

# 微曝气垂直流湿地污染物去除动力学模型分析

潘继征<sup>1</sup> 柯凡<sup>1,2</sup> 李文朝<sup>1</sup>

(1. 中国科学院南京地理与湖泊研究所湖泊与环境国家重点实验室,南京 210008; 2. 中国科学院研究生院,北京 100049)

摘要:通过对自主研发的微曝气垂直流湿地系统长期运行观测数据的统计分析,在参考填充塔模型基础上,利用质量衡算方程建立了微曝气垂直流湿地污染物去除动力学模型,并利用该模型对湿地在气水比分别为 0.5:1、1:1、2:1 和 3:1 时的污染物去除效果和去除动力学常数  $k$  值进行了计算和分析.结果表明,在处理水质稳定、水量恒定的情况下,微曝气垂直流湿地对各种污染物的去除过程动力学常数  $k$  值均随工艺参数气水比的增大而增大,即对污染物的去除能力随气水比的增大而增强;各水质指标的反应动力学常数变化曲线形状有所不同,动力学常数与气水比的关系主要有线性关系和对数关系.综合各个水质指标的曲线形式与变化规律可以得到微曝气垂直流湿地的最佳气水比设计值为 2:1,对应  $BOD_5$  和  $NH_4^+-N$  的  $k$  值分别为  $3.8 d^{-1}$  和  $4.1 d^{-1}$ .

关键词:人工曝气;垂直流湿地;动力学;模型

中图分类号:X703.1 文献标识码:A 文章编号:0250-3301(2010)11-2633-06

## Dynamics Model Analysis of Pollutants Removal in Aerated Vertical-flow Wetland

PAN Ji-zheng<sup>1</sup>, KE Fan<sup>1,2</sup>, LI Wen-chao<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Lake Science and Environment, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** Based on the dynamic model building of pollutants removal in aerated vertical-flow constructed wetland, data of the wetland under different aeration conditions were analysed. Different aeration conditions'  $k$  values were calculated, which represented the pollutants removal kinetic constants. The results demonstrate that the efficiency of pollutants removal is higher with the increasing gas-water ratio. The most favorable designing gas-water ratio of the aerated vertical-flow constructed wetland was chosen as 2:1 through analysis of curve fits by regression with kinetic constants values and gas-water ratio values. The corresponding  $k$  values of  $BOD_5$  and  $NH_4^+-N$  are  $3.8 d^{-1}$  and  $4.1 d^{-1}$  respectively.

**Key words:** artificial aeration; vertical-flow wetlands; dynamics; model

人工湿地作为一项水污染控制技术,相比传统的污水处理工艺具有基建投资低、运行费用少、维护与管理简便、景观环境优良、生态安全性高、规模适应性强等优点,近年来在生活污水<sup>[1]</sup>、污染河水<sup>[2,3]</sup>、养殖废水<sup>[4]</sup>、农田径流<sup>[5]</sup>、工业废水<sup>[6]</sup>、污水厂尾水深度净化<sup>[7]</sup>等众多领域得到了广泛的应用.但是随着水污染控制技术的不断发展,尤其是土地资源的紧缺,人工湿地系统的堵塞、老化,以及负荷能力较低的问题日益突出.

国内外已有一些学者采用人工增氧 (artificial aeration) 的方法来 提高湿地的污水处理能力. Ouellet-Plamondon 等<sup>[8]</sup>在种植了菖蒲的水平流湿地模型进水端人工曝气,取得了较高的 COD 和总氮的去除率. Noorvee 等<sup>[9]</sup>对湿地的进水进行预曝气处理并研究其对水平潜流湿地的影响作用; Nivala 等<sup>[10]</sup>用曝气水平潜流湿地处理垃圾填埋场渗滤液,发现在曝气下取得了很高的氨氮 ( $NH_4^+-N$ ) 与  $BOD_5$  去

率; Lahav 等<sup>[11]</sup>利用自创的被动增氧技术在垂直流湿地床模型中进行试验,取得了  $300 g \cdot (m^2 \cdot d)^{-1}$  的氮去除负荷; 鄢璐等<sup>[12]</sup>通过对复合潜流湿地前端进行强化供氧,显著提高了有机质和总氮的去除率.

