## 人工湿地去污模型的统一结构特征

### 孔令裕<sup>1</sup>,倪晋仁<sup>2</sup>

(1. 北京大学深圳研究生院城市与环境学院 深圳 518055 2. 北京大学环境工程系水沙科学教育部重点实验室 北京 100871)

摘要 通过对典型人工湿地去污模型的分析比较 提出了基于各模型微分方程而建立的统一去污模型。该模型能够将典型去污 模型作为特例而导出 ,并能很好地解释这些模型之间的过渡关系。以潜流湿地中 NH4 和 BOD5的降解为例 ,对统一去污模型的 应用情况进行了简单探讨 ,表明利用统一去污模型结构有助于深入揭示去污机理 ,从而提出更为精确的去污模型。 关键词 :人工湿地 ; 统一去污模型 ; 结构特征

文章编号 :1000-0933 (2007 )04-1428-06 中图分类号 :Q948 文献标识码 :A

# Characteristics of the generalized structure of pollutant removal models for constructed wetlands

#### KONG Ling-Yu<sup>1</sup> ,NI Jin-Ren<sup>2</sup>

1 the Shenzhen Graduate School of Peking University, School of City and Environment, Shenzhen 518055, China

2 Ministry of Education Key Laboratory for Water and Sediment Sciences, Department of Environmental Engineering, Peking University, Beijing 100871, China

Acta Ecologica Sinica 2007 27 (4) 1428 ~ 1433.

**Abstract**: Based on the analysis of typical existing pollutant removal models for constructed wetlands, this paper presents a generalized expression of various models in terms of differential equations. The proposed generalized expression can not only embrace most existing models as special cases but also interpret the transitions from one model to another. Potential application of the generalized expression was exemplified through the case of  $NH_4^+$  and  $BOD_5$  degradation in subsurface flow constructed wetlands. It was shown that the generalized expression is helpful to reveal the pollutant removal mechanism , and thus it is good for development of more accurate models.

Key Words : constructed wetlands ; generalized expression ; pollutant removal models ; structure characteristics

人工湿地兼有脱氮除磷效率高、投资和运行费用低等优点,因而在城市生活污水、工业废水、雨水处理以 及农业非点源污染控制方面得到了广泛应用。目前,人工湿地去污模型多由经验公式具体表述。这些从不同 出发点或在不同条件下获得的公式虽然形式各异,但是每个公式都是基于实测数据得到或经过观测资料验证 的。那么,这些公式为什么具有不同的结构形式?它们各自的适用范围是什么?它们之间存在什么关系?是 否可能存在一个更为一般性的统一模型将现行诸公式都作为特例而概括?本文在系统比较典型人工湿地去 污模型的基础上,提出人工湿地的统一去污模型,并就其结构特点和应用效果进行分析,试图部分地给出上述

基金项目:国家重点基础研究规划资助项目(G1999043603)

收稿日期 2006-04-27;修订日期 2006-11-28

作者简介 孔令裕 (1980~), 男, 广东省肇庆市人, 硕士生, 主要从事人工湿地设计优化研究. E-mail : konglingyu@iee. pku. edu. cn

<sup>\*</sup> 通讯作者 Corresponding author. E-mail : nijinren@ iee. pku. edu. cn

Foundation item This work was financially supported by State Key Project for Fundamental Research Programme (No. G1999043603)

Received date 2006-04-27 ; Accepted date 2006-11-28

Biography KONG Ling-Yu , Master candidate , mainly engaged in optimal design of constructed wetlands. E-mail : konglingyu@iee. pku. edu. cn

问题的答案。

1 统一去污模型的建立

典型的人工湿地去污模型包括衰减模型、一级动力学模型、零级动力学模型、Monod 模型和生态动力学模型。衰减模型是根据大量运行数据而建立的一种"输出-输入"统计响应关系<sup>[1]</sup>,并不能真正反映湿地系统去 污过程。生态动力学模型因其反应公式众多、参数难以确定而仅用于湿地系统物质循环的研究<sup>[2]</sup>。因此,目 前反映湿地系统去污过程的典型模型为一级动力学模型、零级动力学模型和 Monod 模型。其中,一级动力学 模型因其简单实用,被认为是目前描述湿地系统去污过程最合适的模型,多用于污染物进水浓度较低的情形; 当污染物进水浓度逐渐增高时,湿地系统会渐趋饱和而体现零级反应的特点<sup>[3]</sup>,这一现象为零级动力学模型 所描述,两者之间的过渡状态由 Monod 模型表征,该模型假设湿地中的生物过程与其他生物系统一样符合 Monod 动力学,应用该模型可避免应用一级模型时尺寸太小和应用零级模型时尺寸太大的问题,但模型参数 值的确定较为困难<sup>[4]</sup>。

