

复合垂直流人工湿地处理养殖废水的 TSS 动态研究

谢小龙^{1,2}, 吴振斌¹, 徐 栋^{1,2}, 贺 锋¹, 成水平¹, 梁 威¹

(1.中国科学院水生生物研究所淡水生态与生物技术国家重点实验室, 湖北 武汉 430072; 2.中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘 要:采用复合垂直流人工湿地系统,研究了人工湿地处理养殖废水过程中,湿地基质空隙中 TSS (Total Suspended Solids) 的动态变化及去除规律。中试实验结果表明,系统对 TSS 有良好的净化效果,平均去除率达到 70%。循环养殖废水在复合垂直流人工湿地流动时,TSS 的去除主要发生在下行池单元上层区域,沿水流方向,随着距离的延长,TSS 的降解速率呈现先快后慢的趋势,同时根据动态变化曲线形式,建立了该实验条件下 TSS 在湿地床内沿程动态变化模型: $C_L = C_0 \exp(2.967 \times 10^{-4} L^2 - 0.043 16 L)$,相关分析和误差分析结果表明,该模型预测值与实验监测值呈高度相关($S_y=0.03, r=0.925 8$)。

关键词:人工湿地;TSS;动态变化;模型

中图分类号:X713 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-2043(2008)01-0312-06

Removal of TSS in Aquaculture Wastewater Treated with Integrated Vertical Constructed Wetland

XIE Xiao-long^{1,2}, WU Zhen-bin¹, XU Dong^{1,2}, HE Feng¹, CHENG Shui-ping¹, LIANG Wei¹

(1.State Key Laboratory of Freshwater Ecology and Biotechnology, Institute of Hydrobiology, the Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430072, China; 2.Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: The study was to examine the TSS dynamic characteristics in inter-mediate, and to establish the TSS model between the predicted and experimental data of aquaculture wastewater treated with integrated vertical constructed wetlands (IVCW) in sub-tropical Wuhan, China. The TSS removal efficiency was rather high in the plot-scale experimental system of IVCW, with the average removal rate about 70% during recirculation process. Along the wastewater flow direction, the removal efficiency of TSS was fast in the front part then slowed down in the other parts. According to the TSS dynamic curves, a TSS model was set up as follows: $C_L = C_0 \exp(2.967 \times 10^{-4} L^2 - 0.043 16 L)$. Based on the correlation and error analysis, the predicted data and experimental results were highly correlated with $S_y=0.03$ and $r=0.925 8$.

Keywords: constructed wetland; TSS; dynamic; model

随着生活水平不断提高,人们对水产品需求量与日俱增,使集约化水产养殖成为热点^[1,2]。随着该产业的不断扩大和进一步发展,养殖水体污染问题愈发严重,也逐渐成为人们关注的焦点^[3]。在水产养殖中,水体的好坏主要受总悬浮物(Total Suspended Solids, TSS)、N、P和溶解氧(DO)的影响比较大,这些指标

的高低直接影响水产养殖的成败^[2],而养殖水体的好坏是判断一种养殖方式的关键因素^[1]。据文献报道^[4],养殖过程中投放饲料所含的营养成分仅很少一部分被鱼利用,而大部分饲料及鱼排泄代谢物则转化为水体污染物质,导致水质恶化,同时水质的恶化又制约了水产养殖业发展和高品质鱼的养殖。因此,水产养殖废水的处理和循环应用问题亟待解决。国外 David Rogers Tilley 等^[5]通过人工湿地系统对养虾废水进行循环过滤已取得一定成效,而采用复合垂直流人工湿地(Integrated Vertical Constructed Wetland, IVCW)来处理高品质鱼养殖废水的研究尚未见报道^[6]。

目前对人工湿地去除污染物的研究多集中在对进、出水水质指标进行比较,得出系统对该物质的去

收稿日期:2007-03-07

基金项目:国家杰出青年基金项目(39925007);湖北省科技攻关重大项目(2006AA305A03);国家重大科技专项“受污染城市水体修复技术与示范工程”(2002AA60121)

作者简介:谢小龙(1982—),男,江西临川人,在读博士研究生,主要从事水处理工艺优化与生态工程研究。

E-mail:xxl594518@163.com

通讯作者:吴振斌 E-mail:wuzb@ihb.ac.cn

除率,对污染物质在湿地床内沿程动态变化和空间分布研究较少。污染物沿程动态研究更有助于全面了解人工湿地系统净化污水的机理,为揭示人工湿地净化“黑箱”问题及湿地设计提供科学根据。