本课题组以曝气生物滤池技术和人工湿地为基础开发了“微曝气垂直流湿地”技术,采用了人工曝气、气水同路的供氧方式,从根本上改善了人工湿地的氧化条件,打破了传统的湿地深度限制,已有的研究结果显示,微曝气垂直流湿地内部曝气氧利用率经小试试验测定最高达到了 14.04%,并且在高水力负荷下有较高的  $BOD_5$  和氨氮去除率<sup>[13,14]</sup>. 本研究在对微曝气垂直流湿地系统长期的运行观测数据统计基础上,对该湿地的污染物去除动力学进行了

收稿日期:2009-11-24; 修订日期:2010-05-04

基金项目:国家水体污染控制与治理科技重大专项 (2008ZX07101-007-05); 国家高技术研究发展计划 (863) 项目 (2005AA60101004); 国家自然科学基金项目 (41001324)

作者简介:潘继征 (1975 ~), 男, 博士, 助理研究员, 主要研究方向为湖泊污染控制, E-mail: jzpan@niglas.ac.cn

模型构建与分析, 以为微曝气垂直流湿地系统的整体性能评价和工艺运行的优化提供理论依据和技术指导.

1 材料与方 法

1.1 实验模型

如图 1 所示, 试验装置由不锈钢制成, 长 × 宽 × 高为 4 m × 1.5 m × 1.7 m, 池体的底、左、右、后 4 面采用不锈钢板作为外壁, 前壁为玻璃, 采用石灰石作为填料, 粒径 2 ~ 3 cm, 填料高度 1.4 m, 出水水位 1.5 m, 采用菖蒲作为湿地植物, 平均株高 0.5 m, 密

度 20 株/m<sup>2</sup>, 预处理出水从湿地模型底部进入, 同时在进水管中布设了穿孔曝气管, 这样可以使气、水先在管道中充分混合, 提高氧转移效率. 曝气系统分为 6 个区, 由时间控制器控制每区依次轮换曝气 (图 2). 湿地模型在高水力负荷下运行, 实际运行处理水量控制约 8 m<sup>3</sup>/d. 模型系统的稳定运行期从 2006 年 9 月 ~ 2008 年 4 月, 历时 19 个月. 模型处理的水源为经过生物接触氧化工艺预处理的出水, 生物接触氧化工艺单元接纳的是滇池临湖村镇生活污水 (福保村) 和部分重污染的河水 (海河), 主要水质指标如表 1 所示.

