

专论与综述

新型废水处理工艺——人工湿地的设计方法

诸 惠 昌

胡 纪 萃

(上海轻工业设计院, 上海市 200031)

(清华大学环境工程系, 北京 100084)

摘要 根据水流形态的不同,人工湿地可以分为地表流工艺和地下潜流工艺。人工湿地实际上是一种推流式生物反应器,一般利用芦苇作为供氧手段。人工湿地具有良好的净化废水功能,BOD 去除率达85—95%,SS去除率达90%,氨氮和磷的去除率约为40—50%,而其基建和运行费用仅为传统二级处理的1/10—1/2。本文介绍了人工湿地的设计方法。

关键词 人工湿地,地表流,地下潜流,废水处理。

人工湿地(Constructed Wetland)是一种新型的废水处理工艺^[1],这种湿地由土壤和砾石等混合结构的填料床组成,水流可以在床体的填料缝隙中流动,或在床体的地表流动,床体表面种植物,形成了一个独特的动植物生态环境,用以净化废水。当床体表面种植芦苇时,有人称此为芦苇湿地,也有人称人工湿地为构筑湿地。

自西德1974年首先建造人工湿地以来,该工艺已在欧洲得到推广应用,在美国和加拿大等国也得迅速发展。目前欧洲已有数以百计的人工湿地投入废水处理运行,这种人工湿地的规模可大可小,最小的仅为一家一户排放的废水服务(面积约40m²),大的已有5000m²,可以处理1000人以上村镇排放的生活污水。起初,大多数人工湿地应用于生活污水和矿山酸性废水的处理,如今已有用于纺织工业和石油工业废水处理的报道。

我国在“七五”期间开始了人工湿地的研究。国家环保局华南环保所在深圳白泥坑建造了处理规模为3100m³/d的人工湿地示范工程,占地面积为12.6hm²^[2]。北京市环保所在北京昌平区也建成了处理规模为500m³/d的芦苇湿地处理系统示范工程^[3],天津市环保所在实验室建立了人工湿地的研究系统,对人工湿地处理废水的规律进行了系统的研究^[4]。

我国地域辽阔,农村中乡镇企业大量涌现。广大农村地区的环保工作已提到议事日程上来,因地制宜,采用人工湿地处理废水新工艺不失为是一个好方案。为此,本文综合报道有关人工湿地废水处理工艺的设计方法,供读者参考。

1 人工湿地工艺的基本原理^[5,6]

目前,人工湿地废水处理工艺有两种形式,一种称地表流(surface flow)工艺;另一种称地下潜流(subsurface flow)工艺。

地表流工艺:废水在人工湿地的土壤表层流动,水位较浅,一般在0.1—0.6m,与地下潜流工艺相比其优点是投资少,其缺点是负荷小,冬季北方地区表面会结冰,夏季可能会繁殖蚊子,还会有臭味。

地下潜流工艺:废水在人工湿地的地表下流动,保温效果好,负荷高,处理效果受气候的影响小,但投资比地表流工艺要大些。该工艺繁殖蚊子和产生臭味的可能性很小。目前国际上采用较多的是这种工艺。

地下潜流型人工湿地的基本工作原理可由图1表示。

废水由人工湿地的一端引入,经过配水系

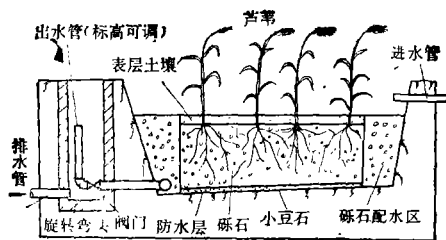


图1 地下潜流型人工湿地工作原理

统(由卵石构成)均匀进入根区填料层。根区填料层基本上由3层组成,上层为表层土壤,中部为砾石,下部为小豆石。表层土壤上栽种耐水植物,通常是芦苇,也有采用蒲草等。深圳人工湿地除种植芦苇外,还有茭苳,席草和大米草等。这些植物有发达的根系,可以深入到表土以下0.6—0.7 m的砾石层中,这些根系交织成网,与砾石一起构成一个透水的系统。同时这些根系具有输氧功能,在根的周围水中溶解氧浓度较高,适宜于好氧微生物的活动。通过附着在砾石和根系上的好氧微生物的作用分解废水中的有机物,矿化后的一部分无机物(如氮和

