

W-SFCW 和 SFCW 的水流特性试验研究

郑天柱^{1,2}, 何成达², 谈 玲²

(1. 河海大学环境科学与工程学院, 江苏 南京 210098; 2. 扬州大学环境科学与工程学院, 江苏 扬州 225009)

摘要 运用化学工程中反应器理论, 试验分析波式潜流人工湿地(W-SFCW)中的停留时间分布。比较分析传统潜流湿地和理想反应器的流态特征, 得出结论: 在同样的水力负荷条件下, 相对传统潜流人工湿地(SFCW), W-SFCW 具有将污染物浓度降到同一浓度值所需时间更短、去除效率更高的内在机制。

关键词 波式潜流人工湿地; 传统潜流人工湿地; 停留时间分布; 水流特性

中图分类号 :TV131 **文献标识码** :A **文章编号** :1004-693X(2008)02-0018-04

Experimental study of flow characters of W-SFCW and SFCW

ZHENG Tian-zhu^{1,2}, HE Cheng-da², TAN Ling²

(1. College of Environmental Science and Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. School of Environmental Science and Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225009, China)

Abstract The residence time distribution in W-SFCW system experiments was studied using the reactor theory, from chemical engineering. Based on analyses and comparisons of the flow characters of SFCW and an ideal reactor, it is concluded that the W-SFCW system has shorter treatment time and higher removal efficiency than an SFCW system under the same hydraulic loading.

Key words W-SFCW; SFCW; residence time distribution; flow character

人工湿地的水流理论停留时间和实际平均停留时间相差很大, 说明原先认为水流在湿地中呈推流的假设过于理想化地估计了实际水流状况。实际上, 两种湿地的流态均介于推流与完全混合流之间, 从停留时间分布曲线来看, 波式潜流人工湿地(W-SFCW)的响应曲线接近理想推流反应器的脉冲响应, 滞留区也比传统潜流人工湿地(SFCW)的小。

采用示踪剂试验方法得到 W-SFCW 和 SFCW 的停留时间分布(RTD), 据此, 对 W-SFCW 实际液流流态进行模拟, 提出理想反应器模型模拟波式潜流人工湿地系统中水流的流动形态, 以此加深对波式潜流人工湿地工艺过程的认识, 有助于深入研究湿地系统“黑箱”净化机理。

根据两类湿地的 RTD 分析, W-SFCW 比 SFCW 更接近推流反应器。对于一级反应, 推流不仅比混合流所需要的反应器容积小, 而且反应物浓度降到

同一浓度值所需反应时间更短, 即反应的效率更高^[1], 因此波式潜流人工湿地的水流形态更接近于推流, 反应效果也更好。

1 材料和方法

1.1 动态吸附试验

人工湿地床类似于化工反应器中的填料反应器, 但它内填的介质都具有很大的比表面积(介质的孔隙率约在 0.45~0.65 之间, 介质最大有效粒径一般小于 25 mm), 吸附能力很强, 且具有活性的植物根系和介质表面附着的生物膜。因此, 用于人工湿地床中的示踪剂除了具有经典的“刺激-应答”特性外, 更重要的是应具有良好的稳定性, 即人工湿地床中介质的吸附能力最大, 吸附后的稳定性最好, 即解吸能力最小。针对不同示踪剂在人工湿地中的吸附能力, 将染料类示踪剂如硫化草绿、硫化黑、直接红棕、阳离子红和食

盐示踪剂做了对比试验,结果表明^[2],人工湿地床对 NaCl 吸附能力最小,在静态吸附试验条件下,吸附率为 1.66%,在动态吸附时,吸附率为 0。

本试验选用 KCl 作为示踪剂,在示踪试验之前,为了测试湿地基质对 K⁺ 和 Cl⁻ 的吸附能力做了动态吸附试验,试验方法如下。

在若干个 200 mL 的锥形瓶中由下而上依次分层铺设豆石、砾石和土壤,分别加已知浓度的 KCl 溶液,放在循环振荡器中振荡 6、12、18、24 h 后,分别测定水中 K⁺ 和 Cl⁻ 浓度。投加 2 种不同浓度的 KCl 溶液,每种浓度做 2 个重复样。测定数据发现振荡 18 h 以后,吸附率变化很小,因此假定 24 h 时吸附不再变化。表 1 为振荡 24 h 后 K⁺ 和 Cl⁻ 的浓度。

