

DOI: 10.13671/j.hjkxxb.2015.0001

辽河保护区七星湿地水质评估及模型模拟*

鄧二铨^{1,2}, 宋永会^{1,2*}, 段亮^{1,2}, 于会彬^{1,2}, 刘利²

1. 中国环境科学研究院环境基准与风险评估国家重点实验室, 北京 100012
2. 中国环境科学研究院城市水环境科技创新基地, 北京 100012

收稿日期: 修回日期: 录用日期:

摘要: 支流已经成为辽河干流的重要污染源, 在支流河口建设大型人工湿地可以阻控支流污染物。为揭示辽河保护区七星湿地净污效果, 在对七星湿地水质、水量进行监测的基础上, 采用内梅罗综合污染指数法对其有机物和营养物状况进行评价, 并计算污染物在湿地中的去除量, 最后利用归趋模型对污染物变化情况进行模拟。结果表明: 内梅罗污染指数在支流河入口处较高, 万泉河污染最严重; 支流水体在经过湿地净化后, 水体污染程度有所下降。植物生长期(5-10月)七星湿地对COD去除总量为26.83 t, 削减率为35.3%; 对氨氮的去除总量为2.63 t, 削减率为37.9%; 对总磷的去除总量为0.40 t, 削减率为52.9%。衰减方程模型对于COD、TP及不同形态氮拟合效果一般; 多元参数回归模型及Monod机制模型较好地模拟了湿地 $c_{out}(\text{NH}_4^+-\text{N})$ 和 $c_{out}(\text{NO}_3^--\text{N})$ 的变化。对Monod机制模型参数进行计算可得: $k_{\text{NH}_4^+}=24.987 \text{ L}(\text{m}^2 \text{ d})^{-1}$, $k_{\text{max}, \text{NO}_2^-}=77.696 \text{ mg}(\text{m}^2 \text{ d})^{-1}$, $K_{\text{S}, \text{NO}_2^-}=0.114 \text{ mg L}^{-1}$ 。相关模型参数可用于湿地氨氮与硝氮浓度的预测。因此, 多元参数回归模型及Monod机制模型可应用于类似湿地 $c_{out}(\text{NH}_4^+-\text{N})$ 和 $c_{out}(\text{NO}_3^--\text{N})$ 变化的模拟及预测。

关键词: 七星湿地; 内梅罗污染指数; 水质评估; 去除效果; 数学模型

文章编号: 中图分类号: 文献标识码(A)

Water quality evaluation and modeling of Qixing wetland in Liao

River Conservation Area

ZHI Erquan^{1,2}, SONG Yonghui^{1,2*}, DUAN Liang^{1,2}, YU Huibin^{1,2}, LIU Li²

1. State Key Laboratory of Environmental Criteria and Risk Assessment, Chinese Research Academy of Environmental Science, Beijing 100012, China
2. Department of Urban Water Environmental Research, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China

Received received in revised form accepted

Abstract: The tributaries of Liao River are the pollutants sources of the mainstream. The large-scale constructed wetland in the tributary estuary may control the pollutants input from the tributaries to the mainstream. In order to understand the efficiency of the tributary estuary constructed wetland - Qixing wetland, the Nemerow Pollution Index was used to evaluate the variation characteristics of organic matter and nutrient based on the long-term monitoring of water quality in the wetland. The removal of pollutants was calculated, and the mathematic models were used to simulate and predict the pollutants reduction. The results showed that the Nemerow Pollution Index was higher in the entrance of the tributaries. Wanquan River was the most seriously polluted tributary. The tributary water was purified when it flowed through the wetland. 26.83 t of COD, 2.63 t of ammonia nitrogen ($\text{NH}_3\text{-N}$) and 0.40 t of total phosphorus (TP) could be removed by the Qixing wetland with the reduction rates of 35.3%, 37.9% and 52.9%, respectively. The model simulation showed that Decay equation could reasonably

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项 (No. 2012ZX07202-004-03, 2012ZX07202-005)

Supported by the National Major Scientific and Technological Program for Water Pollution Control and Management of China (No. 2012ZX07202-004-03, 2012ZX07202-005)

作者简介: 鄧二铨 (1986—), 男, 博士, Email: erquanzhi@163.com; *责任作者, 宋永会, Email: songyh@craes.org.cn

