



水面型湿地工艺设计方法研究*

李万庆 王德龙 张建文

(天津市环保所,300191) (天津市环境监测中心) (天津市环保所)

摘要 本文改进了美国水面型湿地工艺设计方法,以土壤生物活性取代生物体附着所需介质的比表面积(A_s),以坡长、投配速率与 c_e/c_0 值的函数关系为模型基础。当水力负荷小于 4cm/d 时, c_e/c_0 值上升缓慢,大于 4cm/d 时,以指数形式上升。BOD₅ 值沿处理床长度方向以负指数形式变化。模型结果检验表明,理论计算值与全年实测值的平均相对误差为 $0.35\%—13.86\%$,标准差为 $6.6\%—14.57\%$ 。本文所提出设计方法比美国湿地工艺设计方法的平均相对误差减少 $33.51\%—90.1\%$,标准差减少 $3.32\%—37.87\%$ 。

关键词 水面型湿地,水质模型,BOD 去除率,土壤生物活性。

湿地系统工艺按水力学及生物学条件可划分为渗滤型与水面型。渗滤型湿地包括渗滤湿地与人工苇床;水面型湿地包括自由水面湿地及天然水面湿地。自由水面湿地以地面布水,并保持一定水层,床面水体呈推流,以地表出流为主要特征。处理床不封底,保持湿地原貌不扰动,只辅以人工平整。污水在缓坡上以推流形式缓慢流动,形成自由水面湿地状态。天然湿地是充分利用天然湿洼地或苇塘,采用简单的人工围堤导流,一般水深在 $30—80\text{cm}$ 是一种工程量很小的主要利用天然条件的湿地处理类型。

一、场地特征

试验场地平均坡度 2% ,经人工平整后具有较好的推流条件。在温暖季节平均水深小于 10cm 。湿地水体垂直向温度基本相同,没有明显的层次差异,可以认为整个表面都是活性的。场地芦苇平均密度 $207\text{株}/\text{m}^2$,苇秆平均直径 0.5cm ,属细密型的芦苇种类。表土上部有一层 5cm 厚的“根毡层”,为微生物提供了极为有利的栖息场所。因此,以生物学及水力学条件来评价,水面型湿地的工艺设计原理基本上与地表漫流的土地处理工艺相同,均符合推流式一级反应动力学方程式。

二、模型结构识别

目前,国内外水面型湿地及地表漫流系统 BOD 水质模型的结构可归纳为以下三种形式:

$$c_e/c_0 = A \cdot \exp(-K_t \cdot T) \quad (1)$$

$$c_e/c_0 = A \cdot \exp(-K_t \cdot L/q^{0.5}) \quad (2)$$

$$c_e/c_0 = A \cdot \exp(-B \cdot K_t(A_s)^D \cdot T) \quad (3)$$

式中, c_e, c_0 : 为出水及进水 BOD 浓度 (mg/L);

q : 污水投配速率 ($\text{m}^3/\text{n} \cdot \text{m}$);

A : 进水口污水中不可沉淀的 BOD 部分;

T : 水力停留时间 (d);

L : 水流流径长度 (m);

A_s : 微生物附着生长的介质的比表面积 (m^2/m^3);

B, D : 常数;

K_t 与湿度有关的 BOD 降解速率常数。

方程(1)和方程(3)在形式上基本相同,只是后者增加了比表面积 A_s 和 B, D 两个常数。因此,可将上述三种形式综合成为二种不同的函数结构。

第一种形式: 表示停留时间与 c_e/c_0 值的

* 国家“七五”科技攻关项目。

收稿日期: 1991年11月10日

函数关系。第二种形式：表示坡长，投配速率与 c_e/c_0 值的函数关系。若采用第一种形式，需测定水力停留时间，这会给工程设计者带来诸多不便。而采用第二种形式只需确定坡长或投配速率即可。显然，第二种形式较第一种形式更简便可行。