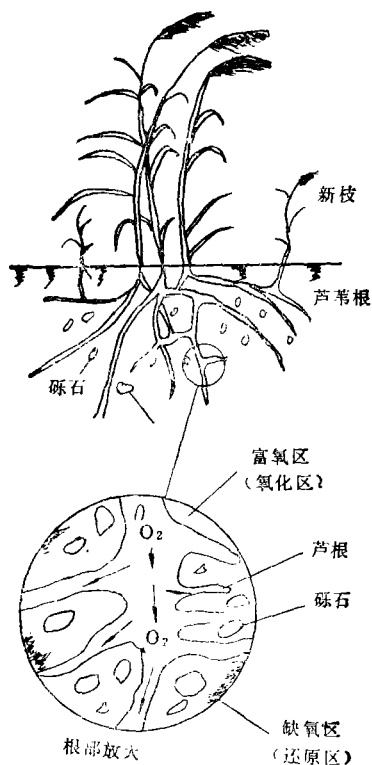


图2 芦苇的输氧作用

磷)可被植物利用,在缺氧区还可发生反硝化作用而脱氮,使废水得到净化,如图2所示。一般情况下,人工湿地出水水质优于传统二级处理的出水水质。

经过净化后的废水由末端的集水区中铺设的集水管收集后排出。由于这种工艺利用植物的根系输氧,故又被称为根区方法(root zone method, RZM),而这种构造的人工湿地又可称为根区处理床^[7]。

2 人工湿地的设计方法^[8,9]

影响人工湿地设计的因素很多,主要是水力负荷、有机负荷、处理床的结构、流程布置、配水系统、排水系统和表面植物种类等。目前各国均因地制宜,根据本国气候、植被等特点,经小试取得设计数据后进行设计。由于人工湿地往往是作为二级处理装置,故出水要达到各国规定的废水排放标准。

2.1 地表流人工湿地的设计计算

由于废水在人工湿地中流动缓慢,人工湿地的功能可视作一级推流式反应器。稳态条件下可用以下反应动力学公式表示:

$$\frac{c_s}{c_o} = e^{(-Kt)} \quad (1)$$

式中, c_s ——出水 BOD_5 浓度 (mg/L);

c_o ——进水 BOD_5 浓度 (mg/L);

K ——反应速率常数 (d^{-1});

t ——水力停留时间 (d)。

人工湿地需要综合考虑许多影响反应的因素,各国研究者推荐了不同的计算方法,里德(Reed)建议地表流人工湿地可用下列方程来计算:

$$\frac{c_s}{c_o} = A' e^{\left[-\frac{C' \cdot K_T \cdot a^{1.75} \cdot L \cdot W \cdot d \cdot n}{Q} \right]} \quad (2)$$

式中, A' ——以污泥形式沉淀在处理床前部而未得到处理的 BOD_5 含量(一般取0.52);

C' ——填料介质特性系数(一般取0.7 m);

a ——微生物活动的比表面积(一般为 $15.7 \text{ m}^2/\text{m}^3$);

L ——处理床长度(m);

W ——处理床宽度(m);

d ——设计水深(m);

n ——处理床的孔隙率;

Q ——平均设计流量 (m^3/d).

式中, K_T 与温度的关系可用下式表示:

$$K_T = 0.0057 \times (1.1)^{(T-20)} \quad (3)$$

式中, T 为设计水温($^{\circ}\text{C}$).

当处理床的底坡或水力坡度等于或大于 1% 时,上述方程式可调整为:

$$\frac{c_s}{c_0} = 0.52 e^{\left[\frac{c' \cdot K_T \cdot a^{1.75} \cdot L \cdot W \cdot d \cdot n}{4.55 S^{1/3} \cdot Q} \right]} \quad (4)$$

式中, S ——底坡或水力坡度.