Biography: ZHI Erquan (1986—), male, Ph. D., Email: erquanzhi@163.com; *Corresponding author, Email: songyh@craes.org.cn

describe the concentration variation of COD, TP, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ and $\text{NO}_3^-\text{-N}$. The multi-parameter regression model and Monod mechanism model could simulate the $c_{out}(\text{NH}_4^+\text{-N})$ and $c_{out}(\text{NO}_3^-\text{-N})$ concentrations in wetland well. The parameters of Monod mechanism model were obtained: $k_{\text{NH}_4^+} = 24.987 \text{ L}/(\text{m}^2 \text{ d})$, $k_{\text{max}, \text{NO}_2^-} = 77.696 \text{ mg}/(\text{m}^2 \text{ d})$, $K_s, \text{NO}_2^- = 0.114 \text{ mg L}^{-1}$, which could be used in the prediction of $c_{out}(\text{NH}_4^+\text{-N})$ and $c_{out}(\text{NO}_3^-\text{-N})$ in the wetland. Therefore, both the multi-parameter regression model and Monod mechanism model can be applied to simulating and predicting the variations of ammonium and nitrate nitrogen in similar wetlands.

Key words: Qixing wetland; Nemerow Pollution Index; Water quality assessment; Removal efficiency; Mathematic model

1 引言 (Introduction)

随着我国工业化、城镇化进程加快,大量有机物及营养物排入水体,导致水环境破坏严重。已有的研究表明:人工湿地可以较好地处理生活污水及工业废水(Vymazal, 2009; Shehzadi *et al.*, 2014),同时也可以控制非点源污染(Ham *et al.*, 2010)。且造价较低、对环境友好,在发展中国家得到较好地应用。当前,人工湿地在河流、湖泊水环境保护中的作用是其他技术措施不可替代的。然而,对人工湿地净污效果的评价及分析依然欠缺。

水质评价与模型模拟的目的是科学、准确地评价水环境质量,并为水环境管理提供依据(Freni *et al.*, 2011; Zhang *et al.*, 2012; Hijosa *et al.*, 2011; Carey *et al.*, 2011)。目前,水环境质量评价方法主要有内梅罗污染指数法、人工神经网络评价法等(马溪平等, 2011; 吴彬等, 2012)。其中内梅罗污染指数法计算过程简洁,结果易于比较,不仅考虑了各种污染物的单因子污染指数,还加大了最大污染物的权重,更加合理地反映了水环境的污染性质和污染程度(Yang *et al.*, 2011),因此在水环境评价方面得到广泛的应用(Yi *et al.*, 2012; Ma *et al.*, 2013)。徐冰冰等(2013)利用内梅罗污染指数法对湖南郴州柿竹园矿区乡镇地下水饮用水源水质进行评价,明确其重金属污染状况,为当地政府进行地下水饮用水源管理和治理提供指导。通过研究污染物在湿地内的迁移转化行为,建立相应的数学模型,对于湿地运行效果模拟具有重要的意义(Hijosa *et al.*, 2011; Mayo *et al.*, 2005)。较为常见的模型有衰减方程模型、多元参数回归模型及Monod机制模型等(刘晓娜等, 2011; 叶捷等, 2011)。衰减方程可以直观地描述进出口污染物浓度之间的关系,多元参数回归模型能够识别污染物去除的影响因素,Monod机制模型则更多地从机理上阐释污染物去除。Dong等(2012)利用多元参数回归模型研究湿地中理化参数对于污染物去除效果的影响,发现溶解氧和电导率与 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 及磷的去除相关。Saeed等(2011)利用改进后Monod机制模型较好地模拟了湿地系统中氮和有机物的去除。然而,对于大型支流河口人工湿地水质状况及其变化的评估及模拟有待深入的研究。

该研究通过对辽河保护区七星湿地水质监测结果进行评价,明确七星湿地对支流河污染物的净化效果;利用归趋模型对七星湿地污染物浓度变化进行模型模拟,以期能够模拟湿地运行效果。

2 材料与方法 (Materials and methods)

2.1 研究区域概况与采样点布设

辽河流域地处我国重工业集中区域,人口稠密,水环境污染严重(李丛等, 2011; Wen *et al.*, 2011; Zhang *et al.*, 2010)。经过各方的不懈治理,辽河干流工业点源污染已经基本消除,干流水质得到显著改善。但是辽河支流污染形势依然严峻,已成为干流污染物的主要来源之一。将大型人工湿地应用于支流污染物阻控在国内是一种新的尝试,七星湿地便是此类尝试。其目的是要阻控支流河携带的污染物,以减轻辽河干流污染负荷。