因此，水面型湿地工艺设计方法，选择表示坡长、投配速率与 c_e/c_0 值的函数关系的模型结构为基本出发点。

三、主要工艺参数对 BOD 去除效果的影响

1. 投配速率

水力负荷与 BOD c_e/c_0 值的现场测试结果见表 1，变化趋势见图 1。

表 1 水力负荷与 BOD c_e/c_0 值实测结果*

水力负荷 (cm/d)	c_e/c_0	水力负荷 (cm/d)	c_e/c_0
4.83	0.1124	3.25	0.0467
3.95	0.1017	1.34	0.0381
2.29	0.0455	3.81	0.0310
2.32	0.0576	5.78	0.2405
6.01	0.1726	5.89	0.2625
7.87	0.4501	4.21	0.2199
8.79	0.4450		

* 出水温度大于 8℃

结果表明，当水力负荷小于 4cm/d 时， c_e/c_0 值上升速率相当缓慢，而水力负荷大于 4cm/d 时， c_e/c_0 则以指数形式迅速上升。

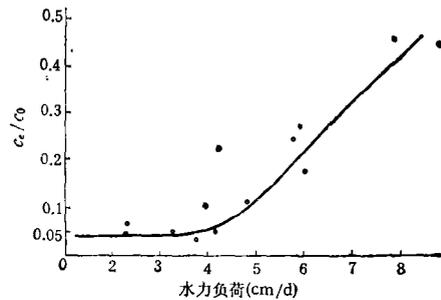


图 1 水力负荷与 BOD c_e/c_0 值变化趋势

将水力负荷与 BOD c_e/c_0 值换算为污水投配速率的相当数值，并进行计算机模拟，其结果为：

$$c_e/c_0 = 2916.635[1 - \exp(-7.6001 \times 10^{-3} \cdot q)]^{1.5053} \quad (4)$$

$$R = 0.85 \quad n = 21$$

应用方程 (4) 模拟全年运行结果并进行误差分析。结果表明，模拟值与实测值的平均相对误差为 3.46%，在 95% 的可靠性下两者之间无显著性差异。

2. 处理床长度

典型月份 (5 月、8 月及 11 月) BOD 均值随处理床长度而变化的运行结果列于表 2。

表 2 典型月份不同采样点 BOD 浓度 (mg/L)

采样点距离 (m)	0	10	25	40	60	92.3
5 月	318.08	182.43	129.23	120.93	63.87	20.83
8 月	108.13	107.45	93.8	81.4	39.97	28.15
11 月	119.25	96.8	78.0	67.3	38.63	25.6

表 2 表明，BOD 浓度值沿处理床长度方向均以负指数形式而变化。相应的关系式为：

5 月：

$$c_e = 289.347 \exp(-2.7220 \times 10^{-2} \cdot L) \quad (5)$$

$$R = 0.98 \quad n = 24$$

8 月：

$$c_e = 125.2729 \exp(-1.608 \times 10^{-2} \cdot L) \quad (6)$$

$$R = 0.97 \quad n = 24$$

11 月：

$$c_e = 118.661 \exp(-1.6900 \times 10^{-2} \cdot L) \quad (7)$$

$$R = 0.99 \quad n = 24$$

四、土壤生物活性与 BOD 降解速率的关系

BOD 降解速率 (K_t 值), 实质上是物理、化学及生物综合作用的结果。其中生物氧化作用是最主要的关键因子。美国, 湿地设计公式中采用生物体附着生长所需介质的比表面积 A_v (m^2/m^3) 来表征生物作用的强弱。这样, 将工艺设计方法在体现处理场地本底的生物作用方面, 比地表漫流土地系统的工艺设计方法向