本试验将水产养殖池塘与复合垂直流人工湿地有机结合进行循环再利用的尝试,探讨人工湿地控制水产养殖中 TSS 的可行性及 TSS 在人工湿地中的动态变化和去除模型预测。

1 实验装置与方法

1.1 复合垂直流人工湿地系统基本构造

本实验在湖北省武汉市官桥实验基地进行。系统采用复合垂直流工艺^[9],总占地面积为 330 m²,平行二组(分别称为 A 组和 B 组湿地,简称 plot A 和 plot B),每组由下行池和上行池两个单元串联组成,每个单元规格为 $L \times B \times H = 10 \text{ m} \times 8 \text{ m} \times 1.1 \text{ m}$ (均为湿地

墙的实际尺寸),湿地填料为级配不同的碎石和砾石,下行池为 80 cm,上行池为 70 cm,一般比湿地墙低 20~30 cm,具体形式见图 1。

湿地植物:A 组下行池为黄花美人蕉和水竹间作,上行池种植草皮;B 组下行池为红花美人蕉和水竹间作,上行池种植香蒲、菖蒲和剑麻。

1.2 系统运行方式

系统采用间歇式进水方式,整个系统水流成循环式,即各塘的水经湿地处理后,通过曝气池和曝气沟又回流到各塘(见图 2),各塘水泵抽水分阶段进行。其中 P1、P2、P3 和 P4 为养殖池塘;Wa 下和 Wb 下分别为湿地的下行池而 Wa 上和 Wb 上为各自对应的上行池;S 为湿地采样口平行共 4 个;箭头为水流方向。湿地的进水来自各养殖池塘,由于蒸发、蒸腾等因素的影响会造成各塘水量的减少,为了保证循环养殖的正常运行和鱼的存活,在养殖池塘水深较浅时,需不定期从旁边水塘进行补水。