所在区域年平均气温 7.5°C ,年降水量 672.9mm ,降雨多集中在7~8月。植被类型以水生植被及沼泽植被为主。水生植被以芦苇(*Phragmites australis*)、香蒲(*Typha orientalis*)、菰(*Zizania latifolia*)等挺水植被为主;沼泽植被以莲(*Nelumbo nucifera*)、菱(*Trapa bispinosa*)、萍蓬莲(*Nuphar pumilum*)、黑藻(*Hydrilla verticillata*)等为主。土壤类型以草甸土、沼泽土和泥炭土为主。万泉河与长河主要接纳沿途城镇生活污水及部分工业废水,而西小河与羊肠河相对较少。目前已形成湿地面积 $6.7 \times 10^6 \text{ m}^2$,水深 1.5 m ,蓄水量 $1.0 \times 10^7 \text{ m}^3$ 。

对七星湿地水体样品进行采集,时间为2012年5—10月,每月采集一次。采样点布设如图1所示。利用便携式水质测定仪(Thermo Orion Star)对水温(T)、pH和溶解氧(DO)进行现场测定。使用水样采集

器对表层水样(0-15cm)进行采集,混合均匀后倒入250 mL玻璃采样瓶(经10%硝酸浸泡,并用超纯水清洗)。样品置于低温保温箱内保存至运回实验室,迅速分析水体 $c(\text{COD}_{\text{Cr}})$ 、 $c(\text{NH}_4^+-\text{N})$ 及 $c(\text{TP})$ 。分析采用《水和废水监测分析方法》中的方法(国家环境保护总局,2002)。利用浮标法测定各支流及出口流速(测定3次区平均值),测定河宽及河深,估算流量。

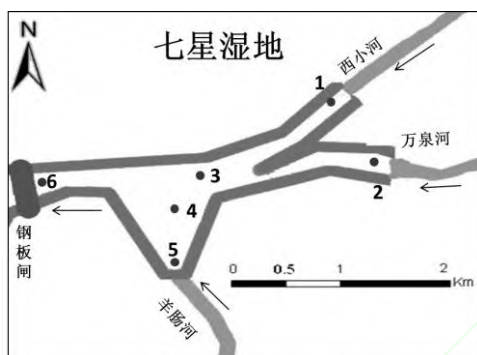


图1 七星湿地采样点布设
Fig.1 The sampling sites of Qixing wetland

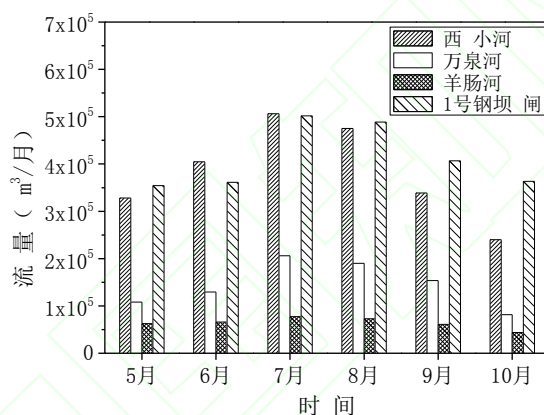


图2 各支流河及出口流量分布
Fig.2 The flow of three tributaries and outlet

2.2 内梅罗污染指数与污染物去除计算方法

2.2.1 内梅罗污染指数计算方法

内梅罗污染指数是一个综合污染指数,它以单因子评价为基础进行计算(郭华,2012),并根据相应的污染等级,判断水质污染情况。该研究中污染物选取COD、氨氮、总氮和总磷,评价标准为GB 3838—2002《地表水环境质量标准》中的IV类水限值, mg L^{-1} 。

根据内梅罗污染指数可以将水质划分为6个等级,见表1。

表1 内梅罗污染指数与水质分类(郭华,2012)

Table 1 Nemerow pollution index and category of water quality						
I 值	<0.5	0.5~<1.0	1.0~<2.0	2.0~<5.0	5.0~10.0	>10.0
分级	清洁	较清洁	轻度污染	中度污染	重度污染	严重污染

2.2.2 七星湿地污染物去除计算

根据各支流与出口处流量及水体中污染物的含量,计算污染物在湿地内被削减的量,即湿地的净化效果。由于4月份有个别采样点不全,所以对湿地中5月-10月的COD、氨氮、总磷去除效果进行计算。去除总量为各月支流河口流入总量减去出口流出量,并把各月去除量加和,计算公式如下:

$$M_i = \sum_{n=5}^{10} \left(\sum_{i=1}^3 Q_{n,i} c_{n,i} - Q_{n,out} c_{n,out} \right) \quad (3)$$

2.3 污染物归趋模型方法

2.3.1 衰减方程

衰减方程是把人工湿地视作“黑箱”，按照人为定义的简单线性关系或幂函数，建立“输出”和“输入”的拟合方程。在实际应用中则以建立污染物进出口浓度之间的拟合方程为目标。