前迈了一步。但是, A_v 值是个难以测定只能靠估算来确定的值。本课题采用美国 A_v 值的估算方法, 模拟结果与实际运算结果误差较大。

鉴于上述分析, 本课题进行了场地土壤生物活性的测定及研究。土壤生物活性是体现生物氧化作用强弱的最直观、最实际且比较准确的因子, 它比采用生物体比表面积更能反映处理场地的本底特征。表 3 列出不同温度条件下 BOD 的降解速率 K_t 值及相应的土壤生物活性测定结果。

表 3 不同温度条件下 K_t 值与土壤活性测定结果

BOD 降解速率 (d^{-1})	0.1068	0.1405	0.1738	0.2029	0.2258	0.2498
土壤活性 (mg/g 干土 $\cdot 24h$)	0.0135	0.021	0.0625	0.0795	0.1105	0.2695
温度 ($^{\circ}C$)	0.5	5	10	15	20	28

显然, BOD 降解速率是土壤生物活性及温度的函数。将 BOD 降解速率 K_t 与土壤生物活性 H 及温度 t 进行二元叠代回归, 其结果为:

$$K_{H,t} = 0.22756 \cdot H^{0.16218} \cdot t^{0.099346} \quad (8)$$

相关比 = 0.99 $n = 36$

在上述研究基础上, 本课题所建立的水面型湿地工艺设计方法为:

$$c_e/c_0 = \exp(-K_{H,t} \cdot L/q^{0.5}) \quad (9)$$

$$H = 0.014526 \times 1.113^t \quad (10)$$

$$K_{H,t} = 0.22756 \cdot H^{0.16218} \cdot t^{0.099346}$$

式中, $K_{H,t}$: 以土壤生物活性为主要参考的 BOD 降解速率 (m/d);

H : 场地本底土壤生物活性;

t : 出水温度 ($^{\circ}C$).

五、模型结果检验

应用理论设计方法 (9) 式, 对实际运行结果进行模拟, 并进行误差分析。结果见表 4。

表 4 模型检验结果

场地编号	工程结构 (m)	样本数(个)	平均相对误差(%)	标准差(%)
二	57.4×14	23	13.86	14.57
三	89.7×14	23	6.47	10.33
四	93.5×14	21	0.35	6.69
五	92.3×7	27	3.86	9.99

检验结果表明, 理论计算值与全年实测值的平均相对误差为 0.35%—13.86%, 标准差为 6.6%—14.57%, 除二号地(长宽比过小)以外, 其它场地在 95% 可靠性下, 计算值与实测值无显著差异。

的设计方法 (9) 式, 对试验场地所有地块全年运行结果进行模拟, 其结果见表 5。

表 5 表明, 中国天津所提出的湿地系统工艺设计方法比美国湿地工艺设计方法的平均相对误差减少 33.51%—90.1%, 标准差减少 3.32%—37.87%。

六、与国外同类方法比较

应用美国湿地工艺设计方法与本文所论述

表 5 中国(天津)与美国湿地工艺设计方法的比较

地号 项目 国名	二		三		四		五	
	平均相对误差 (%)	标准差 (%)						
美 国	22.76	19.56	9.73	11.33	3.53	6.92	15.02	16.08
中国(天津)	13.86	14.57	6.47	10.33	0.35	6.69	3.86	9.99

七、适用条件

本文所建立的工艺设计方法(9)式适用条件为:进水 $BOD_5 \leq 200\text{mg/L}$,水力负荷 $2.4-5.8\text{cm/d}$,出水温度 $\geq 0.5^\circ\text{C}$,场地表面经过较严格的平整,具有比较理想的推流条件的自由水面湿地。不适用于场地表面未经平整的、高程差较大的天然湿地系统。

由于天然湿地没有统一的场地条件,天然状态各异,不可能具有规范化的工艺设计方法。笔者针对平均水深 $30-80\text{cm}$,植物密度和生长状况不很均匀,只有简单的布水集水设施和少量堵截工程的天津天然湿地的工艺设计进行了研究。摸索出以停留时间和表面有机污染负荷为依据的经验公式:

$$A_s = \frac{t \cdot Q}{n \cdot d} \quad (11)$$

$$A_s = Q \cdot c_0 / 1000 / A$$

式中, A_s : 所需的土地面积 (ha);

t : 水力停留时间 ($t = 10-15\text{d}$)

n : 系统孔隙度;

d : 水深 (m);

