收 率(%)	$\bar{t}(h)$	$\bar{t}(\theta)$	$\delta^2(\theta)$	d
升流式	2.50	7.00	5.00	9.00	16.35	3.27	0.208	0.583	0.750	2 τ	92.03	9.83	0.820	0.095	0.047
										3 τ	93.38	10.11	0.842	0.127	0.064
降流式	1.75	5.50	4.10	7.63	23.00	5.61	0.146	0.458	0.636	2 τ	70.89	9.22	0.768	0.191	0.096
										3 τ	77.50	10.91	0.909	0.381	0.190

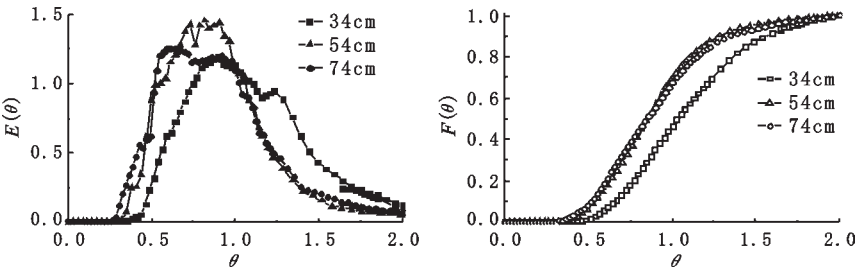


图4 填料层高度不同的湿地的示踪剂停留时间和累计液龄分布函数曲线

Fig.4 Curves of residence distribution function and cumulative exit-age distribution function of tracer agents in the constructed wetlands with different filler heights

表4 填料层高度不同的湿地的模拟曲线的表征响应指标和参数

Table 4 Response indexes and parameters of the simulation curves of the constructed wetlands with different filler heights

填料 高度 (cm)	表征响应指标										参 数					
	$\tau(h)$	t_i	t_μ	t_{10}	t_{50}	t_{90}	t_{90}/t_{10}	t_d/τ	t_μ/τ	t_{50}/τ	运行 时间	回收 率(%)	$\bar{t}(h)$	$\bar{t}(\theta)$	$\delta^2(\theta)$	d
34	12	3.50	8.75	6.50	10.50	18.00	2.769	0.292	0.729	0.875	2 τ	85.7	11.0	0.920	0.072	0.036
											3 τ	89.3	11.8	0.981	0.158	0.079
54	19	5.50	14.00	9.34	14.88	24.00	2.570	0.289	0.737	0.783	2 τ	85.7	15.7	0.827	0.054	0.027
											3 τ	88.2	16.6	0.873	0.125	0.063
74	26	7.00	20.00	12.75	21.50	38.00	2.980	0.269	0.769	0.827	2 τ	85.5	22.4	0.861	0.087	0.043
											3 τ	89.3	24.1	0.929	0.182	0.091

死区却先增加后下降 ,滞留区作为有效体积的一部分 ,也呈现先下降后上升的趋势。

4 结 论

罗丹明B作为流态实验的示踪剂具有良好的效果。罗丹明B的化学稳定性好 ,对光、时间和热的稳定性良好 ,且不易吸附在表面上 ,对分散情况的研究特别有用 ,因此具有较好的效果。

升流式人工湿地比降流式人工湿地处理效果好。升流式人工湿地系统中微生物膜形成较快 ,容积负荷比较高。降流式人工湿地滤池中微生物几乎全部附着在填料和反应器表面 ,有助于克服堵塞问题 ,但是膜的形成比较慢 ,容积负荷也较低。人工湿地填料层高度对示踪剂停留时间分布影响不大 ,体积利用率都在80%以上。

参考文献

[1]郭一令,高 恺,李云峰. 耕作层下土地自然净化技术处理村镇生活污水[J]. 中国给水排水, 2009, 25(10): 59~61.

[2]张 清. 人工湿地的构建与应用[J]. 湿地科学, 2011, 9(4): 373~379.

[3]Holland J F, Matin J F, Granata T, *et al.* Effects of wetland depth and flow rate on residence time distribution characteristic[J]. Ecological Engineering, 2004, 9(3): 189-203.

[4]Olivet D, Valls J, M Àngels Gordillo, *et al.* Application of residence time distribution technique to the study of the hydrodynamic behaviour of a full-scale wastewater treatment plant plug-flow bioreactor[J]. Chemical Technology and Biotechnology, 2005, 80 (4): 425-432.

[5]Wright P R, Liu X, Glasser B J. A fluidized bed adsorption labora-

tory experiment[J]. Chemical Engineering Education, 2004, 38(1): 14-21.

[6]Zhang Tongwang, Wang Tiefen, Wang Jinfu. Mathematical modeling of the residence time distribution in loop reactors[J]. Chemical Engineering and Processing, 2005, 44(11): 1 221-1 227.

[7]Liem L E, Stanley S J, Smith D W. Residence time distribution analysis as related to the effective contact time[J]. Canadian Journal Of Civil Engineering, 1999, 26(2): 135-144.

[8]Gao Y J, Vanarase A, Muzzio F, *et al.* Characterizing continuous powder mixing using residence time distribution[J]. Chemical Engineering Science, 2011, 66(3): 417-425.

Influence of Mode of Water Injection and Height of Packing Layer on Hydraulic Flow State of Constructed Wetland

JIANG Shao-Jie, HUANG Xin-Li, XIANG Ping

(Faculty of Urban Construction and Environmental Engineering, Chongqing University,
Chongqing 400045, P.R.China)

Abstract: As an efficient tool in the evaluation of the operational process and material reaction time in the constructed wetland, hydraulic simulation experiment plays a significant role in wastewater treatment. The hydraulic simulation was carried by using NaCl and Rodin Ming B as the tracer agents in the wetland system, which Rodin Ming B was selected as the tracer agent to appraise the lifting and lowering flow and the hydraulic flow state of packing layer height for the lower background density and the better reproduction quality. It was showed that the up-flow system has a better effect than the down-flow system in this experiment. The volume utilization ratios of hydraulic retention time were 82% and 76.8% respectively. In the invalid volume the dead area accounted for a greater proportion in up-flow system, while the detention area accounted for the greater proportion in down-flow system. The height of packing layer had little influence on the distribution of the resident time for the utilization ratio of volume was above 80%, however, the proportion of the dead area and the detention area in the invalid volume varied with height of packing layer in the constructed wetland. With the increase of height of packing layer, the dead area increased and then decreased, but the detention area first decreased and then increased.

Keywords: constructed wetland; hydraulic retention time (HRT); hydraulic flow state; up flow ;down flow; tracer agent; packing layer