2.3.2 多元参数回归模型

多元参数回归模型在研究湿地中污染物进出水浓度的基础上，考虑各种影响因素，从数量关系的角度出发建立“输出”与“输入”的响应关系。模型可以表示为：

$$y = f(x_1, x_2, x_3, x_4 \cdots) \quad (4)$$

其中， $x_1, x_2, x_3, x_4 \cdots$ 为影响因素。

2.3.3 Monod 机制模型

在营养物质输入湿地系统后，一部分最终随水流流出系统，另一部分在植物、微生物、基质等的作用下发生迁移转化。流入湿地中的氮主要考虑受物理及生物作用而进行迁移转化。因此，水体中氮的物料平衡方程式可以表示为：

$$Q_{out} c_{out} = Q_{in} c_{in} - r_i t \quad (2)$$

式中： r_i 为与*i*类污染物相关的物理去除和生物降解速率，mg/d； t 为时间，d。

研究（刘佳等，2006）表明，人工湿地对营养物的去除主要与物理及生物降解过程有关。Monod 机制模型结合了一级与零级动力学模式（刘佳等，2006；Cheyns *et al.*, 2010），当营养物在水相中浓度（ c ）远小于饱和常数（ K ）时，营养物浓度是降解过程的控制因素，降解过程遵循一级反应动力学；在高营养物浓度的情况下（即 $c \gg K$ ），湿地中所能承载的最大微生物量成为降解过程的控制因素，降解速率达到最大值。理论上来说，Monod 机制模型更适用于微生物起主导作用的污染物降解过程（Yassine *et al.*, 2013）。因此，可以假设系统中微生物对氮的降解过程符合 Monod 机制模型。表面流湿地通常基于面积计算反应速率常数，因此 r 可由下式计算：

$$r = k_{0,A} A \frac{c}{K + c} \quad (3)$$

式中： $k_{0,A}$ 为零级面积常数， $\text{mg} (\text{m}^2 \text{d})^{-1}$ ； K 为半饱和常数， mg L^{-1} ； A 为湿地的有效面积，为 $2.0 \times 10^5 \text{ m}^2$ 。

根据 Monod 机制模型，各形态氮的降解速率 r 可以根据以下方程计算（Sklarz *et al.*, 2010）：

$$r_{\text{NH}_4^+} = A \left(\frac{k_{\text{max},\text{NH}_4^+} \times c_{\text{NH}_4^+}}{K_{S,\text{NH}_4^+} + c_{\text{NH}_4^+}} \right) \quad (4)$$

$$r_{\text{NO}_3^-} = A \left(\frac{k_{\text{max},\text{NO}_3^-} \times c_{\text{NO}_3^-}}{K_{S,\text{NO}_3^-} + c_{\text{NO}_3^-}} \right) \quad (5)$$

式中： $k_{\text{max},i}$ ($\text{mg} (\text{m}^2 \text{d})^{-1}$) 和 $K_{S,i}$ (mg L^{-1}) 均为 *i* 类污染物的 Monod 参数。其中 $k_{\text{max},i}$ 为 *i* 类污染物的面积常数， $K_{S,i}$ 为 *i* 类污染物的半饱和常数。

2.4 数据处理

本文使用 Matlab 7.0、SPSS 17.0 及 OriginPro 8.0 等软件进行数据处理。

3 结果与讨论 (Results and discussion)

3.1 七星湿地水质评价与污染物去除效果

3.1.1 水质评价

采用内梅罗水污染指数法对七星湿地全年水质进行综合评价，来反映水质有机物和营养物情况及其变化特征（表 2）。评价指标有 COD、氨氮、总氮和总磷。从表中可以看出，随着季节的变化，内梅罗指数呈现先下降后有所上升的趋势。在 7, 8, 9 月份水体的污染指数相对较低，这主要与夏季湿地植物生长茂

盛且微生物活动较强有关 (Cossu *et al.*, 2001; Salvato *et al.*, 2010; Forni *et al.*, 2001; Pauer *et al.*, 2000), 同时夏季水量增多, 水体自净能力增强; 而秋季湿地净污能力有所降低, 水量也变少, 污染程度趋于严重。万泉河入口处污染最严重, 从中度污染直至严重污染, 这与万泉河沿途接纳了大量的生活污水有关。西小河的污染程度轻于万泉河, 6 月开始有污染物排放到河流中, 导致污染指数上升; 羊肠河污染程度相对较轻。而随着水流在湿地内流动, 水体经过湿地净化, 在湿地出口处内梅罗指数呈现降低的趋势, 这也说明湿地对于支流来水中的污染物具有明显的阻控效果, 湿地中的植物与微生物在污染物的迁移转化中起到关键作用, 对其水质状况有明显的改善作用, 可以大大减少支流污染物向辽河干流排放。