尽管不同的学者提出了各种形式的去污模型,但是从典型的去污模型建立的基础出发,可以发现一个有 趣的现象,这就是各类去污模型的微分方程具有十分相似的结构形式,只是相关参数有所不同而已(见表1)。

Table 1 Differential equations of representative pollutant removal models				
序号 Serial number	模型 Model	微分方程 Differential equation		参数 Parameter
1	一级动力学模型 First order model	$\frac{dC}{dt} = -kC$	(1)	$k=k_{1_{p}}=k_{1_{A}}/\left(\varepsilon h\right.$ )
2	零级动力学模型 Zero order model	$\frac{dC}{dt} = -k$	(2)	$k=k_{0\ r}=k_{0\ A}/$ (ch )
3	Monod 模型 Monod model	$\frac{dC}{dt} = -kC/(K+C)$	(3 )	$k=k_{0\ r}=k_{0\ A}/$ (ch )

表1 典型去污模型的微分方程

表1中 $k_{1,y}$ (量纲: $T^{-1}$ ), $k_{1,x}$ ( $LT^{-1}$ )分别为一级体积、面积速率常数 $k_{0,y}$ ( $ML^{-3}T^{-1}$ ), $k_{0,x}$ ( $ML^{-2}T^{-1}$ )分别 为零级体积、面积速率常数 K 为半饱和常数( $ML^{-3}$ )。

人工湿地主要通过湿地系统中物理、化学及生物过程的协同作用实现去污<sup>[5]</sup>。就生物过程而言,无论是 生长性生物降解还是共代谢生物降解,污染物的降解过程都可用 Monod 模型或形式上与之相似的 Michaelis-Menten 方程描述<sup>[6]</sup>。即使多种物质共存且相互限制,其降解过程也可用多重 Monod 模型描述<sup>[6]</sup>。研究表明, 废水处理系统中有机物单独组分、NH<sup>+</sup><sub>4</sub>、NO<sup>-</sup><sub>3</sub>等对应的 K 值在同一数量级上<sup>[6]</sup>,人工湿地作为一类废水处理 系统也有这一现象。另一方面,除 COD 和 BOD<sub>5</sub>两个综合指标外,人工湿地各污染物进水浓度均在一个数量 级上<sup>[1]</sup>。因此,更普遍的多重 Monod 模型可以表示为:

$$\frac{dC}{dt} = -k_1 \left(\frac{C}{K+C}\right)^m \tag{4}$$

式 (4)仅从生物降解角度描述了人工湿地去污过程,相关模型尚需进一步考虑物理、化学过程的影响。 湿地系统中的物理过程主要指基质对污染物的吸附作用和离子交换作用。根据吸附理论和离子交换理论,物 理过程对污染物降解过程的影响可描述为:

$$\frac{dC}{dt} = -k_2 C^p \tag{5}$$

湿地系统中的化学过程主要指水解反应、化学沉淀、拮抗和氧化还原反应等。借鉴环境中物质发生化学 反应的表征模型,化学过程对污染物降解过程的影响可描述为:

$$\frac{dC}{dt} = -k_3 C^q \tag{6}$$

综合物理、化学、生物过程的协同作用,人工湿地的统一去污模型可归纳为:

http://www.ecologica.cn

$$\frac{dC}{dt} = -k_1 \left(\frac{C}{K+C}\right)^m \times k_2 C^p \times k_3 C^q \tag{7}$$