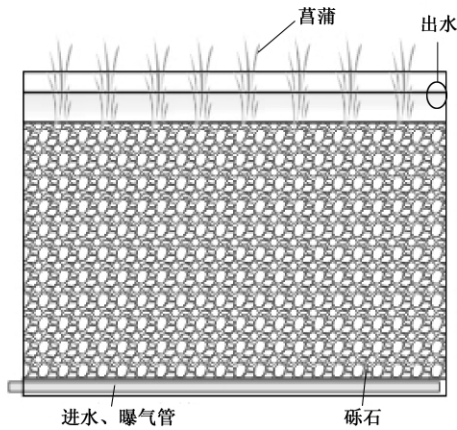


图 1 微曝气垂直流湿地结构示意图

Fig.1 Structure of aerated vertical-flow constructed wetland

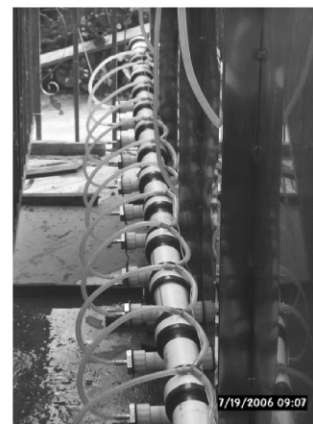
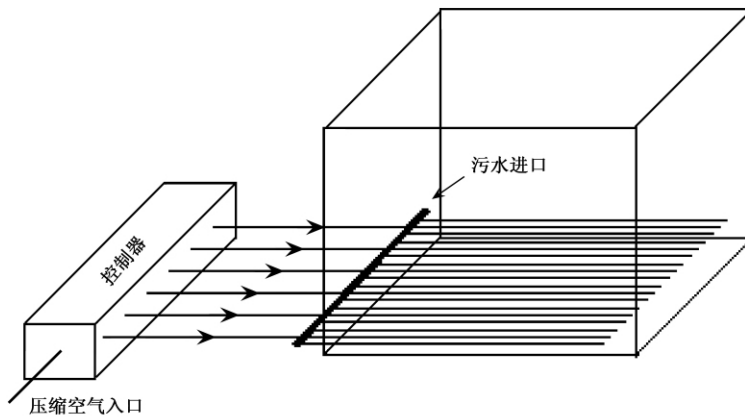


图 2 轮换式曝气系统示意

Fig.2 Diagrams of circulant aeration system

表 1 微曝气垂直流湿地模型进水水质状况

Table 1 Water quality description of aerated vertical-flow wetland pilot unit

参数	SS	BOD <sub>5</sub>	COD	TP	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> -P	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N	TN
均值/mg · L <sup>-1</sup>	9.68	18.93	41.98	0.64	0.43	6.41	8.87
方差	9.75	7.28	15.88	0.39	0.27	3.69	4.73

1.2 测试项目与分析方法

水质测试指标包括: DO、pH、SS、COD、BOD<sub>5</sub>、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N、TN、TP、PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P,每周监测 1 次。

试验分析方法: DO 用雷磁 JPB-607 溶解氧测定仪测定, pH 用 METTLER TOLEDO 的 DELTA 320 pH 计测定, SS 用重量法, COD 用重铬酸钾法, BOD<sub>5</sub> 用接种稀释法, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 用纳氏试剂法、NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N 用 N-(1-萘基)-乙二胺光度法、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 用酚二磺酸法、TN 用碱性过硫酸钾消解-紫外分光光度法、TP 用过硫酸钾消解-钼锑抗分光光度法、PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P 钼锑抗分光光度法<sup>[15]</sup>。

2 结果与分析

2.1 数学模型的推演

将微曝气垂直流湿地看成化工领域中的填充塔,以填充塔模型为原型研究微曝气垂直流湿地的净化机制。填充塔是一个理论建模比较困难的生化操作,主要是基于经验和半经验的模型方法<sup>[16,17]</sup>。

2.1.1 模型假设

通过一些简化的模型假设,将有效因子法用于填充塔理论性能的研究。假设①:电子受体是过量的而电子供体作为单一限制营养物。假设②:每个断面只存在一种微生物,如果电子供体是有机物则为异养菌,如是氨氮则为自养菌。异养菌对溶解性 COD 的去除过程与自养菌对氨氮的去除是相类似的。假设③:生物膜处于稳定条件下,生物膜表面因水流剪切力作用所造成微生物损失速率与其生长速率相等,从而使生物膜厚度保持恒定。假设④:塔内各处生物膜的厚度相同。假设⑤:脱落的微生物由水流带走,且具有去除基质的作用。假设⑥:废水均匀流过整个填充塔的横截面,在整个塔内,废水的流动处于均匀层流状态。假设⑦:塔内水流具有良好的推流特征。所有这些假设对于建立模型具有重要意义,基于这些假设建立的模型可以非常准确地用于观察和理解填充塔的主要特征。

2.1.2 模型的建立

把微曝气垂直流湿地的填料床看成是由单一的砾石组成的大截面填充塔,填料层底部经合理布置的进水配水系统使污水均匀分布进入湿地,间歇式的曝气装置使得污水在大部分时间能充满填料缝隙并处于饱和状态,保证湿地床中水的流动状态为层流态,根据达西定律,有:

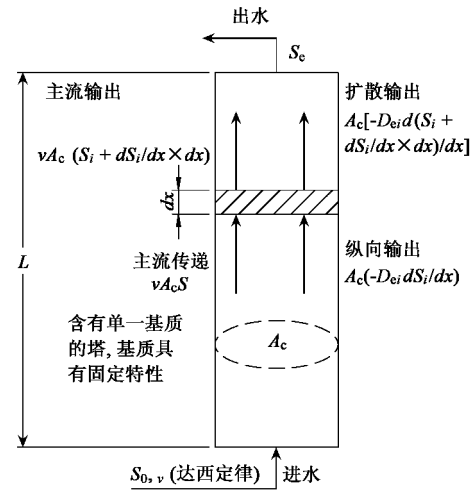


图 3 微曝气垂直流湿地模型示意

Fig. 3 Diagram of aerated vertical-flow constructed wetland model

$$v = kI \tag{1}$$

式中  $v$  为渗流流速;  $I$  为水力坡度;  $k$  为渗透系数。

而微曝气垂直流湿地的水中污染物质量传递可认为是主流传递和纵向扩散传递之和,通常使用菲克定律描述,假设在垂直水流的截面  $A_c$  上浓度分布均匀,浓度只沿水流方向变化,即存在着一个纵向扩散通量:

$$J_i = -D_{ei} \frac{dS_i}{dx} \tag{2}$$

式中  $J_i$  为污水中组分  $i$  的纵向有效扩散通量,  $D_{ei}$  为组分  $i$  的纵向有效扩散系数,可由试验得出;  $S_i$  为组分  $i$  在  $x$  处的浓度。

图 3 是微曝气垂直流湿地的示意。在其中选择一个体积微元作为研究对象,微元体积为  $dV = A_c dx$ 。

$dV$  内的质量衡恒算方程为:

$$A_c dx \frac{dS_i}{dt} = \left( vA_c S_i - A_c D_{ei} \frac{dS_i}{dx} \right) - \left[ vA_c \left( S_i + \frac{dS_i}{dx} dx \right) - A_c D_{ei} \frac{d}{dx} \left( S_i + \frac{dS_i}{dx} dx \right) \right] + A_c dx \mu (S_i) \tag{3}$$

式中  $A_c$  为横截面积,  $dx$  为体积微元的高度,  $S_i$  为组分  $i$  在  $x$  处的浓度,  $v$  为渗流流速,  $D_{ei}$  为组分  $i$  的纵向有效扩散系数,可由试验得出,  $\mu$  为比增长速率。

式(3)中左边为  $i$  组分单位时间内在微元体积  $dV$  内的变化量;右边第 1 个括号内表示的是  $i$  组分单位时间内的源项,第 2 个括号内表示的是  $i$  组分单位时间内的汇项,第 3 项则为单位时间的生化反应量,及生化反应速率,由 Monod 方程给出:

$$\mu(S_i) = \hat{\mu}(S_i) \frac{S_i}{K_s + S_i} \quad (4)$$

当  $S_i$  远小于  $K_s$  时,分母部分可以近似等于  $K_s$ :

$$\mu(S_i) = \frac{\hat{\mu}(S_i)}{K_s} S_i \quad (5)$$

式中,  $\hat{\mu}(S_i)$  是  $i$  组分的最大降解速度,  $K_s$  是降解速率常数,  $S_i$  为组分  $i$  的浓度,  $\hat{\mu}(S_i)$  和  $K_s$  为常数,可以根据试验数据由 Lineweaver-Burk 作图法得到. 质量衡算方程经整理得:

$$\frac{dS_i}{dt} = D_{ei} \frac{d^2 S_i}{dx^2} - v \frac{dS_i}{dx} + \mu(S_i) \quad (6)$$

### 2.1.3 模型求解的结果

经过一系列的数学变换和积分求解,得到污染物的去除动力学模型方程为:

$$S_e = S_0 e^{-kt} \quad (7)$$

$$k = \frac{\hat{\mu}(S_i)}{K_s} \quad (8)$$

式中,  $S_e$  为出水污染物浓度, mg/L;  $S_0$  为进水污染物浓度, mg/L;  $k$  为反应动力学常数,  $d^{-1}$ ;  $t$  为水力停留时间, d.