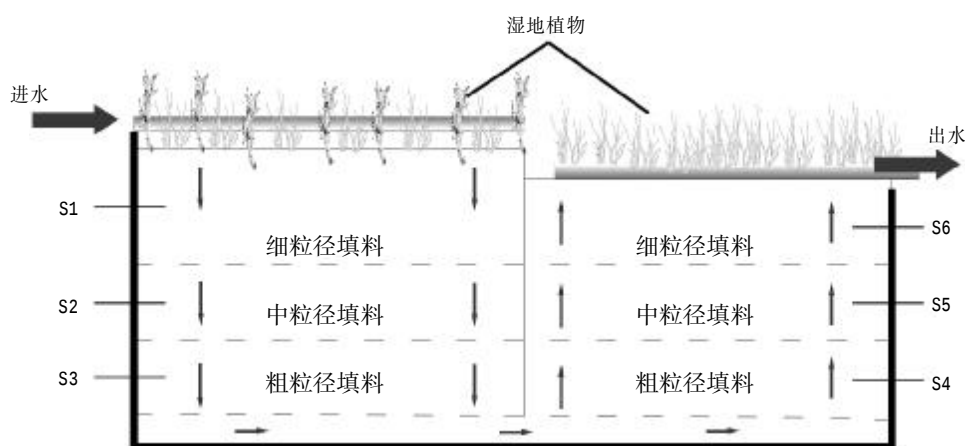


图 1 复合垂直流人工湿地结构示意图

Figure 1 The profile configuration of IVCW

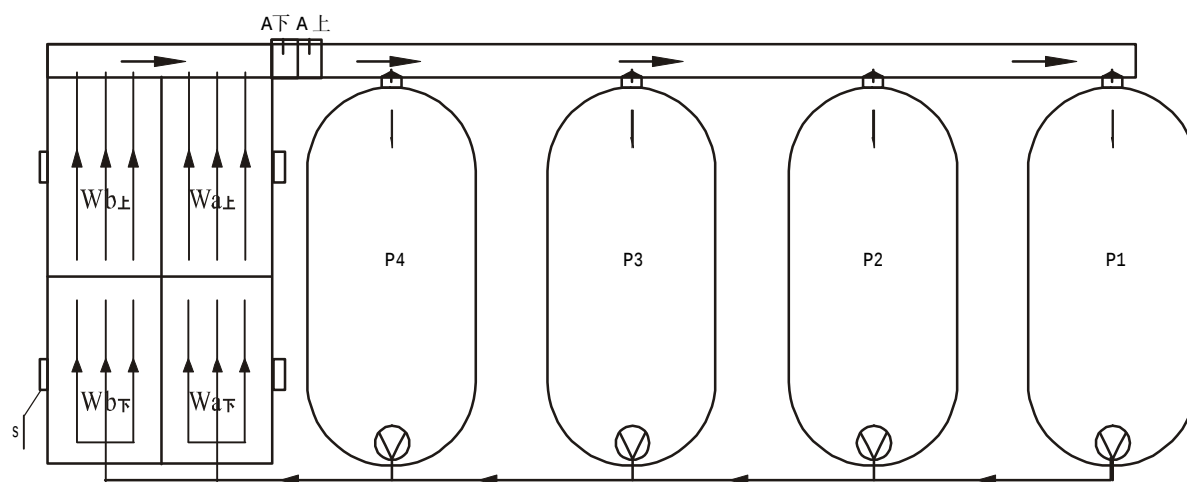


图 2 试验系统构造平面图

Figure 2 The plane map of the experimental system

1.3 系统采样及分析方法

实验期间(2005年6月—12月),每月定期对湿地的进、出水及各层面孔隙水进行采样及 TSS 分析测定,具体采样点见图 1 中湿地进水口(Inlet),S1(一般无该点水样)、S2、S3、S4、S5、S6 及 A、B 湿地出水(plot A/plot B)。测定方法按国家环保局编制的《水和废水监测分析方法》中的滤纸恒重法进行^[9]。实验结果见表 1。

2 实验结果与讨论

2.1 湿地系统中 TSS 进出水变化

本研究是利用人工湿地对鲢鱼鱼苗养殖废水进行循环处理,实验时间为 2005 年 6 月到 12 月,历时

7 个月。期间监测复合人工湿地进出水及各位点 TSS,实验数值见表 1。湿地 TSS 进、出水变化曲线见图 3。

图 3 可以看出,A、B 两组湿地对 TSS 的去除效果接近,平均去除率在 70%,与国外循环处理养虾废水对 TSS 的去除为 65%相当^[4],说明人工湿地在去除水体的悬浮物质方面具有良好的效果。图 3 还可以看出湿地的出水 TSS 一般都在 $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以下,达到了城市污水再生利用景观环境用水水质标准(GB/T 18921—2002)中观赏性景观环境用水中的湖泊类,符合渔业水质标准(GB11607—89)外来 TSS 为 $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以下的标准。因此,利用复合垂直流人工湿地工艺控制养殖水体中 TSS 是一种行之有效的方法。

表 1 复合垂直流人工湿地中 TSS 数据表

Table 1 Data of the TSS in the IVCW

A/B 湿地	1	2	3	4	5	6	7	流程/m
Inlet	25.8/25.8	13.8/13.8	19.0/19.0	8.2/8.2	15.8/15.8	14.4/14.4	11.4/11.4	0
S2	23.9/11.4	6.6/5.6	2.7/1.7	4.5/4.3	2.0/3.6	3.2/3.3	0.9/3.8	0.35
S3	5.9/9.2	7.4/9.2	1.6/3.7	0.6/5.4	4.2/2.0	2.3/2.1	1.4/6.5	0.65
S4	5.8/9.9	4.2/12.2	3.0/1.6	3.9/3.7	1.1/2.0	1.3/3.3	2.3/2.8	0.90
S5	7.7/9.6	3.6/5.4	2.2/1.1	2.0/4.0	0.8/0.7	2.5/2.3	3.9/4.0	1.15
S6	3.3/9.1	2.8/5.0	1.2/3.5	3.7/2.4	1.2/3.1	1.7/2.2	2.7/2.2	1.40
Plot(出水)	7.2/3.3	11.2/9.6	3.3/1.6	1.8/3.3	2.3/0.8	3.9/3.8	6.3/2.4	1.50