表2 水质内梅罗污染指数
Table 2 Nemerow Pollution Index of water quality

采样点	5月	6月	7月	8月	9月	10月
1	1.52	8.35	5.45	2.58	1.82	20.49
2	21.38	16.14	7.43	14.52	4.58	32.28
3	2.19	3.01	4.04	4.54	3.54	19.58
4	1.56	2.30	1.82	3.74	1.53	9.77
5	2.36	2.14	3.38	2.83	1.47	9.75
6	2.41	2.01	4.46	2.88	2.29	11.72

3.1.2 污染物去除效果计算

5月-10月是该区域温度最高, 光照最强的时候, 是植物生长的季节, 在此时间段内微生物活性也较高, 所以湿地对污染物的去除主要集中在上半年之内。计算可得半年内湿地对 COD 去除总量为 26.83 t, 削减率为 35.3%; 对氨氮的去除总量为 2.63 t, 削减率为 37.9%; 对总磷的去除总量为 0.40 t, 削减率为 52.9%。湿地对营养物质的去除率较高, 对氮的削减率超过 1/3, 这与计算时段内植物生长较快、微生物活性较高有关; 对磷的削减率超过 50%, 这是由于湿地刚刚建成, 湿地基质对磷的吸附能力较强, 同时植物对磷的吸收也是一个重要因素。可见七星湿地在 5月-10月对各污染物的去除效果较为显著。

3.2 污染物归趋模型分析

3.2.1 衰减方程

通过对水体中 COD、氨氮、硝氮、总氮和总磷的进出口浓度进行拟合, 可得到各物质在七星湿地中的衰减方程表达式。由表 3 可见, 衰减方程对于 COD 来说, 幂函数的拟合度为 0.60, 而线性函数为 0.38; 衰减方程对氨氮的拟合效果相近; 硝氮是所有物质当中拟合程度最高的, 而且线性拟合要好于幂函数拟合; 线性函数对总氮的拟合度高于幂函数; 衰减方程对于总磷的去除拟合程度较差, 无论是线性方程还是幂函数都未能很好的进行拟合。整体来说, 幂函数的拟合效果要好于线性函数。

表3 湿地污染物衰减方程

Table 3 The decay functions of pollutants in wetland

	线性关系		幂函数	
	方程	拟合度	方程	拟合度
COD	$y=0.39x+7.65$	$r^2=0.38$	$y=2.24x^{0.63}$	$r^2=0.60$
氨氮	$y=0.55x+0.18$	$r^2=0.58$	$y=0.50x^{1.13}$	$r^2=0.59$
硝氮	$y=0.81x-0.31$	$r^2=0.91$	$y=0.58x^{1.12}$	$r^2=0.86$
总氮	$y=1.35x+10.99$	$r^2=0.60$	$y=6.58x^{0.56}$	$r^2=0.35$
总磷	$y=0.04x+0.13$	$r^2=0.06$	$y=0.16x^{0.10}$	$r^2=0.05$

表中: y 为相应物质的出口浓度, x 为入口浓度。

衰减方程具有简单明了、使用方便的优点, 但是由于数据类别较单一, 不能准确的描述水流状态、水质条件等因素的影响, 更不能对污染物去除过程及机制进行反映, 因此预测结果与实际观测值之间的误差较大。

3.2.2 多元参数回归模型

结合课题组以往的研究 (叶捷等, 2011; 徐微雪等, 2014), 选取进水浓度 c_{in} 、水温(T)、pH、 $c(\text{DO})$ 及 $c(\text{COD}_{Cr})$ 为出水浓度 c_{out} 的影响因素。采用 SPSS 软件对 $c_{out}(\text{NH}_4^+-\text{N})$ 和 $c_{out}(\text{NO}_3^--\text{N})$ 与各影响因素之间的相关性进行分析, 结果如表 3 所示。

表4 出水浓度与各影响因素相关系数
Table 4 Correlation coefficient between c_{out} and their influence factors

	c_{in} ($\text{NH}_4^+\text{-N}$)	c_{in} ($\text{NO}_3^-\text{-N}$)	pH	DO	T	COD
c_{out} ($\text{NH}_4^+\text{-N}$)	0.764	—	0.528	-0.313	0.359	-0.228
c_{out} ($\text{NO}_3^-\text{-N}$)	—	0.803	0.260	0.276	0.873*	-0.188