有机负荷指标随废水性质不同和条件不同变化很大. 其变化范围为 $18-110 \text{ kg BOD}_5/(\text{10}^4 \text{ m}^2 \cdot \text{d})$. 一般有机负荷值并不作为设计人工湿地的依据, 只作为设计校核的指标. 为确保系统处于好氧条件下工作, 最高的有机负荷值不得大于 $110 \text{ kg BOD}_5/(\text{10}^4 \text{ m}^2 \cdot \text{d})$.

由于该工艺中有相当一部分有机物沉积在处理床前部, 使前部的处理条件恶化, 为此可以采取阶梯进水方式, 让一部分进水从处理床的 1/3 处引入.

2.2 地下潜流人工湿地的设计计算

对于由土壤、砾石和豆石等组成的处理床, 在废水充满缝隙处于饱和状态时, 当其水力特性为层流状态, 一般用达西 (Darcy) 定律表示:

$$Q = K_r AS \quad (5)$$

式中, Q ——渗流量 (m^3/d);

K_r ——渗透系数 ($\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{d}$);

A ——处理床横截面积 (m^2);

S ——水力坡度.

渗透系数取值还缺少准确的测定. 对于以砾石为基质的湿地, 欧洲人建议 K_r 为 10^{-3} m/s . 而美国的经验为 K_r 值不宜大于 10^{-4} m/s .

有人认为, 当雷诺数 $Re > 1-10$ 时, 上式

就不适用, 因介质粒径较大, 对水流有扰动, 应采用 Ergun 公式表示^[11]:

$$\rho g S = 150 \frac{\mu v (1 - \varepsilon)^2}{D_p^2 \varepsilon^2} + 1.75 \frac{\rho v^2 (1 - \varepsilon)}{D_p \varepsilon} \quad (6)$$

式中, ρ ——水的密度;

g ——重力加速度;

S ——水力坡度, 取值 0%—2%;

μ ——粘滞系数;

ε ——孔隙率;

D_p ——填料平均直径;

v ——流速 = $Q/A\varepsilon$.

此外, 在英国目前采用 Kikuth 推荐的设计公式^[6]:

$$A_r = 5.2 Q_d (\ln c_0 - \ln c_t) \quad (7)$$

式中, A_r ——处理床表面积 (m^2);

Q_d ——废水平均日流量 (m^3/d);

c_0 ——废水进水的平均 BOD_5 浓度 (mg/L);

c_t ——出水要求达到的平均 BOD_5 浓度 (mg/L).

利用公式(5)、(6)和(7)可以计算出处理床的尺寸. 如果是处理生活污水, 在英国, 建议平均每人所需处理床的面积为 $3-4 \text{ m}^2$, 此指标可以用于初步设计.

处理床的深度需根据采用的植物根系深度而定, 基本要求是废水应在根系中流动, 以保证好氧条件. 对于芦苇, 美国采用床深为 $60-76 \text{ cm}$, 德国采用床深为 60 cm . 在欧洲, 用于处理浓度较高的工业废水时床深应减少 50%. 为了保证床深度的有效使用, 在运行初期应将水位降低, 促使植物根系向深度发展.

处理床的坡度一般为 1% 或更大些, 最大可达 8%, 一般应视采用的填料粒径而定. 对于以砾石为主的处理床, 其坡度一般为 2%. 要注意, 床的底坡不一定就等于水力坡度.