微曝气垂直流湿地模型污染物去除动力学方程可以用于定量计算污染物在湿地中去除的强度,也可以通过已测定的动力学  $k$  值预测出水水质,或者

计算污染物去除所需水力停留时间 HRT,由于在模型的建立中假设污水在大部分时间能充满填料缝隙并处于饱和状态,那么该模型同样适用于未曝气状态下的垂直流湿地中.

### 2.2 模型应用

微曝气垂直流湿地模型在运行过程中的处理水量为  $8 \text{ m}^3/\text{d}$ ,通过调整气水比实现工艺参数的调节,气水比工艺参数的调节分为 4 个阶段,分别为 0.5:1、1:1、2:1 和 3:1,对应于每个阶段所获得的进出水污染物浓度试验数据,可以通过式 (7) 计算该阶段的污染物去除过程动力学常数,以定量表征该阶段的污染物去除速率.

将微曝气垂直流湿地模型单元的进出水水质参数按照不同的气水比工况进行分类,整理得到 4 个气水比工况下的水质数据平均值数据,代入式 (7) 可计算得到相应工况下的模型污染物降解反应动力学常数  $k$  值,如表 2 所示.

以气水比的数值为  $x$  轴,表 2 得到的各水质指标反应动力学常数  $k$  值为  $y$  轴作散点图,并对得到的数据点进行拟合,如图 4 所示,拟合所得曲线的相关系数  $R^2$  值均较高,显示动力学常数随气水比的变化呈现较好的规律性.

表 2 污染物去除过程反应动力学常数

Table 2 Reaction kinetic constants of pollutants removal processes

序号	气水比	反应动力学常数 $k/d^{-1}$					
		BOD <sub>5</sub>	COD	TP	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> -P	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N	TN
1	0.5	2.909 2	1.353 4	0.564 0	0.185 6	1.962 0	0.480 0
2	1	3.507 4	1.389 5	0.833 7	0.663 2	3.293 8	0.612 6
3	2	3.805 4	1.436 7	1.314 4	1.796 8	4.158 1	1.058 6
4	3	4.207 6	1.519 2	1.319 5	2.245 1	3.953 2	1.204 9

图 4 曲线表明,各污染物的去除过程反应动力学常数  $k$  值数据均随气水比的增大而增大,进一步说明垂直流湿地中的曝气机制能够提高湿地对污染物的去除效果.

各指标的  $k$  值随气水比的变化有着不同的变化规律. COD、PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P、TN 的反应动力学常数  $k$  和气水比之间为线性关系,其余指标的  $k$  与气水比均为对数关系.