Q : 污水处理量 (m^3/d);

c_0 进水 BOD 浓度 (mg/L);

A : 有机负荷临界值。

根据实验结果,采用 $A = 60$

上述方法是在二年运行结果的基础上总结的经验公式。为天然水面湿地工艺设计提供了成功的可借鉴的科学依据。

八、小 结

美国水面型湿地工艺设计方法是在土地漫流工艺设计方法的基础上建立的。它比漫流设计方法在两方面有所突破。一是 BOD 降解速率不是常数而是温度的函数;二是增加了表示生物降解作用的因子——生物体附着生长所需介质的比表面积 (A_s)。以此来体现不同场地本底生物作用的强弱。较好地体现出湿地系统中 BOD 的净化规律。

本文所提出的方法是在美国湿地设计方法的基础上建立的。它以土壤生物活性取代生物体附着生长所需介质的比表面积 (A_s)。在体现处理场地本底的生物降解作用方面较美国湿地设计方法更直观、准确且易于测定。较恰当地反映出系统中 BOD 净化的内在规律。在理论上是合理的,经实践的检验是可行的。模型精度优于美国湿地工艺设计方法。

参 考 文 献

- 1 Sherwood C. *Natural System for Waste Management and Treatment*. New York: Mc Graw-Hill Book Company, 1988: 174-178
- 2 S.C. 里德等著. 工业和城镇污水土地处理系统. 北京: 中国环境科学出版社, 1989: 260-265

(上接第 30 页)

- 6 中国科学院南京土壤所. 土壤理化分析. 上海: 上海科技出版社, 1978: 72-136
- 7 Hutchinson T C and K M Meema. *Effects of Atmospheric Pollutants on Forests in Westland and Agriculture Systems (NATO ASI Series, Vol. 16)*. Berlin: Springer-Verlag, 1987: 321-401
- 8 Waring R H and Schlesinger W H. *Forest Ecosys-*

tems Concepts and management, INC. orlando, Florida: 32887, ACADEMIC Press, 1988: 191

- 9 北京林学院、土壤学(上册). 北京: 中国林业出版社, 1982: 211
- 10 于天仁, 张效年. 中国土壤酸化问题, 酸雨与农业. 北京: 中国林业出版社, 1988: 75

Abstracts

Chinese Journal of Environmental Science

Study on the Design Approach for Free-water Wet-land Technology. Li Wanqing (Tianjin Environment Protection Research Institute, Tianjin, 300191), Wang Pelong (Tianjin Environment Monitoring Center), Zhang Jianwen (Tianjin Environment Protection Research Institute); *Chin. J. Environ. Sci.*, 1992, 13(5), pp. 2—5

Modifications were made to the technological design method of the water-surface flow wetland by using soil biological activity rather than the specific surface area (AV) of the medium required for the attachment of organisms and taking the functional relationship model of the slope length and applications rate with Ce/Co ration as the basis. Ce/Co ration increases slowly when the hydraulic loading rate is less than 4cm/d and increases exponentially when the hydraulic loading rate is over 4cm/d. BOD₅ values change in the form of negative exponent along the length direction of the land. The examinations of the modeling results indicate that the average relative error of the theoretical calculation values and the practical yearly-measured results is from 0.35% to 13.86% with the standard deviation from 6.6% to 14.57%. The average relative error and standard deviation of the present design method decreased by 33.51—90.10% and 3.32—37.87% respectively compared with the American design method for wetland systems.

Key word: wetland, soil biological activity, waste water treatment.