一般认为, 床的横截面积与生化反应无关, 仅取决于水力要求. 至于床的长度与生化反应所需的停留时间有关, 也与污染物去除的程度

有关。对于砾石床,长宽比不宜太大,一般采用 1:1,最大不超过 3:1,对于以土壤为主的处理床,长宽比应小于 1:1。

此外,有一种利用植物供氧能力来计算处理床表面积的计算方法。通常人工湿地表面植物的输氧能力 T_{ro_2} 为 $5-45 \text{ g O}_2/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$,一般为 $20 \text{ g O}_2/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 。废水的需氧量可按下式估算:

$$R_o = 1.5L_o \quad (8)$$

式中, R_o ——废水需氧量 (kg/d);

L_o ——每日需要去除的 BOD_5 量 (kg/d)。

植物的供氧能力 R'_o 为:

$$R'_o = \frac{(T_{ro_2}) \cdot A_s}{1000} \quad (\text{kg/d}) \quad (9)$$

由上述方程就可以计算出处理床表面积 A_s 。为安全起见,求出的表面积还应乘以一个完全系数(一般采用 2)。

3 人工湿地的工艺流程^[10]

人工湿地一般作为二级生物处理,一级处理采用何种方法要视废水性质而定。对于生活污水,采用化粪池,其它工业废水可采用沉淀池作为去除 SS 的预处理。

人工湿地本身的工艺流程可以有多种形式,常见的有 4 种(如图 3 所示)。

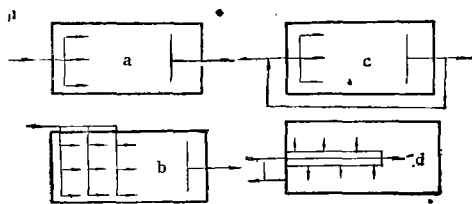


图 3 人工湿地的基本流程

a. 推流式 b. 阶梯进水式 c. 回流式 d. 综合式

阶梯进水可避免处理床前部堵塞,有利于后部的硝化脱氮。出水回流可以稀释进水 BOD 的浓度和悬浮物浓度,增加溶解氧,减少可能出现的臭味问题。回流可促进硝化脱氮作用,可采用低扬程水泵,通过水力喷射或跌水等方式进行充氧。

人工湿地视其规模大小可有多 种 组 合 形式,如单一式、并联式、串联式和综合式等。人工湿地也可以与氧化塘串联组合,图 4 为人工湿地的不同组合形式,图 5 为深圳黄泥坑人工湿地处理工艺流程示意图^[2]。

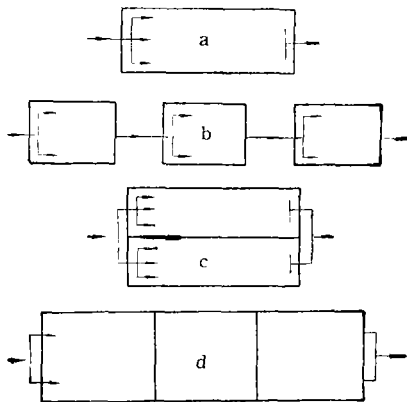


图 4 人工湿地的不同组合形式

a. 单一式 b. 串联式 c. 并联式 d. 综合式

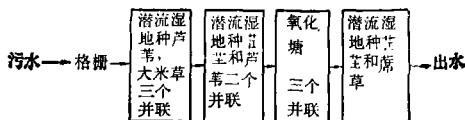


图 5 深圳黄泥坑人工湿地系统

4 人工湿地的其它设计问题

(1) 选址 人工湿地的位置应因地制宜选定,地形有一定自然坡度可减少开挖土方量,有利于排水,降低投资。

(2) 废水进水装置 为了配水均匀,可采用多孔管和三角堰等配水。进水管渠应比床面高出 50cm。因为床的表面会逐渐积累一些淤泥和杂草,应定期清除。

(3) 填料的选用 进水配水区和出水集水区的填料砾石粒径一般为 60—100mm,分布于整个床宽。根区填料表层土壤可就近采用当地表层土,宜用钙含量达 2—2.5 kg/100kg 土壤为好。表层宜用 5—10mm 粒径的石灰石,掺和当地表层土壤,厚度为 150—250mm,表层以下全部采用 5—10mm (也可用 12—25 mm) 粒径的石灰石填料。由于表层土壤在浸水后会下沉。