表 1 KCl 动态吸附试验

Cl ⁻			K ⁺		
吸附前 质量浓度/ (mg·L ⁻¹)	吸附后 质量浓度/ (mg·L ⁻¹)	吸附 率/%	吸附前 质量浓度/ (mg·L ⁻¹)	吸附后 质量浓度/ (mg·L ⁻¹)	吸附 率/%
237.9	235.9	0.8	262.4	144.0	45.1
	234.6	1.4		140.0	46.6
964.4	951.7	1.3	1064.1	568.0	46.6
	955.1	1.0		608.0	42.9

试验发现,基质对 K⁺ 的吸附率平均达到了 45.3%。究其原因,土壤颗粒带负电荷,带正电的 K⁺ 易被其吸附在表面,因此 K⁺ 不能作为示踪离子。Cl⁻ 平均吸附率只有 1.1%,损失不到 10%,因此本试验以 Cl⁻ 作为示踪离子分析。

1.2 试验内容及方法

试验采用 Cl⁻ 作为示踪剂,通过测定湿地系统出水的 Cl⁻ 浓度以期得到系统介质中水流停留时间分布。试验采用脉冲输入示踪剂,即 KCl 在零时刻一次性投入。每隔 1 h 测定湿地系统出水流量、Cl⁻ 浓度,直至出水 Cl⁻ 累积量达到投入量的 95% 时为一个试验周期。通过沿 2 个湿地的边侧各设置 2 个采样点(分别距离进水口 0.5 m、2 m 处)(如图 1 2),取样测定沿程 Cl⁻ 停留时间分布。

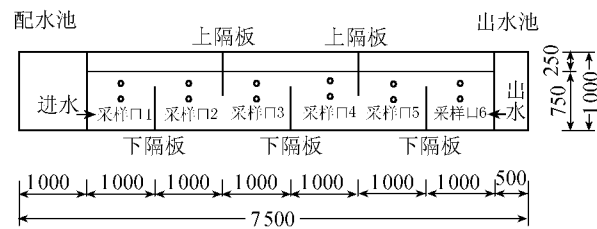


图 1 W-SFCW 立面图

两个湿地单元的进水流量相等,分别为 900 L/d,进水负荷为 100 L/(m²·d)。每个湿地进水槽加入 KCl 3000 g,一次性投加后混合均匀,此刻记时 t = 0。Cl⁻ 浓度采用硝酸银滴定法,参照文献[3]。

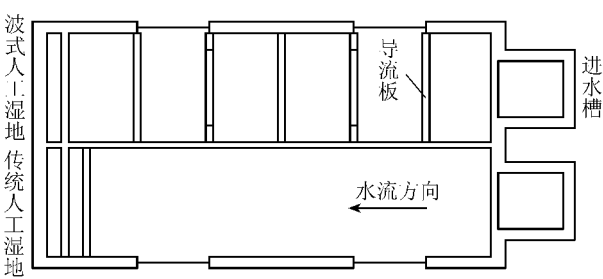


图 2 W-SFCW 和 SFCW 的平面图

2 结果与分析

2.1 理论停留时间

在理论上,污水在湿地系统中的水力停留时间可由湿地系统的尺寸、流量及介质的孔隙率得出,前提是假定湿地内部水流呈推流形式,其数学表达式为

$$t = \frac{nV}{Q}$$

式中:n 为湿地介质的孔隙率,本湿地测定为 0.41;t 为理论水力停留时间,d;V 为系统的几何体积,m³, (湿地长 6 m,净宽 1.5 m,净深 0.75 m);Q 为湿地系统的流量,m³/d,本试验实际流量为 0.90 m³/d。