Design and Implementation of Environmental Management Information System in Shizuishan City. Cheng Shengtong (Tsinghua University, Beijing 100084), Sun Ningzhang (EPB of Shizuishan city); *Chin. J. Environ. Sci.*, 1992, 13(5), pp. 6—7

SEMIS (Shizuishan city Environmental Management Information System) is the first case of practical environmental management information system for local EPB in China. SEMIS uses a 3 plus local network and 6 work stations in order to suit to the function departments of the EPB. The system contains a central database and designed day-to-day management functions such as pollution source management, environmental quality management, environment statistics, emission charge management and official business et al. The data share, the menu operation and the variety of system output (on screen, in files, in tables, in pictures, and so on) were implemented in SEMIS. It proved that SEMIS is an effective tool for regional environmental management.

Key words: environmental management, information system, software engineering.

Indoor Radon Measurements in the Region of Beijing. Lin Lianqing et al. (Beijing Public Health and Anti-epidemic Institute, Beijing 100013); *Chin. J. Environ. Sci.*, 1992, 13(5), pp. 10—15

The indoor concentrations of radon in 14 types of typical dwellings in Beijing area were measured. Analysis of radon sources with respect to their relative contributions to indoor concentrations of the gas was carried out. It is found that

70—80% of the indoor radon comes from the soil beneath the foundations of the dwellings and the construction material. The cracks on the floors and walls of the construction are the main path for radon to enter into rooms. Daily used water, fuel coal and fuel gas contribute less than 2% of the indoor radon. The average indoor concentration of radon in Beijing area was measured to be 30Bq/m³, corresponding to an annual effective dose equivalent of 0.93 mSv to dwellers. While, the average concentration in basement rooms was 35Bq/m³, corresponding to an annual effective dose equivalent of 1.3 mSv.

Key words: indoor radon, radioactivity.

A Study on the Treatment of LAS in Detergent Waste Water with PVA Entrapped Immobilized Cells. Li Tong, Yu Yuxin, Hu Jicui (Dept. of Environmental Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084); *Chin. J. Environ. Sci.*, 1992, 13(5), pp. 16—19

A population of enriched and cultured bacteria can degrade 90% of the LAS with an initial concentration of 40—50mg/L in 24hr. The optimum pH and temperature for LAS removal in detergent waste water with the immobilized bacterial population obtained by entrapping the bacteria with PVA-boric acid were found to be from 5.35 to 7.70 and from 25°C to 35°C, respectively. When PVA-pellets/waste water (V/V) was 30%, LAS concentration in influent was from 40mg/L to 70mg/L and HRT was 3 hr, the rate of LAS removal could exceed 90% in 1 L batch reactor operation.

Key words: LAS, PVA-pellet, detergent waste water, immobilization of bacteria.

Treatment of Dyeing Waste Water with Bacteria-Inoculated Anaerobic-Aerobic System. Jia Shengfen, Liu Zhipei, Yang Huiyang (Institute of Microbiology, Academia Sinica, Beijing 100080); *Chin. J. Environ. Sci.*, 1992, 13(5), pp. 20—24

In this paper, the efficiencies for the treatment of dying wastewater of two anaerobic-aerobic systems, one of which was inoculated with decolorizing and PVA-degrading bacteria and the other with activated sludge, were compared. Results indicate that the former system is characterized by the rapid formation of "bio-film" and high activity for COD and PVA removal. In anaerobic reactor of the former system, the decolorization rate was 12.85% higher than that of the other system; in aerobic reactor, the removal rates of PVA, COD, BOD of the former system were 20.5, 9.27, and 9.34 percent higher than those of the latter, respectively. The results of bacterial distribution study show that there are large numbers of various bacteria growing normally in "bio-film" and that the counts of main functional bacteria such as dye-decolorizing bacteria and PVA-degrading bacteria were higher in the reactor inoculated with bacteria than those in the reactor inoculated with activated sludge. After running for a long period, predominant bacteria isolated from the treatment system were similar to those inoculated in the bioreactor, and had the same decolorizing activity.

Key words: microbial decolorization, treatment of