因此设计的填料表层标高应高于期望值 10%—15%。如果最终设计深度为 0.6m, 初期填料高宜为 0.7m。填料本身成分对生物处理影响不大。但对含磷和重金属离子废水, 含钙、铁、铝等成分的填料有利于离子交换。

(4) 防止床底渗漏污染地下水 要求在土层开挖时尽量保持原土层, 在原土层上采取防渗措施, 可以用粘土、膨润土、沥青、油毡等, 多数国家采用高密度聚乙烯树脂薄膜(厚度为 0.5—1.0 mm)。为防止填料的尖角损伤塑料膜, 可以先在塑料膜上铺一层细砂。

(5) 废水出水渠 考虑到运行中调整水位高度的需要, 出水区的砾石填料底部设置集水管, 在排水端应设置旋转弯头和阀门, 以便控制床内水位。

(6) 植物的栽种 选用何种植物可以因地制宜, 如芦苇、茭苳、席草等, 但最常用的植物是芦苇。芦苇根系较为发达, 可深入地下 60—70 cm, 输氧性能较好。引种的芦苇应取自当地, 因其已适应当地的气候环境。栽种芦苇可以是播种和移栽扦插, 后者比较经济和快捷。将带有芽苞的芦苇根剪成 100 mm 长左右, 埋于深 40mm 处, 端部露出土壤。扦插的最佳期是秋季, 也可以在早春, 扦插密度为 1—3 株/m²。

5 人工湿地的启动、运行和维护

(1) 启动 人工湿地在播种或扦插芦苇后就要充水, 水位位于地面下 25mm 处, 废水可按计算流量运行 3 个月后, 将水位降低到距处理床底 200mm 深处运行, 促使芦苇根系向深处发展, 待根系深入至床底后, 将水位再升高到离地表以下 200mm 处转入正常运行。

(2) 正常运行 转入正常运行后, 随着时间推移, 处理床逐渐成熟, 处理效率逐步提高, 处理床完全成熟大约要 2—3 年。

(3) 维护 如果设计得当, 系统可自流运行, 不需要任何动力设备, 因此维护工作极少。至于人工湿地上生长的芦苇可以定期收割或任

其自然枯败。据分析, 植物吸收废水中污染物仅占湿地全部去除污染物量的 5% 左右。在我国芦苇等植物是一种有使用价值的工业原料, 应加以收割利用。

6 结论

(1) 人工湿地是一种正在发展的新型废水处理工艺, 它具有投资低、出水水质好、操作简单、维护和运行费用低廉等优点, 宜于在广大农村、中小城镇及气候寒冷地区的废水处理中应用。

(2) 人工湿地是一种正在发展中的废水处理技术, 有关的设计资料尚不太完整。设计参数的选用初期可以保守一些, 待积累较多的经验后可以逐渐采用先进的指标。对于大型的人工湿地工程, 宜先进行实验室规模的试验, 取得一定的数据后再行生产性规模设计。

参 考 文 献

- 1 Hammar D A et al. *Constructed Wetlands for Wastewater Treatment*. Michigan: Lewis Publishers Inc., 1989: 5—20
- 2 胡康萍等. 上海环境科学. 1991, 10(9): 41
- 3 丁廷华. 环境科学. 1992, 13(2): 8
- 4 唐运平等. 环境工程. 1992, 10(2): 1
- 5 Watson J T et al. *Constructed Wetlands for Wastewater Treatment*. Michigan: Lewis Publishers Inc., 1989: 379—391
- 6 Cooper P F et al. *Constructed Wetlands for Wastewater Treatment*. Michigan: Lewis Publishers Inc., 1989: 153—172
- 7 Chong S Ong et al. *Treatment of Wastewater by the Root Zone Method Using Phragmites Australis*. Logan, Utah: Utah State University Utah Water Research Laboratory, 1990: 8
- 8 Steiner G R et al. *Constructed Wetlands for Wastewater Treatment*. Michigan: Lewis Publishers Inc., 1989: 363—378
- 9 Brix H et al. *Constructed Wetlands for Wastewater Treatment*. Michigan: Lewis Publishers Inc., 1989: 563—573
- 10 Metcalf & Eddy Inc. *Wastewater Engineering*. Third Edition, New York: McGRAW-HILL BOOK COMPANY, 1990: 992—1001
- 11 胡康萍. 环境科学研究, 1991, 4(5): 8

ween the properties of the two kinds of immobilized microbial beads. It was observed that the beads made from PVA have higher stability and strength than those made from sodium alginate, and are more suitable for wastewater treatment. However, their mass diffusivity should be improved.