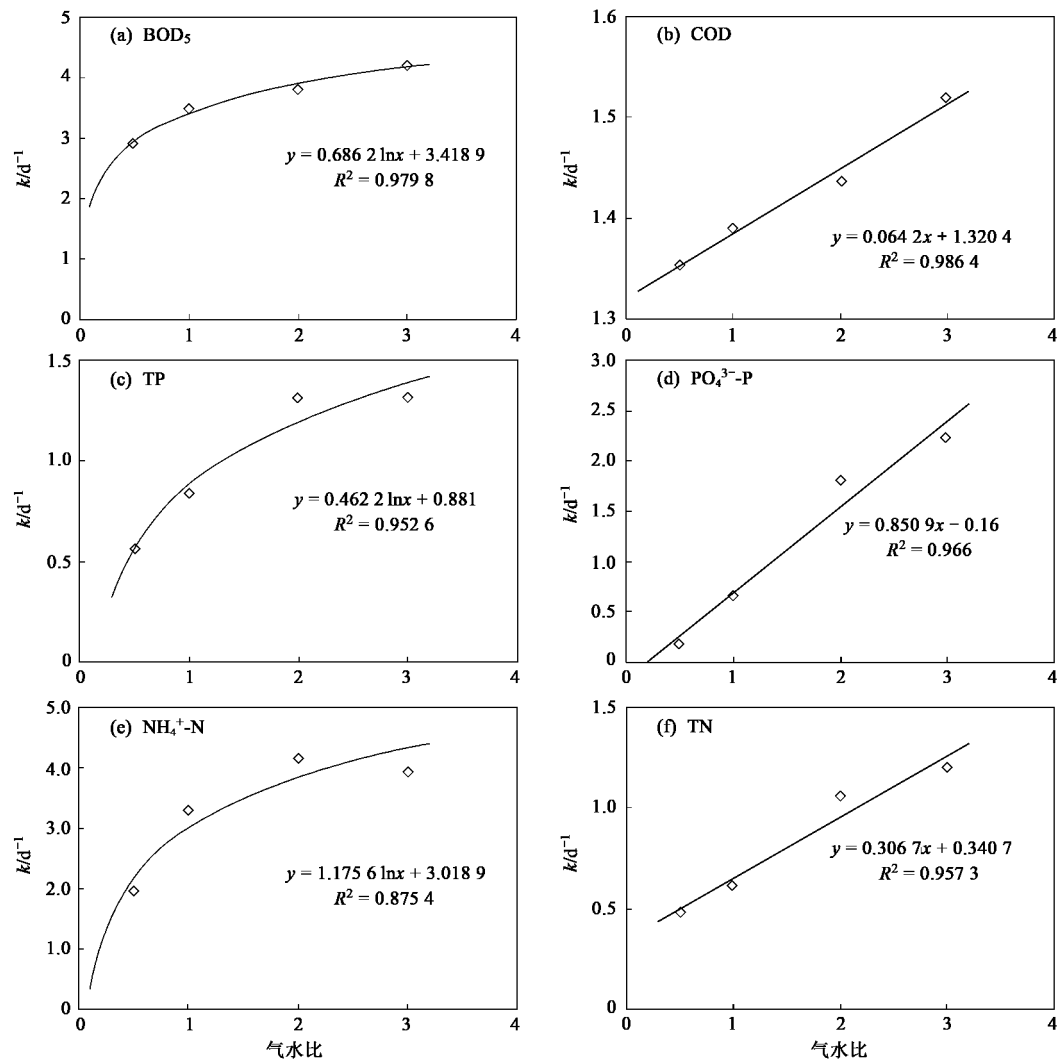
观察 BOD<sub>5</sub> 和 COD 的拟合曲线均与  $y$  轴交叉点大于 1,说明湿地在未曝气情况下,对污水中的有机污染物能有一定的去除效果. TP、PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P 拟合曲线将与  $y$  轴的负数部分相交,说明若是未曝气状态,湿地内部的厌/缺氧状态会引起其中聚磷菌储存的磷释放,而要保证磷不释放,即磷的反应速率常数不

低于磷,那么对照图 4 可知气水比的值应大于 0.2:1. 在不曝气状态下,氨氮的去除速率常数接近于 0,说明微曝气垂直流湿地中不存在厌氧氨氧化情况,而无论怎样增大曝气强度,氨氮氧化的反应速率常数最大值约为  $4.0 \text{ d}^{-1}$  左右;另一方面,随着曝气量的加大,总氮的去除速率常数则不断提高.

综合各个水质指标的动力学常数变化曲线,可以认为气水比 2:1 是较好的曝气参数值,气水比为 2:1 时,氨氮的去除速率常数  $k$  高于  $4 \text{ d}^{-1}$ .