令  $k = k_1 \times k_2 \times k_3$  p = m + p + q, 则式 (7) 变为:

$$\frac{dC}{dt} = -\frac{kC^n}{(K+C)^n} \tag{8}$$

式中 *m*、*n* 为结构参数 ;*K* 为半饱和常数 ;*k* 是综合参数 (量纲随 *m*、*n* 取值而定 ) ,*K*、*k* 都与 *t* 或 *C* 无关。 将式 (8)进行无量纲化处理 ,可得:

$$\frac{dC'}{dz'} = -\Omega \frac{C'^n}{(1+C')^m} \tag{9}$$

式中  $\Omega = \frac{k \varepsilon \alpha}{K^{m+1-n}Q} = \frac{k \tau}{K^{m+1-n}}$ ,表征一定流量或水力停留时间条件下湿地的最大处理能力  $\varepsilon$  为湿地空隙 率  $\alpha$  为湿地截面积  $(L^2)$ ; Q 为进水流量  $(L^3 T^{-1})$ ;  $\tau$  为湿地水力停留时间  $(T^{-1})$ ; C' = C/K z' = z/Z z 为湿地 沿长某处到进水口的距离 (L) Z 为湿地全长 (L)。

2 统一去污模型的表征

统一去污模型在 *m* = *n* = 0 时为零级动力学模型 ,在 *m* = 0 ,*n* = 1 时为一级动力学模型 ,在 *m* = *n* = 1 时为 Monod 模型。因此 ,现行典型去污模型都只是统一去污模型中结构参数取特定值时获得的特殊结果。由于这 些模型之间本身存在一定的差异 ,在应用方面也具有不同的适用性 ,因而可以推断它们之间还可能存在一系 列过渡模型 ,能够更加精确、系统地揭示人工湿地去污机理。

2.1 零级动力学模型与 Monod 模型之间的过渡模型

现行去污模型研究简单地假定人工湿地的去污过程或遵循零级动力学模型或遵循 Monod 模型,非此则 彼,并未探讨两者之间的过渡模型,因此常常需要调整模型的参数值来拟合污染物的实际降解曲线,使得模型 参数的稳定性差。

研究表明,人工湿地去除 BOD<sub>5</sub>的  $k_{0,A}$ 与其最大负荷相当<sup>[7]</sup>。以 80 kg/ (hm<sup>2</sup>·d )为潜流湿地去除 BOD<sub>5</sub>的 最大负荷 结合潜流湿地的典型水深 (0.6~1.0m)和典型空隙率 (0.3~0.4)<sup>[1]</sup>,可求得 k 为44 mg/ (L·d)。 K值的动力学分析较为复杂,可参考活性污泥工艺去除生活污水中有机物的典型 K 值,取 60 mg/L。由此出发, 可得零级动力学模型和 Monod 模型之间的一系列过渡模型。由图 1 (a )可见,各过渡模型表征曲线的 m/n 相 等 随着 m 减小 n - m 逐渐减小,各曲线逐渐趋向于 Monod 模型表征曲线。图 1 (b )中各过渡模型表征曲线 的 n - m 相等,随着 m 增大,m/n 逐渐增大,各曲线逐渐趋向于 Monod 模型表征曲线。n - m 逐渐减小或 m/n逐渐增大的过程就是生物作用所作贡献逐渐增大的过程,当仅考虑生物作用时可用 Monod 模型表征污染物 降解过程,这与 Monod 模型的理论基础相符。因此,应用零级动力学模型与 Monod 模型之间的过渡模型,可 避免现行去污模型稳定性差的不足,更精确地揭示人工湿地去污机理。

2.2 Monod 模型与一级动力学模型之间的过渡模型

一般认为,一级动力学模型是 Monod 模型的特例。当 C << K 时, Monod 模型变为:

$$\frac{dC}{dt} = -\frac{k_{0 \ V}}{K}C \tag{10}$$

此时  $k_{0,y}/K$  与一级动力学模型的  $k_{1,y}$ 理应相等。然而 ,针对同一个湿地的研究表明 ,两者并不相等<sup>®1</sup>。 因此 ,可推断一级动力学模型与 Monod 模型之间有一系列过渡模型。

由图 2 (a )可见 随着 m/n 或 n - m 的增大 ,各过渡模型表征曲线逐渐趋向于 Monod 模型表征曲线。这是 因为 ,BOD<sub>5</sub>的降解主要是在湿地系统的好氧层内进行 ,在污水流量和 BOD<sub>5</sub>进水浓度一定时 ,好氧层的厚度是 一定的<sup>161</sup>。当 BOD<sub>5</sub>进水浓度逐渐增大时 ,好氧层的厚度将增大 ,生物过程在 BOD<sub>5</sub>降解过程中的作用也随之 增大。以 Arcata 湿地第 8 单元的 BOD<sub>5</sub>降解为例 ,当 BOD<sub>5</sub>进水浓度不同时 ,其降解曲线的特点各有不同 (见 图 2 (b ))。单一地采用一级动力学模型或 Monod 模型均难以把这些特点予以反映。用统一去污模型拟合图