经计算,W-SFCW 流入人工湿地系统当流量为 900 L/d,即水力负荷为 100 L/(m²·d)时,湿地系统水流的理论停留时间为 73.8 h。

2.2 实际停留时间

图 3 和图 5 为 W-SFCW 和 SFCW 系统在水力负荷为 100 L/(m²·d)下出水示踪剂停留时间分布曲线。图 4 和图 6 为潜流人工湿地累积停留时间分布曲线。

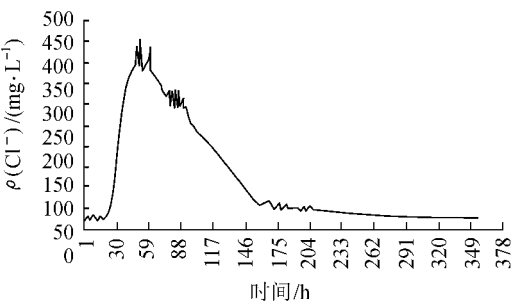


图 3 波式人工湿地出水氯浓度变化

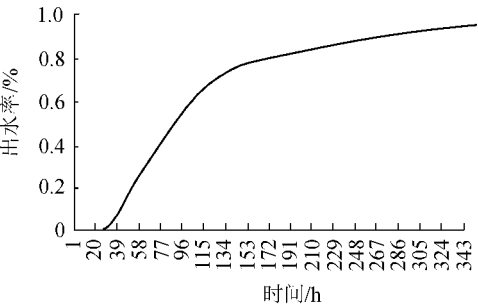


图 4 波式人工湿地累积曲线

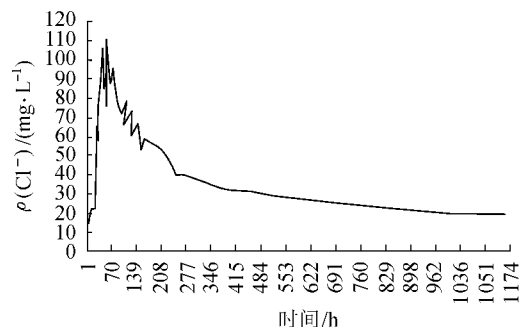


图5 传统湿地出水氯浓度变化

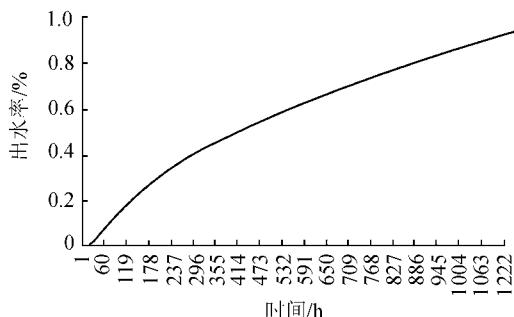


图6 传统湿地累积曲线

图3和图5中曲线显示:示踪剂在试验开始以后逐渐流出系统的过程,其中在 $t = 60\text{ h}$ 时,流出示踪剂的量达到最大值。这一过程实际上反映了水流在湿地中停留的状况,因而曲线被称为停留时间分布(RTD)。根据图3中RTD曲线的形状可看出每个流体单元流经的停留时间不相一致,水流在整个介质中呈不均匀流动状态。这是由于系统中植物根系的延伸、固体物沉积、生物膜的形成等使基质内部容水间隙分布不均,另外液流本身也存在扩散作用^[4-5]。曲线最后的较长拖尾反映了一部分流体的停留时间较长,说明湿地内部水流仍存在滞留区。