### 3 结论

(1) 通过推导得到了微曝气垂直流湿地污染物去除动力学模型方程  $S_e = S_0 e^{-kt}$ ,该模型不仅适用于曝气微曝气垂直流湿地模型污染物去除动力学方

图4 各水质指标之去除动力学常数  $k$  与气水比的关系Fig. 4 Diagrams of relationships between air-water ratio value and  $k$  which means pollutants removal kinetic constant

程,用于定量计算污染物在湿地中去除的强度,也可以通过已测定的动力学  $k$  值预测出水水质,或者计算污染物去除所需水力停留时间 HRT,由于在模型的建立中假设污水在大部分时间能充满填料缝隙并处于饱和状态,那么该模型同样适用于未曝气状态下的垂直流湿地中。

(2) 在处理水质稳定、水量恒定的情况下,微曝气垂直流湿地对各种污染物的去除过程动力学常数  $k$  值均随工艺参数气水比的增大而增大,即对污染物的去除能力随气水比的增大而增强。

(3) 各水质指标的反应动力学常数变化曲线形状有所不同,动力学常数与气水比的关系主要有线性关系和对数关系。综合各个水质指标的曲线形式与变化规律可以得到微曝气垂直流湿地的最佳气水比设计值为 2:1,对应  $\text{BOD}_5$  和  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  的  $k$  值分别

为  $3.8 \text{ d}^{-1}$  和  $4.1 \text{ d}^{-1}$ 。

参考文献:

- [1] 孙亚兵,冯景伟,田园春,等. 自动增氧型潜流人工湿地处理农村生活污水的研究[J]. 环境科学学报, 2006, 26(3): 404-408.
- [2] 和丽萍. 抚仙湖马料河人工湿地水质净化效果评估研究[J]. 环境科学导刊, 2007, 26(1): 58-61.
- [3] 徐进,张奇,王世和,等. 云南抚仙湖湖滨带复合湿地除氮效果分析[J]. 中国给水排水, 2006, 22(3): 13-15.
- [4] 许春华,周琪,宋乐平. 人工湿地在农业面源污染控制方面的应用[J]. 重庆环境科学, 2001, 23(3): 70-72.
- [5] 陈源高,李文朝,李荫玺,等. 云南抚仙湖淤泥沟复合湿地的除氮效果[J]. 湖泊科学, 2004, 16(4): 331-336.
- [6] 唐述虞. 铁矿废水的人工湿地处理[J]. 环境工程, 1996, (4): 3-7.
- [7] 李爱权,李文朝,潘继征,等. 人工湿地复合基质深度净水除磷实验[J]. 湖泊科学, 2006, 18(2): 134-138.

- [ 8 ] Ouellet-Plamondon C , Chazarenc F , Comeau Y , *et al.* Artificial aeration to increase pollutant removal efficiency of constructed wetlands in cold climate [J]. *Ecological Engineering* ,2006 **27**: 258-264.
- [ 9 ] Noorvee A , Pöldvere E , Mander Ü. The effect of pre-aeration on the purification processes in the long-term performance of a horizontal subsurface flow constructed wetland [J]. *Science of the Total Environment* ,2007 ,**380**: 229-236.
- [10] Nivala J , Hoos M B , Cross C , *et al.* Treatment of landfill leachate using an aerated , horizontal subsurface-flow constructed wetland [J]. *Science of the Total Environment* ,2007 ,**380**: 19-27.
- [11] Lahav O , Eyalartzi , Tarre S , *et al.* Ammonium removal using a novel unsaturated flow biological filter with passive aeration [J]. *Water Research* ,2001 ,**35**: 397-404.
- [12] 鄢璐,王世和,钟秋爽,等. 强化供氧条件下潜流型人工湿地运行特性[J]. *环境科学* 2007 ,**28**(4):736-741.
- [13] 潘继征,李文朝,柯凡,等. 微曝气垂直流湿地中4种基质的充氧性能研究[J]. *环境科学* ,2009 **30**(2): 402-406.
- [14] 柯凡,王磊,李海英,等. 微曝气垂直流湿地处理城郊低浓度生活污水模拟实验[J]. *湖泊科学* ,2008 ,**20**(2): 257-262.
- [15] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. (第四版). 北京:中国环境科学出版社 2002.
- [16] Roberts J. Towards a better understanding of high rate biological film flow reactor theory [J]. *Water Research* ,1973 ,**11**(7): 1561-1588.
- [17] Galler W S , Gotaas H B. Analysis of biological filter variables [J]. *Journal of the Sanitary Engineering Division* ,1964 ,AS-CE (SA6) : 59-79.