2 (b)中各曲线能很好地反映其特点并揭示其中去污机理。统一去污模型在 m = 2.5、n = 3.0 时适用于表征 BOD<sub>5</sub>进水浓度在 140mg/L 时 BOD<sub>5</sub>的降解过程 ,在 m = 2.0、n = 2.45 时适用于表征 BOD<sub>5</sub>进水浓度在 60mg/L 时 BOD<sub>5</sub>的降解过程 ,在 m = 2.0、n = 2.4 时和在 m = 1.5、n = 2.0 时也分别对应于 BOD<sub>5</sub>进水浓度为 40、20 mg/L时 BOD<sub>5</sub>的降解过程。m/n 或 n - m 的变化能够很好地反映由 BOD<sub>5</sub>进水浓度不同所导致的好氧层厚度

的变化情况。

3 统一去污模型的应用

由于潜流湿地的应用较多 本文以潜流湿地为例探讨统一去污模型的应用。图 3a 曲线为现行去污模型 所表征的潜流湿地中 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>的典型降解曲线。经计算 統一去污模型在 m = n = 0、m = n = 1 分别对应于零级动 力学模型、Monod 模型 ,在 m = n = 1.2、m = n = 2.7 时适用于表征  $k_{1,y} = 0.52$  和  $k_{1,y} = 0.23$  的一级动力学模型 对应的降解曲线。0.23、0.52 是  $k_{1,A}$ 取全球平均值和典型空隙率、水深求算而得的典型值 ,当其在 [0.23,0. 52 ]中取值时 ,一级动力学模型描述的 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>的降解过程都可统一去污模型表征。



图 3 潜流湿地中  $NH_4^+$ 和 BOD<sub>5</sub>的典型降解曲线



图 3b 曲线为现行去污模型所表征的潜流湿地中 BOD<sub>5</sub>的典型降解曲线<sup>[41]</sup>。由于潜流湿地去除 BOD<sub>5</sub>的 Monod 模型和零级动力学模型多数仅是理论探讨 模型参数值没有明确,所以此处仅通过一级动力学模型来 获取潜流湿地去除 BOD<sub>5</sub>的典型降解过程。0.17、6.11 分别为目前见诸文献的  $k_{1,y}$ 的最小值和最大值,对应的 一级动力学模型表征的 BOD<sub>5</sub>的解过程可分别用统一去污模型在 m = n = 2.0 时和 m = 0.4, n = 1.0 时描 述。统一去污模型在 m = 1.0, n = 1.4 时对应于  $k_{1,y} = 0.84$  时的一级动力学模型。由于  $k_{1,y}$ 的大部分文献值 比 0.84 大,因此相应的一级动力学模型所表征曲线大多趋向于折线,此时一般  $m \leq 1$ 。

潜流湿地去除 BOD、NH<sub>4</sub><sup>+</sup> 的机理各不相同 ,其去除能力也大不一样。现行去污模型多通过改变模型参数 值加以区分 ,但由于参数值稳定性差 ,在应用上存在许多困难。统一去污模型不仅可以通过调整结构参数获 得各种模型的对应结构 ,而且能够更精确、系统地反映不同的去污机理。从统一去污模型的角度来看 ,NH<sub>4</sub><sup>+</sup> 主要通过自养细菌好氧作用去除 ,而自养细菌对溶解氧浓度更敏感 ,其氧气 K 值比一般的溶解氧浓度高很 多 ,所以通常考虑氧气的限制作用而采用双营养物制约的模式<sup>61</sup> ,即统一去污模型中取 m = n = 2。另外 ,有机 化合物对硝化细菌有毒性作用 ,而亚硝化菌作为硝化过程链最薄弱的环节 ,比硝化菌更容易受到有机抑制剂 的影响。这些抑制影响大多以非竞争性方式进行<sup>61</sup> ,因而双营养物制约的模式也是必要的。当需要同时考 虑氧气和有机物的抑制作用时 (这在实际中相当普遍 ) ,则要引入三重 Monod 模型 ,对应于统一去污模型取 m = n = 3 时的情形。用统一公式表征潜流湿地 NH<sub>4</sub><sup>+</sup> 的实际降解曲线时 ,一般 m > 1 ,且多数情况下 m = n ,表明 氧气或有机物的限制作用是经常存在的。由于各人工湿地系统中氧气和有机物浓度以及它们的抑制作用有 所不同 导致 m、n 取值不局限于整数。