Key words: entrapping agent, immobilized microbe beads sodium alginate, PVA.

Studies on Treatment Techniques of Wastewater from Organo-phosphorus Pesticide Production. Luo Qifang, Zhang Xiaohu et al. (Institute of Environmental Medicine, Tongji Medical University, Wuhan 430030): *Chin. J. Environ. Sci.*, **14**(2), 1993, pp. 32—34

Treatment techniques of wastewater from production of organo-phosphorus pesticides with cyclic structure such as Methyl-ISP etc. were studied. Results show that removal rates of COD_{cr} and organo-phosphorus were 59.6% and 91.3%, respectively, and the ratio of $\text{BOD}_5/\text{COD}_{\text{cr}}$ could be increased from 0.12 to 0.46 by wet oxidation method when operating pressure was 0.5—0.6 MPa (150—160°C), PH value was 2, and HRT is 1h. Removal rate of respective COD_{cr} was 76.0% and 82.1% for activated sludge aeration and biological activated carbon process when the diluted mixing wastewater is disposed directly under selected conditions. If the diluted mixing wastewater is disposed by biological processes after wet oxidation, removal rate of COD_{cr} could be increased by about 10% under the same conditions.

Key words: wastewater, organo-phosphorus pesticides, wet oxidation, biological treatment.

Drawing Water to Control Ground Water Pollution from Cr^{6+} . Fu Jinsheng et al. (Anyang Environment Protection Monitoring Station, Anyang 455000): *Chin. J. Environ. Sci.*, **14**(2), 1993, pp. 35—38

Taking the environmental hydrological and geological conditions of an Cr^{6+} polluted urban industrial area into account, A countermeasure, i.e. drawing water from underground in the center of

the area to cut off underground streams, was taken to reduce the level of pollution of ground water from Cr^{6+} . After 6 years practice, the polluted area was reduced from 0.321km² to 0.032km² and the drinking water supply was back to normal.

Key words: ground water pollution, chromium pollution.

Design Methods for Constructed Wetlands—A New Wastewater Treatment Process. Zhu Huichang et al. (Shanghai Light Industry Design Institute, Shanghai 200031) *Chin. J. Environ. Sci.*, **14**(2), 1993, pp. 39—43

The constructed wetland is a new wastewater treatment process. Based on the flow status, the constructed wetlands can be divided into surface flow system and subsurface flow system. Basically, the wetlands are plug flow reactor using common reeds or other plant for oxygen transfer. The BOD and SS removal rates can be as high as 85%—95% and about 90%, respectively. The $\text{NH}_3\text{-N}$ and P removal rates can reach about 40%—50%. However, the costs for the construction and operation of the constructed wetlands are 0.1—0.5 of the conventional secondary wastewater treatment processes. The design methods for constructed wetlands are introduced in this paper.

Key words: constructed wetland, surface, flow, subsurface flow.

A Unified Hypothesis for Filamentous Bulking in Activated Sludge Processes. Wang Kaijun (Beijing municipal Research Institute of Environmental Protection, Beijing 100037): *Chin. J. Environ. Sci.*, **14**(2), 1993, pp. 44—48

Based on the analysis and synthesis of various existing theory and hypothesis for activated sludge bulking, a unified theory for the phenomena was proposed. The theory can satisfactorily explain most of the common bulking phenomena, and hence can be utilized in the control and prevention of sludge bulking. Experiment results show that under the guidance of the theory the SVI of slud-