注:表中 1~7 中的数字分别代表 2005 年 6 月到 12 月对应的 7 个月份,A/B 湿地表示的是 A/B 两组湿地各自对应的数据。

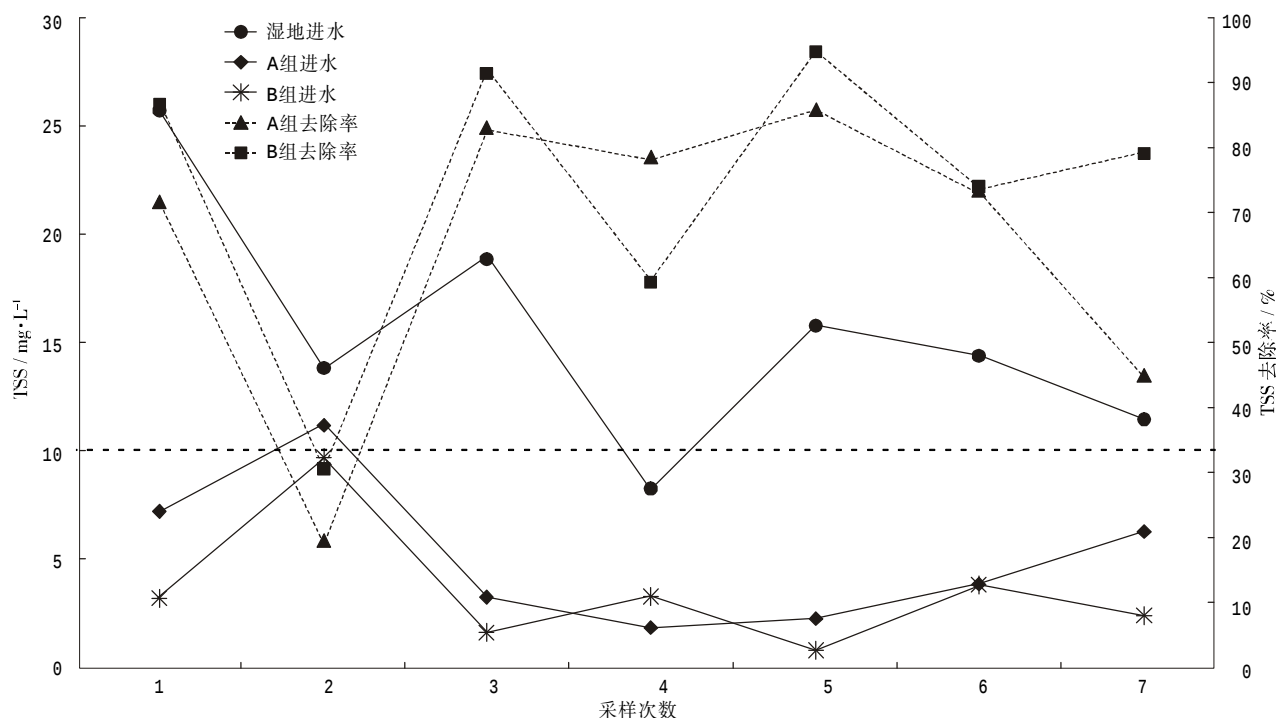


图 3 复合垂直流人工湿地中 TSS 历时曲线及去除变化

Figure 3 The amount and removal efficiency of the TSS in the IVCW

2.2 湿地系统中 TSS 动态变化

2.2.1 沿程动态变化

以 7 次采样中污水 TSS 值为纵坐标,以污水迁移距离(上下行池填料厚度之和)为横坐标,得出 7 次监测的 TSS 在湿地床内沿程变化趋势图 4(a)(由于 A/B 湿地的趋势一致,图中数值为 A/B 相对应 TSS 平均值);根据统计学的误差分析要求剔除了最好和最差的两组监测结果,对剩下的 5 组求平均值,以各点 TSS 的平均监测值 C_t 与湿地进水平均浓度值 C_0 的比值 C_t/C_0 为纵坐标,以各监测点至湿地进水端的距离与湿地床总长度的百分比值(%)为横坐标,得出总体效应的 TSS 在湿地床内的变化趋势,见图 4b 中的虚线。

从图 4(a)可看出,7 次监测结果沿程变化大体一致,除了个别数据出现偏离,故在进行图 4b 分析之前引入了统计分析相关知识对数据进行处理,处理后得到图 4b 的变化趋势图。从图 4(a)、4(b)中可看出 TSS 的降低主要是发生在湿地下行流池的上层区域,在开始阶段污水中 TSS 的去除速率较快,随着污水在人工湿地基质内迁移距离的延长,去除速率逐渐减少,这与李谷等^[12]研究结论相一致。TSS 的去除主要是基质过滤、沉积和吸附等物理作用的结果^[13]。同时从图 4(a)中还可以看出复合垂直流人工湿地对 TSS