注：*表示显著相关， $P < 0.05$ 。

相关性分析表明，湿地中氨氮与硝氮的进口浓度 c_{in} 对出口浓度 c_{out} 有较大的影响；pH 对氨氮出口浓度的影响较大，而水温对硝氮出口浓度的影响较大；DO 有一定的影响，增大 DO 浓度有利于水体中氨氮的削减； $c(\text{COD}_{\text{Cr}})$ 的影响较小。对氨氮和硝氮的出口浓度与其主要影响因素进行多元参数回归分析，得出其多元参数回归方程：

$$c_{out}(\text{NH}_4^+\text{-N}) = -5.874 + 0.646 \times c_{in}(\text{NH}_4^+\text{-N}) + 0.838 \times \text{pH} - 0.159 \times \text{DO} + 0.012 \times T, (R^2=0.996) \quad (6)$$

$$c_{out}(\text{NO}_3^-\text{-N}) = -0.234 - 0.014 \times c_{in}(\text{NO}_3^-\text{-N}) + 0.029 \times \text{pH} + 0.002 \times \text{DO} + 0.005 \times T, (R^2=0.791) \quad (7)$$

多元参数回归模型对湿地出口 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度变化具有较好的模拟效果 ($R^2=0.996$)，对出口 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度模拟的拟合度也达到了 0.791。多元参数回归模型是对系统去除效果和其潜在影响因素之间的经验性的直观表述，有利于确定去除效果影响因素，但却不能对湿地系统中多种复杂的污染物去除过程进行定量描述，因此很多情况下不能完全反映污染物去除过程以及各影响因素对去除效果的影响（叶捷等，2011）。

3.2.3 Monod 机制模型

在七星湿地 1 号钢板闸前，水深平均在 0.30 m 左右，水体呈好氧状态，水中氮的转化过程主要以硝化作用为主（徐微雪等，2014）。通常情况下，硝化过程当中的 K_S 值较高，远大于水体中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度（Sklarz et al., 2010）， $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的迁移转化接近于一级动力学，令： $k_{\text{NH}_4^+} = k_{\text{max}, \text{NH}_4^+} / K_S, \text{NH}_4^+$ ，则有：

$$r_{\text{NH}_4^+} = A \times k_{\text{NH}_4^+} \times c_{\text{NH}_4^+} \quad (8)$$

对上述方程进行求解，得： $k_{\text{NH}_4^+} = 24.987 \text{ L} \cdot (\text{m}^3 \text{ d})^{-1}$ ， $k_{\text{max}, \text{NO}_2^-} = 77.696 \text{ mg} \cdot (\text{m}^3 \text{ d})^{-1}$ ， $K_S, \text{NO}_2^- = 0.114 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。

由图 3 可以看出：湿地出口处 $c_{out}(\text{NH}_4^+\text{-N})$ 与模拟曲线具有较高的拟合度 $R^2=0.780$ ；出口处 $c_{out}(\text{NO}_3^-\text{-N})$ 与模拟曲线的拟合度更高， $R^2=0.930$ 。Wynn 等（2001）基于 Monod 机制模型建立相应的数学模型，较好地模拟了潜流人工湿地中出口处 $c_{out}(\text{NH}_4^+\text{-N})$ 和 $c_{out}(\text{NO}_3^-\text{-N})$ 。叶捷等（2011）利用 Monod 机制模型模拟了潮汐流人工湿地反应器中 $c_{out}(\text{NH}_4^+\text{-N})$ 的变化，具有较好的拟合效果 ($R^2=0.900$)。Monod 机制模型从系统内部微生物的生长代谢过程及微生物对污染物的去除机制考虑，属于机制模型范畴，能更好地描述污染物的去除行为。因此，Monod 机制模型更适用于阐释湿地中 $c_{out}(\text{NH}_4^+\text{-N})$ 和 $c_{out}(\text{NO}_3^-\text{-N})$ 变化机制，相关参数可用于湿地氨氮与硝氮出口浓度的预测。

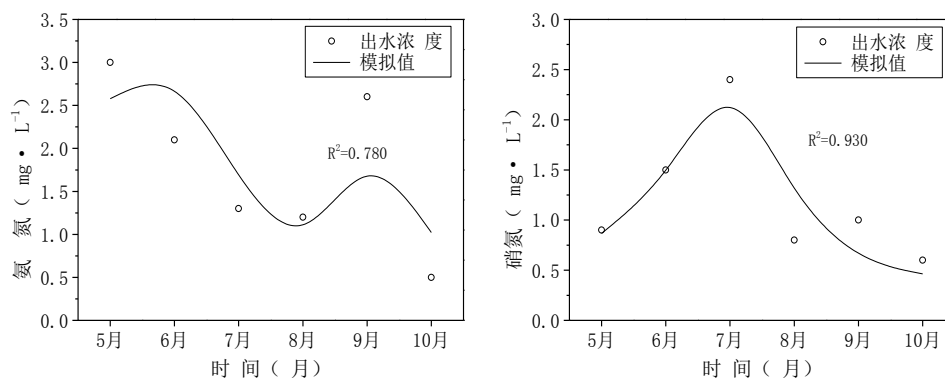


图3 出水测定值与模拟值对比

Fig.3 The comparison of observed values and simulated values

4 结论 (Conclusion)