BOD<sub>s</sub>主要通过异养细菌好氧作用去除,氧气有可能成为速率限制因子。研究表明,只有溶解氧浓度非常低时,才可能对异养细菌生长造成严重影响,这一影响可通过选择氧气的K值为 $0.2 \text{mg/L}^{61}$ 适当反映。由于这低于人工湿地里一般的溶解氧浓度,因而氧气的限制作用较小。再者,BOD<sub>s</sub>降解过程中不易受 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>和其他污染物的抑制影响,所以用统一去污模型表征潜流湿地 BOD<sub>s</sub>实际降解曲线时,大部分曲线对应统一去污模型在 $m \leq 1$ 的情形。

由上可见,与现行去污模型相比,统一去污模型在模拟污染物降解过程的同时能很好地反映污染物降解 机理,从而把去污模型和去污机理的研究有机结合起来。通过调整结构参数拟合各类污染物降解的实测数 据,可对人工湿地的去污机理尤其是物理、化学、生物过程各自所起作用作合理的判断;对人工湿地去污机理 的深入理解,尤其是对物理、化学、生物过程各自作用的掌握,也有助于我们提出更为精确的去污模型。 4 结论

在系统比较典型人工湿地去污模型的基础上,提出了现行人工湿地去污模型的统一模型为

$$\frac{dC}{dt} = -\frac{kC^n}{(K+C)^m}$$

该模型能很好地将现行去污模型作为特例而导出,有助于理解现行各类去污模型之间的关系。对潜流湿 地系统中 BOD<sub>5</sub>和 NH<sup>↓</sup> 的实际降解过程的分析表明,统一去污模型能够针对不同污染物的降解特点而作具体 深入的分析,从而为进一步深入探讨不同类型湿地系统中污染物去除模型的特点及其复杂反应机理奠定 基础。

#### **References** :

- [1] Kadlec R H, Knight R L, Vymazal J, et al. Applications of the technology. In : Kadlec R H, Knight R L, Vymazal J, eds. Constructed wetlands for pollution control : processes, performance, design and operation. London : IWA Publishing, 2000, 23 – 58.
- [2] Wynn T M, Liehr S K. Development of a constructed subsurface-flow wetland simulation model. Ecological Engineering, 2001, 16:519-536.
- [3] Andrews J F. Kinetic models of biological waste treatment. Biotechnology and Bioengineering Symposium , 1971 , 2:5-33.
- [4] Rousseau D P L, Vanrolleghem P A, Pauw N D. Model-based design of horizontal subsurface flow constructed treatment wetlands : a review. Water Research, 2004, 38:1484 – 1493.
- [5] Ji G D, Sun T H, Chang S J, et al. Super heavy oil produced water treatment by surface flow constructed wetland. Chinese Journal of Environmental Science, 2001, 22 (4):95-99.
- [6] Grady C P L J, Daigger G T, Lim H C. Introduction. In : Grady C P L Jr, Daigger G T, Lim H C editor, Zhang Xihui, Liu Yongdi, translators. Biological wastewater treatment : second edition, revised and expanded. Beijing : Chemical Industry Press, 2002.
- [7] Mitchell C, McNevin D. Alternative analysis of BOD5 removal in subsurface flow constructed wetlands employing Monod Kinetics. Water Research , 2001, 35 (5):1295-1303.
- [8] George D B, Kemp M C, Caldwell A S, et al. Design considerations for subsurface flow wetlands treating municipal wastewater. Proceeding of the 67th annual conference of the water environment federation. 1994, 8:13-24.

#### 参考文献:

- [5] 籍国东,孙铁珩,常士俊,等. 自由表面流人工湿地处理超稠油废水. 环境科学,2001,22(4):95~99.
- [6] Grady C P L Jr, Daigger G T, Lim H C. 绪论. 见: Grady C P L Jr, Daigger G T, Lim H C 著, 张锡辉, 刘勇弟译. 废水生物处理, 第2版, 改变和扩充. 北京: 化学工业出版社, 2002.