由于RTD的形状反映了流体流动的状况,对该类型曲线用2个特征值加以描述,一个特征值为均值,即平均停留时间 τ ,表达式为

$$\tau = \frac{\sum t c(t) \Delta t}{\sum c(t) \Delta t}$$

另一特征值为方差 σ_{θ}^2 ,表达式为

$$\sigma_{\theta}^2 = \frac{\sum t^2 c(t) \Delta t}{\tau^2 \sum c(t) \Delta t}$$

反应器理论认为流态有2种理想情况。一是理想推流(PF),即同时进入反应器的流体经过相同的路径,以同样的停留时间流出反应器,分布曲线RTD的方差 $\sigma_{\theta}^2 = 0$ 。另一种为理想的完全混合流(CSTR),这时反应器中水流呈完全混合状态,反应器内每一处的反应物浓度均相同,分布曲线RTD方差 $\sigma_{\theta}^2 = 1$ 。对于一级反应而言,推流不仅比混合流

所需要的反应器容积小,而且反应物降到同一浓度所需反应历时更短,即反应的效率更高,因此波式湿地中水流更接近于推流,反应的效果也更好。

将两种湿地单元的示踪剂 Cl^- 出流浓度的数据代入上述公式,结果为: $\tau_{\text{波}} = 105.9\text{ h}$, $\sigma_{\theta\text{波}}^2 = 0.468$; $\tau_{\text{传}} = 450.7\text{ h}$, $\sigma_{\theta\text{传}}^2 = 0.561$ 。波式湿地的 σ_{θ}^2 小于传统湿地,说明波式湿地从系统流出的示踪剂较为集中,更接近于理想推流,因此去除污染物的效率更高。

2.3 理论平均停留时间与实际平均停留时间的比较

理论平均停留时间 t 与按RTD所得到的实际平均停留时间 τ 相比,两者存在明显差异,这是因为,湿地设计是假设水流呈推流式^[6-7],这样就可能过于理想化地估计实际水流状况。对于湿地而言,推流的假设在多数情况下会过低估算实际停留时间。

图7中可以看出,相对于W-SFCW而言,SFCW出水的拖尾较长,说明SFCW内部死区很大(死区指的是流体停留时间比通过系统的总平均停留时间长得多的那个区域,可以从曲线的延长程度反映出死区的大小)。分析可知:由于W-SFCW中设置了导流板,水流反复呈波浪式流动,有利于湿地底部和两侧滞留区中的水不断被向前推动,而SFCW中水流在土壤颗粒的孔隙中缓慢渗流,因此从湿地土壤利用率上考虑,W-SFCW明显优于SFCW,W-SFCW在去除污水COD、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 等效率上明显高于SFCW,且土壤含氮、磷量也高于SFCW,从这一角度可以了解波式潜流人工湿地去除效果提高的原因。

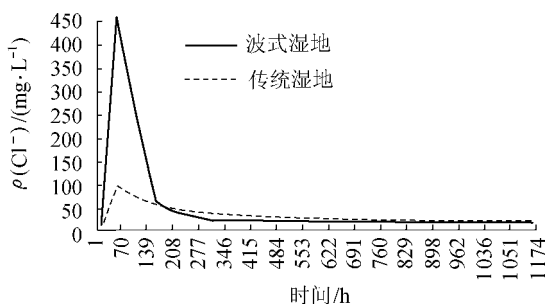


图7 两种湿地出水氯浓度变化比较

两种湿地出流水示踪剂出现峰值的时间较为一致,说明两个湿地单元大部分水流的流动状况还是相近的,但W-SFCW出现峰值的水流较为集中,说明W-SFCW更接近于推流和假定的理想流态是接近的。

2.4 波式湿地与传统湿地RTD图形比较分析

从两种湿地单元RTD的形状来看,波式湿地的输出波峰明显,拖尾较短,更接近于脉冲输入的理想PF反应器出流形式(图8),而传统湿地出水RTD类似脉冲输入的理想CSTR反应器出流形式(图9)。