的去除要优于单纯的上行或下行流人工湿地(转折点前后可以看成单纯的下行和上行池),因为湿地距离的延长可看作是污染物质停留时间的增加,所以有利于颗粒物的过滤、沉降和被吸附。

2.2.2 湿地床内部相邻基质间 TSS 变化

根据监测结果,以相邻间采样点的 TSS 增量值为横坐标,采样时间为纵坐标,得出 A、B 两平行湿地中从进水端到出水端相邻采样间间隙水的 TSS 增量变化趋势,如表 2。

从表 2 可以看出 TSS 在湿地床内部的增量变化出现正负波动,这种正负波动可能是湿地间歇式进水导致污泥在湿地床内的运动;还可能是湿地停歇一段时间后再运行,湿地基质表面蓄积的颗粒物又重新释放出来^[7,10],从而出现图中的数值正负波动;从文献得知^[8],潜流型人工湿地内部的流场一般是紊流和层流交互出现,这种流态的变化可能导致基质上的沉积物再悬浮或水中的颗粒物以涡流的形式流动而出现这种数值的振荡。

在上行池和出水之间 TSS 波动,还可能是湿地床表面栽种植物没有及时收割,凋落腐烂后,颗粒物下沉到湿地床内而呈现 TSS 变化,这点可以从 9 月份(即表 1 中第 4 次采样 TSS 数值,这期间 B 组湿地出现植物的凋落)采样中看出,B 出水的 TSS 比 A 出水

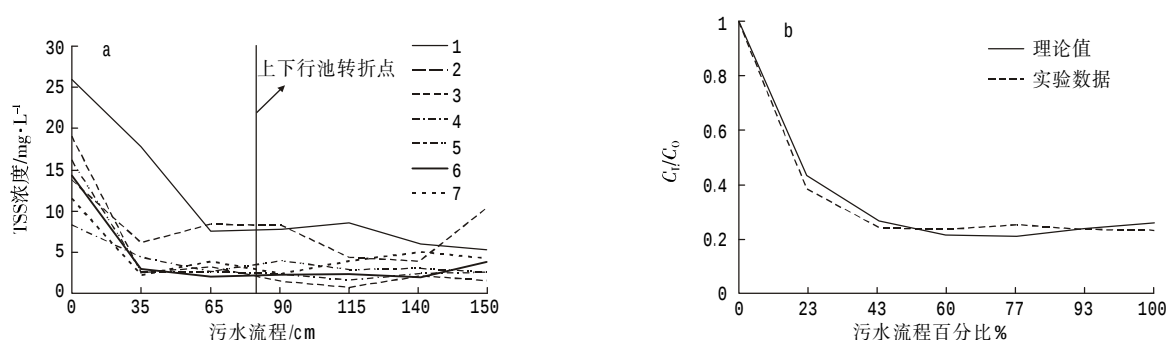


图 4 TSS 在湿地床内沿程变化趋势

Figure 4 The variations of the TSS in the media of wetland

表 2 A、B 组湿地各相邻基质 TSS 的增量变化

Table 2 The removal of the TSS in inter-mediate of plot A and plot B

A/B 湿地	1	2	3	4	5	6	7
Inlet-S2	1.9/14.4	7.2/8.2	16.3/17.3	3.7/3.9	13.8/12.2	11.2/11.15	10.54/7.68
S2-S3	18/2.2	-0.8/-3.6	1.1/-2	3.9/-0.8	-2.2/1.6	0.93/1.2	-0.54/-2.72
S3-S4	0.1/-0.7	3.2/-3	-1.4/2.1	-3.3/1.4	3.1/0	0.95/-1.21	-0.84/3.68
S4-S5	-1.9/0.3	0.6/6.8	0.8/0.5	1.9/-0.3	0.3/1.3	-1.14/0.99	-1.6/-1.24
S5-S6	4.4/0.5	0.8/0.4	1/-2.4	-1.7/1.6	-0.4/-2.4	0.79/0.12	1.2/-3.34
S6-Outlet	-3.9/5.8	-8.4/-4.6	-2.1/1.9	1.9/-0.9	-1.1/2.3	-2.23/-1.65	-3.58/5.02