(1) 支流水体污染程度较高, 尤其以万泉河为最高; 经过湿地的净化, 湿地出口处污染指数有所降低。因此, 内梅罗污染指数能够较好地反映湿地中水质变化状况, 可为辽河保护区水环境管理提供支撑。

(2) 植物生长期七星湿地对 COD 去除总量为 26.83 t, 削减率为 35.3%; 对氨氮的去除总量为 2.63 t, 削减率为 37.9%; 对总磷的去除总量为 0.40 t, 削减率为 52.9%。可见七星湿地对支流污染物的去除效果较显著, 能够有效阻控支流污染物向干流迁移, 减轻干流污染负荷, 此类支流河口湿地的建设对改善辽河保护区水质意义重大。

(2) 衰减方程模型对于对于污染物的拟合效果一般; 多元参数回归模型较好地模拟了湿地工程中 c_{out} (NH_4^+-N) ($R^2=0.996$) 和 c_{out} (NO_3^--N) ($R^2=0.791$) 的变化; Monod 机制模型对湿地 NH_4^+-N 的拟合度 $R^2=0.780$, 对 NO_3^--N 出口浓度的拟合度 $R^2=0.930$, 对 Monod 机制模型中参数进行计算可得: $k_{\text{NH}_4^+}=24.987 \text{ L} (\text{m}^2 \text{ d})^{-1}$, $k_{\text{max}, \text{NO}_2^-}=77.696 \text{ mg} (\text{m}^2 \text{ d})^{-1}$, $K_{\text{S}, \text{NO}_2^-}=0.114 \text{ mg L}^{-1}$ 。因此, 多元参数回归模型及 Monod 机制模型较好地模拟了湿地 c_{out} (NH_4^+-N) 和 c_{out} (NO_3^--N) 的变化, 相关模型参数可用于类似湿地氨氮与硝氮出口浓度的预测。

责任作者简介: 宋永会 (1967—), 男, 博士, 研究员、博士生导师, 发表期刊论文 200 余篇。Email: songyh@craes.org.cn。

参考文献 (References) :

- Carey R O, Migliaccio K W, Brown M T. 2011. Nutrient discharges to Biscayne Bay, Florida: Trends, loads, and a pollutant index[J]. *Science of the Total Environment*, 409(3):530-539
- Cheyns K, Mertens J, Diels J, *et al.* 2010. Monod kinetics rather than a first-order degradation model explains atrazine fate in soil mini-columns: Implications for pesticide fate modelling[J]. *Environmental Pollution*, 158(5):1405-1411
- Cossu R, Haarstad K, Lavagnolo M C, *et al.* 2001. Removal of municipal solid waste COD and $\text{NH}_4\text{-N}$ by phyto-reduction: A laboratory-scale comparison of terrestrial and aquatic species at different organic loads[J]. *Ecological Engineering*, 16(4):459-470
- Dong Y, Scholz M, Harrington R. 2012. Statistical Modeling of Contaminants Removal in Mature Integrated Constructed Wetland Sediments[J]. *Journal of Environmental Engineering*, 138(10):1009-1017
- Forni C, Chen J, Tancioni L, *et al.* 2001. Evaluation of the fern *Azolla* for growth, nitrogen and phosphorus removal from wastewater[J]. *Water Research*, 35(6):1592-1598
- Freni G, Mannina G, Viviani G. 2011. Assessment of the integrated urban water quality model complexity through identifiability analysis[J]. *Water Research*, 45(1):37-50
- 郭华. 2012. 冯家山水库水质变化规律及污染评估分析[D]. 杨凌:西北农林科技大学
- 国家环境保护总局. 2002. 水和废水监测分析方法 (第四版) [S]. 北京:中国环境科学出版社
- Ham J, Yoon C G, Kim H J, Kim H C. 2010. Modeling the effects of constructed wetland on nonpoint source pollution control and reservoirwater quality improvement[J]. *Journal of Environmental Science*;22:834-9.
- Hijosa V M, Sidrach C R, Martien V J, *et al.* 2011. Statistical modelling of organic matter and emerging pollutants removal in constructed wetlands[J]. *Bioresource Technology*, 102(8):4981-4988
- 李丛,段亮,宋永会,等. 2011. 辽河流域水污染治理技术评估软件的开发与应用[J]. *环境工程技术学报*, 1(4):348-352
- 刘佳,张奇,高海鹰. 2006. 模拟降解去除人工湿地营养物[J]. *环境污染与防治*, (09):698-702
- 刘晓娜,丁爱中,程莉蓉,等. 2011. 潜流人工湿地除氮的生态动力学模拟[J]. *农业环境科学学报*, (01):166-170
- 马溪平,吕晓飞,张利红,等. 2011. 辽河流域水质现状评价及其污染源解析[J]. *水资源保护*, (04):1-4,73
- Ma R, Shi J S, Liu J C. 2013. FRFI model application in groundwater non-point source pollution evaluation: a case study in the Luoyang Basin of North Henan province, China[J]. *Environmental Earth Sciences*, 68(1):45-56
- Mayo A W, Bigambo T. 2005. Nitrogen transformation in horizontal subsurface flow constructed wetlands I: Model development[J]. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 30(11-16):658-667
- Pauer J J, Auer M T. 2000. Nitrification in the water column and sediment of a hypereutrophic lake and adjoining river system[J]. *Water Research*, 34(4):1247-1254
- Saeed T, Sun G Z. 2011. Kinetic modelling of nitrogen and organics removal in vertical and horizontal flow wetlands[J]. *Water*