2.5 波式湿地与传统湿地沿程浓度分析

湿地边侧设置的采样口1和2(图1,2),高度距

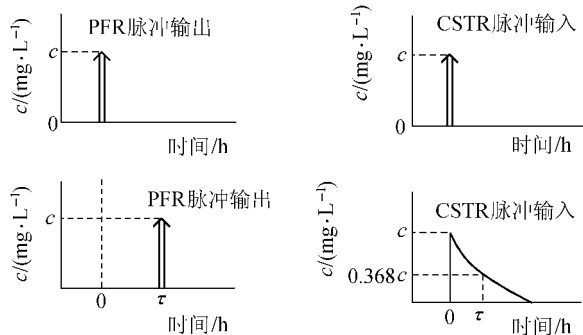


图 8 脉冲输入 PF 反应器的出流形式 图 9 脉冲输入 CSTR 反应器的出流形式

底部 0.5 cm。采样口 3 点则是出水口取样,其中北 1 和南 1 距离进水口 0.5 m,北 2 和南 2 距离进水口 2 m。

图 10 为 W-SFCW 的沿程 3 点 Cl^- 浓度变化曲线,可以看出,W-SFCW 的沿程 3 个点的出流变化符合推流理论,沿程变化明显,最靠近进水口处的 1 点最先出现集中出流,且集中出流的 Cl^- 浓度高,但其浓度下降也快。沿着水流方向,沿程各点出现峰值的时间逐渐退后,峰值也渐小,拖尾逐渐拉长,这是因为水流依次流经 1 点、2 点和 3 点,而滞留区也在不断变大。

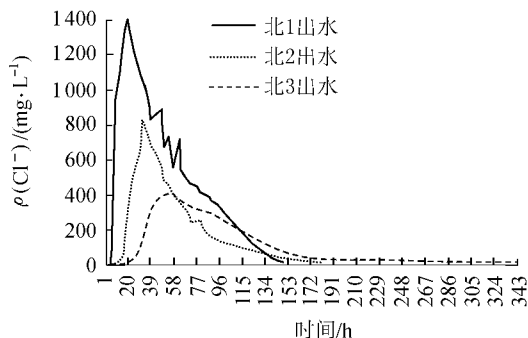


图 10 W-SFCW 沿程氯离子浓度变化

图 11 为 SFCW 的沿程 3 点 Cl^- 浓度变化曲线,图 3 中可见,SFCW 的 1 和 2 点也出现类似波式湿地沿程变化的规律,而 3 点却比 1 和 2 提前出现了峰值,由此分析,1 和 2 是靠湿地一侧的,当水流在传统湿地内流动时,中间的水流如果没有来得及扩散

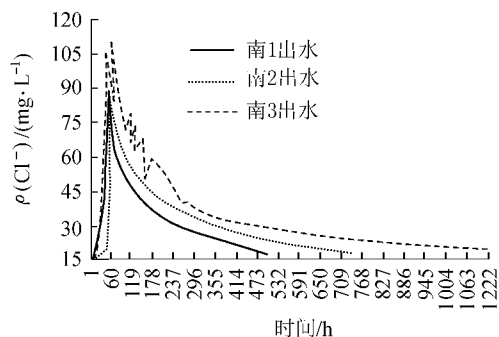


图 11 SFCW 沿程氯离子浓度变化

到两侧就直接流到出水口,则 3 点出现峰值的时间就短于 1 和 2 点了。这说明传统湿地的有效截面积相对缩小了,两侧的部分犹如死区,内部水流速度较小,因而最终流出湿地的时间就拉长了。

2.6 两个湿地内部流态分析

图 12 为 N 个串联 CSTR 停留时间分布($\tau = 105.9 \text{ h}$)。分析可知,W-SFCW 和 $N = 3$ 串联 CSTR 的停留时间分布较为相近,相对而言,示踪剂集中出现的时间提前了约 20 h,说明 W-SFCW 的流态接近 3 个串联的 CSTR。相对于 $N = 3$ 串联的 CSTR 停留时间分布来看,W-SFCW 的拖尾也较长,反映出实际潜流湿地中滞留区的存在。