注:表中 1~7 中的数字分别代表 2005 年 6 月到 12 月对应的 7 个月份,A/B 湿地表示的是 A/B 两组湿地各自对应的数据。

的 TSS 高,而其他采样中均是 A 高于 B。因此在人工湿地的运行期间应该对湿地枯萎植物进行及时收割以免影响湿地对污水的净化效果。

从表 2 中还可以看出,上行池栽种香蒲、菖蒲和剑麻的 B 组湿地出水明显要好于栽种草皮的 A 组湿地出水,从表 1 中可以得到验证,这可能是前者发达的根须和高溶氧(有利于水中大分子颗粒物降解为小分子物质),而草坪的严实密封(与空气缺少对流而造成溶氧低)和根须欠发达可能导致其降解能力差,从而湿地出水 TSS 普遍偏高,但草坪具备的观赏性与城市规划和绿化易于融合,更有利于人工湿地与城镇相结合的大规模应用,这也是此类型湿地应用的发展潜力之一,因此系统植物的选择应因地制宜,综合考虑各种因素。

3 TSS 在湿地床内沿程动态变化模型

3.1 模型建立及系数确定

污水在湿地床内流动时,与其中的各种净化因子接触,通过湿地中基质、植物和微生物的物理、化学以及生物三者协同作用,随着距离的迁移,污水中的污染物逐渐被净化去除。

本研究模型中,假设在同一断面上的所有各点其他条件保持不变,仅以 TSS 沿湿地床的迁移距离为变量。从图 4(a)、4(b)中可以看出,监测结果曲线变化趋势显示 TSS 在湿地床内的动态变化是可以用一级去除动力模型来进行描述^[14],同时结合经验公式: $y=a \exp(bx^2+cx+d)$,最终修订一级动力模型转化为 TSS 在湿地床内沿程动态变化计算模型式^[15],如下:

$$C_L=C_0\exp(K_1L^2+K_2L+K_3) \quad (1)$$

对(1)式两边取对数可以得到:

$$\ln(C_L/C_0)=K_1L^2+K_2L+K_3 \quad (2)$$

式中: C_0 为 TSS 的初始浓度, $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$; C_L 为距湿地进水端 L 处的 TSS 浓度, $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$; L 为监测点距离与湿地床长度百分比数; K_1 、 K_2 、 K_3 为降解系数(与湿地床结构、种植植物、来水流量、湿地床基质孔隙度等多种因

素相关)。

本研究通过对式中 C_L 、 C_0 、L 进行实测,经计算得到 $K_1=2.967 \times 10^{-4}$, $K_2=-0.04316$, $K_3=0$, 因此得到 TSS 在复合垂直流人工湿地中沿程动态变化模型如下式:

$$C_L=C_0\exp(2.967 \times 10^{-4}L^2 - 0.04316L) \quad (3)$$

其中 L 为百分比数, $0 \leq L \leq 100$ 。

3.2 模型验证

3.2.1 相关性分析

用 SPSS13.0 软件对模型进行了相关性验证,即通过模型的预测值与 5 次监测值(根据统计的一般方法剔除了去除最好的和最差的数据)及它们的平均值进行了相关性分析,其结果见表 3,从表 3 的相关性结果中,可明显看出模型的预测值与试验监测值呈极显著的相关性,基本上可以说该模型能够反映 TSS 在 IVCW 床内的沿程动态变化情况。

3.2.2 误差分析

模型误差就是实际问题与数学模型之间必然存在的误差。本研究中采用估计标准误差来衡量模型与监测值之间的拟合程度,它是衡量实际测量值与估计值离差一般水平的分析指标,其值越小拟合程度越高,也是本文确定最佳模型函数的主要依据。其计算公式如下:

$$S_y = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{n}} \quad (4)$$

式中: $\hat{Y}_i$ 、 Y_i 分别代表模型的各点实际值及对应的监测值。

同时用相关系数来衡量模型与实际监测间的相关程度,其绝对值越接近 1,相关程度就越高,计算公式如下:

$$r = \sqrt{1 - \frac{S_y^2}{\sigma_y^2}} \quad (5)$$

其中: S_y 、 σ_y 分别代表标准误差及均方差。

结合图 4(b)及公式(4)和(5),计算可得本研究中数学模型和具体监测值之间的标准误差分别为

表 3 相关性分析结果

Table 3 The correlation analysis between the observed values and expected values by the model

	理论值	平均值	第1次采样	第3次采样	第4次采样	第6次采样	第7次采样
Pearson Correlation	1	0.994(**)	0.936(**)	0.968(**)	0.971(**)	0.973(**)	0.877(**)
Sig. (2-tailed)		0.000	0.002	0.000	0.000	0.000	0.009
N	7	7	7	7	7	7	7