Research, 45(10):3137-3152

- Salvato M, Borin M. 2010. Effect of different macrophytes in abating nitrogen from a synthetic wastewater[J]. *Ecological Engineering*, 36(10):1222-1231
- Shehzadi, M., Afzal, M., Khan, M.U., *et al.* 2014. Enhanced degradation of textile effluent in constructed wetland system using *Typha domingensis* and textile effluent-degrading endophytic bacteria[J]. *Water Research*, 58: 152-159
- Sklarz M Y, Gross A, Soares M I M, *et al.* 2010. Mathematical model for analysis of recirculating vertical flow constructed wetlands[J]. *Water Research*, 44(6):2010-2020
- Vymazal, J. 2009. The use constructed wetlands with horizontal sub-surface flow for various types of wastewater[J]. *Ecological Engineering*, 35:1-17.
- Wen Q C, Chen X, Shi Y, *et al.* 2011. Analysis on Composition and Pattern of Agricultural Nonpoint Source Pollution in Liaohe River Basin, China[J]. *Procedia Environmental Sciences*, 8:26-33
- 吴彬,臧淑英,那晓东. 2012. 灰色关联分析与内梅罗指数法在克钦湖水体重金属评价中的应用[J]. *安全与环境学报*, 12(5):134-137
- Wynn T M, Liehr S K. 2001. Development of a constructed subsurface-flow wetland simulation model[J]. *Ecological Engineering*, 16(4):519-536
- 徐冰冰,许秋瑾,梁存珍,等. 2013. 湖南郴州柿竹园矿区乡镇地下饮用水源重金属水质评价[J]. *环境工程技术学报*, 3(2):113-118
- 徐微雪,段亮,宋永会,等. 2014. 辽河保护区七星湿地表层水与间隙水中氮的时空分布[J]. *环境工程技术学报*, 4(1):40-45
- Yang Z P, Lu W X, Long Y Q, *et al.* 2011. Assessment of heavy metals contamination in urban topsoil from Changchun City, China[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 108(1):27-38
- Yassine M H, Suidan M T, Venosa A D. 2013. Microbial kinetic model for the degradation of poorly soluble organic materials[J]. *Water Research*, 47(4):1585-1595
- 叶捷,彭剑峰,高红杰,等. 2011. 潮汐流人工湿地低温下 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除模型的比较和优化[J]. *环境科学学报*, (07):1456-1463
- Yi Q, Dou X D, Huang Q R, *et al.* 2012. Pollution Characteristics of Pb, Zn, As, Cd in the Bijiang River[J]. *Procedia Environmental Sciences*, 13(0):43-52
- Zhang H J, Zhao X F, Ni Y W, *et al.* 2010. PCDD/Fs and PCBs in sediments of the Liaohe River, China: Levels, distribution, and possible sources[J]. *Chemosphere*, 79(7):754-762
- Zhang Z M, Wang X Y, Zhang Y, *et al.* 2012. The Over Polluted Water Quality Assessment of Weihe River Based on Kernel Density Estimation[J]. *Procedia Environmental Sciences*, 13:1271-1282

中国知网