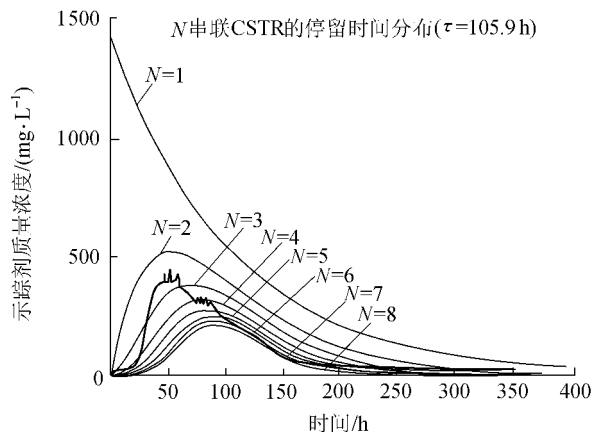


图 12 W-SFCW 与 N 个串联 CSTR 反应器流态比较

图 13 为 N 个串联 CSTR 停留时间分布($\tau = 450.7 \text{ h}$)。分析可知,SFCW 停留时间分布和 $N = 1$ 的 CSTR 形状相似,但 SFCW 中示踪剂集中出现时间推后,这和实际情况是相吻合的,因为示踪剂从进水口流入,需要一段扩散时间才能流到出水口的位置,而不同于理想的 CSTR。

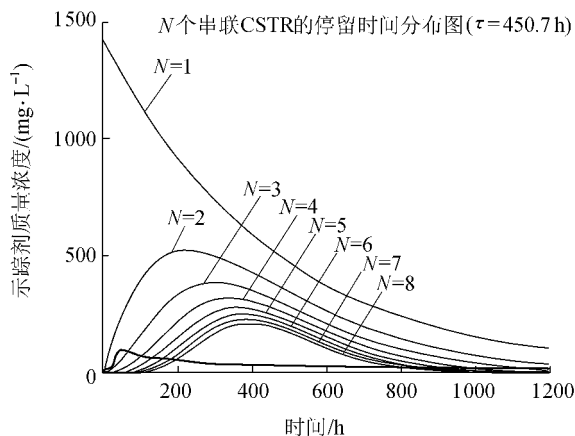


图 13 SFCW 与 N 个串联 CSTR 反应器流态比较

因此,比较两个湿地内部流态,W-SFCW 更接近于 PF,相当于是 $N \rightarrow \infty$ 的 CSTR 串联运行。 N 越大,则越接近于 PF。

(下转第 37 页)

一个重要方面。主要考虑采用 3 种方式进行外调水 ①利用卧虎山水库放水,通过玉符河向小清河补水 ②利用平阴县田山一级泵站提取黄河水,经沉沙池澄清后沿南水北调济平干渠送入小清河;③当黄河水位高于玉符河入黄口处河底高程时,引黄河水入玉符河,通过睦里闸直接引水入小清河。

c. 水环境承载力大小还与污水回用量有关。目前小清河的污水回用率为 0.33%,还有很大的发展潜力。提高污水回用量,在某种程度上缓解了用水紧张矛盾,增加了水资源可利用量,间接提高了水环境承载力。

d. 可以通过调整产业结构,采用先进科技手段,提高用水效率,增加厂内污水处理能力,改善河道排水条件等措施,以减小污水排放量,从而减轻对水环境的压力。

e. 城市发展规模是否能满足水环境承载力的要求还与水资源利用效率有关。水资源利用效率包括工农业用水、生活用水等效率,其相应的指标有单位 GDP 水耗、农业灌溉用水定额、生活用水定额等。可以通过节约用水,改善用水条件,提高水资源利用效率,以确保环境用水,间接提高水环境承载力。

(上接第 21 页)