注: ** 在 0.01 检验水平中,呈现出极显著相关。

$S_y = 0.03$ 和 $r = 0.9258$ 。同时根据相关关系分类($|r| = 1$ 为完全相关; $0.7 \leq |r| < 1$ 为高度相关或强相关; $0.4 \leq |r| < 0.7$ 为中度相关; $|r| < 0.4$ 为低度相关或弱相关; $r = 0$ 为零相关)可知,本研究中的 TSS 去除模型和监测值呈高度相关,所以该模型可以很好的反映 TSS 在 IVCW 的去除规律。

4 结 论

(1) 利用复合垂直流人工湿地去除养殖废水中的 TSS 是一种行之有效的途径;

(2) 复合垂直流人工湿地对 TSS 的去除主要发生在下行池的上层基质区域,其他的层面有所降低,但速率不是很明显;

(3) 人工湿地对 TSS 的去除主要是通过基质过滤、沉积和吸附等物理作用;

(4) 复合垂直流人工湿地对 TSS 的净化要优于单纯的上行或者下行流人工湿地;

(5) 人工湿地停歇后再运行可能会出现湿地内部沉积颗粒物的释放和再悬浮现象;

(6) TSS 去除模型: $C_t = C_0 \exp(-2.967 \times 10^{-4} L^2 - 0.04316L)$ 基本可以反映 TSS 在 IVCW 中的动态变化,但该模型是在特定的条件下得出的,具有一定的局限性,在实践应用中还有待进一步完善和修正。

参考文献:

- [1] 姜叶琴,姚健萍,杨万喜. 水产养殖水体处理方法及应用前景综述[J]. 海洋湖沼通报, 2004, 3: 99-104.
- [2] David Rogers Tilley, Harish Badrinarayanan, Ronald Rosati, et al. Constructed wetlands as recirculation filters in large-scale shrimp aquacul-

ture[J]. *Aquacultural Engineering*, 2002, 26: 81-109.

- [3] 王君英. 水产养殖对生态环境污染的控制措施[J]. 北京水产, 2004, 4: 4-6.
- [4] 方圣琼, 胡雪峰, 巫和昕. 水产养殖废水处理技术及应用[J]. 环境污染治理技术与设备, 2004, 5(9): 51-55.
- [5] 詹德昊, 吴振斌, 张 晟, 等. 堵塞对复合垂直流湿地水力特征的影响[J]. 中国给水排水, 2003, 19(2): 1-4.
- [6] 岳春雷, 常 杰, 葛 滢, 等. 复合垂直流人工湿地对低浓度养殖废水循环净化功能研究[J]. 科技通报, 2004, 20(1): 15-17.
- [7] 汤鸿霄, 钱 易, 文湘华. 水体颗粒物和难降解有机物的特性与控制技术原理[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2000.
- [8] 胡康萍. 人工湿地设计中的水力学问题研究[J]. 环境科学研究, 1991, 4(5): 8-12.
- [9] 国家环保局《水和废水监测分析方法》编委会. 水和废水监测分析方法[M] (第三版). 北京: 中国环境科学出版社, 1989.
- [10] Robert H. Kadlec, Robert L. Knight. *Treatment wetlands* [M]. Lewis Publishers, Boca Raton, 1996.
- [11] USEPA. Subsurface flow constructed wetlands for wastewater Treatment—A technology assessment[J]. Office of Water. USEPA 832-R-93-008, July 1993.
- [12] 李 谷. 复合人工湿地—池塘养殖生态系统的特征与功能研究[D]. 武汉: 中国科学院水生生物研究所, 2005.
- [13] 梁 威, 吴振斌, 周巧红, 等. 构建湿地基质微生物与净化效果及相关分析[J]. 中国环境科学, 2002, 22(3): 282-285.
- [14] Renee Kincaid, Steve McAnally A. Enhancing commonly used model predictions for constructed wetland performance: as-built design considerations[J]. *Ecological Modeling*, 2004, 174: 309-322.
- [15] 贺 俐, 陈贵兴. 计算方法[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2001.

致谢: 在实验及论文撰写过程中得到了张甬元、刘保元、施之新、庄德辉、詹发萃、邓家齐、谭渝云先生, 博士吴晓辉、周巧红, 还有净化与恢复生态学科张翔凌、于涛、钟非、张世羊、何起利等的大力帮助, 在此一并表示衷心感谢。