3 结 论

a. 运用测定 Cl^- 的试验方法得到污水在 W-SFCW 和 SFCW 中停留时间分布 RTD,在水力负荷为 $100 L/(m^2 \cdot d)$ 时,根据 RTD 计算出 W-SFCW 的实际平均停留时间为 105.9 h,而 SFCW 则为 450.7 h,这说明两种湿地均避免了湿地易出现的污水“短路”现象,同时也证实实测停留时间与湿地设计中采用的停留时间理论计算值的偏差。

b. 运用示踪剂试验所得的污水停留时间分布函数对潜流人工湿地内部水流流态进行了流态分析,W-SFCW 的分散程度比 SFCW 的小,证明 W-SFCW 流态接近于推流,也更有利于污染物的有效去除。

c. W-SFCW 流态上接近 3 个串联的 CSTR。相对于 $N = 3$ 串联的 CSTR 停留时间分布来看,W-SFCW 的拖尾也较长,反映出实际潜流湿地中滞留区的存在。SFCW 停留时间分布和 $N = 1$ 的 CSTR 形状相似,比较可知,由于 SFCW 滞留区较大,RTD 图的拖尾较长。

d. 从沿程 3 个测点的停留时间分布来看,水流在 SFCW 内流动时,中间的水流没有来得及扩散到两侧就直接流至出水口,因此 SFCW 的有效截面积

参考文献:

[1] 崔凤军. 城市水环境承载力及其实证研究[J]. 自然资源学报, 1998, 13(1): 58-62.

[2] 马文敏, 李淑霞, 康金虎. 西北干旱区域城市水环境承载力分析方法研究进展[J]. 宁夏农学院学报, 2002, 23(4): 68-70.

[3] 廖文根. 水环境承载力及其评价体系探讨[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2002, 1(1): 1-8.

[4] 汪彦博, 王嵩峰, 周培疆. 石家庄市水环境承载力的系统动力学研究[J]. 环境科学与技术, 2006, 29(3): 26-28.

[5] 韩娜娜. 山西桑干河流域水环境承载力研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2005.

[6] 蒋晓辉, 黄强, 惠泱河, 等. 陕西关中地区水环境承载力研究[J]. 环境科学, 2000, 21(2): 20-23.

[7] 郭怀成, 唐剑武. 城市水环境与社会经济持续发展对策研究[J]. 环境科学学报, 1995, 15(3): 363-369.

[8] 郭怀成, 徐云麟, 洪志明, 等. 我国新经济开发区水环境规划研究[J]. 环境科学进展, 1994, 14(4): 14-22.

[9] 刘艳玲. 区域水环境承载力的可持续发展研究: 以长春市为例[D]. 长春: 东北师范大学, 2002.

(收稿日期 2006-10-13 编辑 徐 娟)

相对缩小,两侧的部分犹如死区,内部水流速度较小,这影响了湿地去除污染物的效率,而 W-SFCW 有效改善了这一状况,这是由于 W-SFCW 中水流反复呈波浪式流动,有利于湿地底部和两侧滞留区中的水不断被向前推动,在湿地土壤利用率上,明显较 SFCW 优越。

参考文献:

[1] 戚以政, 汪叔雄. 生化反应动力学与反应器[M]. 北京: 化学工业出版社, 1999: 345-379.

[2] 高拯民, 李宪法. 城市污水土地处理利用设计手册[M]. 北京: 中国标准出版社, 1991: 242.

[3] 国家环保总局. 水和废水分析方法[M]. 3 版. 北京: 中国环境科学出版社, 1989.

[4] 付贵萍. 垂直流人工湿地系统中水流规律的研究[J]. 环境科学学报, 2001, 21(6): 720-725.

[5] 肖艳, 叶旌, 杨敦. Monod 模型在潜流式人工湿地中的应用探讨[J]. 环境技术, 2003(2): 21-25.

[6] SAPKOTA D P. Gravel media filtration as a constructed wetland component for the reduction of suspended solids from maturation pond effluent[J]. Water Science Technology, 1994, 29(4): 55-57.

[7] PETER F B. A mass balance method for assessing the potential of artificial wetlands for wastewater treatment[J]. Water Resources, 1990, 24(6): 689-697.

(收稿日期 2007-01-05 编辑 高渭文)