

# 人工湿地污水处理工艺与设计\*

王 薇,俞 燕,王世和

(东南大学环境工程系,南京 210096)

**摘要:**人工湿地作为一种新型生态污水处理技术,在实际应用中取得了快速发展。为了适应我国对这一技术的迫切需要,文章结合作者的实践,较详细地介绍了目前人工湿地污水处理的工艺结构、基本设计方法及经济技术比较,以供有关科研、设计单位参考。

**关键词:**人工湿地;污水处理;工程设计

**中图分类号:**X703 **文献标识码:**A **文章编号:**1002-1264(2001)01-0059-04

## Process and Design of Wastewater Treatment by Constructed Wetland

WANG Wei, YU Yan, WANG Shi-he

(Department of Environmental Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

**Abstract:** As a new type of ecological wastewater treatment technology, constructed wetland has been developed at a great speed in its application. In order to satisfy the urgent need of this technology in China, the basic configuration, types and design methods of current wastewater treatment technology by constructed wetland are introduced in this paper. The cost of constructed wetland compared with other treatment techniques is also analysed. It is hoped to provide basis for the future research and process design of constructed wetland.

**Key words:** constructed wetland; wastewater treatment; process design

近年来,各种水处理技术在实际应用中取得了不断的发展,特别是作为二级处理的活性污泥法以其工艺相对成熟、运行稳定、处理效果好而成为城市污水处理的主流工艺,但传统的活性污泥不仅基建投资大,运行费用高,且主要以去除碳源污染物为目的,对氮、磷等营养物质的去除则微乎其微,经处理后的出水排入水体后仍将引起“富营养化”等环境问题。三级处理虽可解决上述问题,但因投资和运行费用昂贵而难以大面积推广。同时事实也说明,单纯依靠传统的人工处理方法在我国当前的情况下尚难以从根本上解决水污染问题,只能延缓其发展趋势。70年代以来,人工湿地处理技术的提出和发展,为综合解决上述问题提供了一种新的选择。

## 1 人工湿地的基本构型与流程

人工湿地系以人工建造和监督控制的、与沼泽地相类似的地面,通过自然生态系统中的物理、化学和生物三者协同作用以达到对污水的净化。此种湿地系统是在一定长宽比及底面坡度的洼地中,由土壤和填料混合组成填料床,废水在床体的填料缝隙或在床体表面流动,并在床体表面种植

具有处理性能好、成活率高、抗水性强、生长周期长、美观及具有经济价值的水生植物,形成一个独特的动、植物生态系统,对废水进行处理。实际设计中,往往是将湿地进行多级串联或附加必要的预处理、后处理设施构成。

人工湿地按污水在其中的流动方式可分为两种类型:水面式人工湿地(简称FWS),潜流型人工湿地(简称SFS)。FWS系统中,废水在湿地的土壤表层流动,水深较浅(一般在0.1-0.6m)。与SFS系统相比,其优点是投资省,缺点是负荷低。北方地区冬季表面会结冰,夏季会滋生蚊蝇、散发臭味,目前已较少采用。而SFS系统,污水在湿地床的表面下流动,一方面可以充分利用填料表面生长的生物膜、丰富的植物根系及表层土和填料截留等作用,提高处理效果和処理能力;另一方面由于水流在地表下流动,保温性好,处理效果受气候影响较小,且卫生条件较好,是目前国际上较多研究和应用的一种湿地处理系统,但此系统的投资比FWS系统略高。

人工湿地的工艺流程有多种,目前采用的主要有:推流式、阶梯进水式、回流式和综合式4种,如图1所示。

\* 收稿日期:2000-08-03

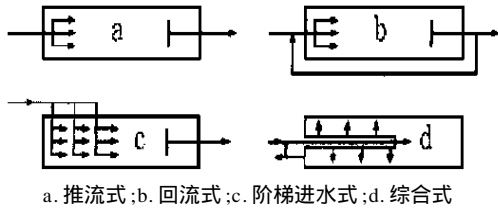


图1 人工湿地的基本流程

阶梯进水可避免处理床前部堵塞,使植物长势均匀,有利于后部的硝化脱氮作用;回流式可对进水进行一定的稀释,增加水中的溶解氧并减少出水中可能出现的臭味。出水回流还可促进填料床中的硝化和反硝化作用,采用低扬程水泵,通过水力喷射或跌水等方式进行充氧。综合式则一方面设置出水回流,另一方面还将进水分至填料床的中部,以减轻填料床前端的负荷。

人工湿地的运行可根据处理规模的大小进行多种方式的组合,一般有单一式、并联式、串联式和综合式等(如图2所示)。在日常使用中,人工湿地还常与氧化塘等进行串联组合。

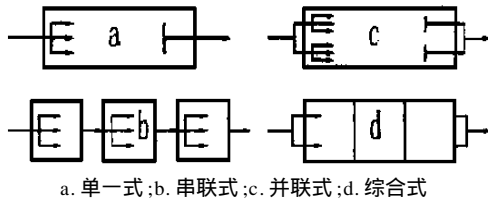


图2 人工湿地的不同组合方式

## 2 人工湿地系统的设计

人工湿地系统的设计涉及如:水力负荷、有机负荷、湿地床构形、工艺流程及布置、进出水系统和湿地栽种植物种类等诸多因素。由于不同国家及地区的气候条件、植被类型及地理条件各有差异,因而大多根据现地条件,经小试或中试取得相关数据后进行。

### 2.1 FWS系统的设计

由于废水在人工湿地中流动缓慢,故人工湿地通常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描述:  $C_e/C_0 = \exp(-K_T t)$

基于人工湿地的影响因素较为复杂,各国研究者对湿地床的尺寸提出了不同的计算方法。Reed 建议 FWS 系统可用下列方程计算<sup>[1]</sup>:

$$\frac{C_e}{C_0} = A \left[ 1 - \frac{CK_T A_V^{1.75} LWOn}{Q_d} \right]$$

Tchobanoglour 建议,水温为  $T$  时,速率常数可由下式确定:  $K_T = K_{20}(1, 1)^{(T-20)}$

当湿地床的底坡或水力坡度不小于 1% 时,

上述方程可调整为:

$$\frac{C_e}{C_0} = 0.52 \exp \left[ 1 - \frac{CK_T A_V^{1.75} LWOn}{4.6 S^{1/3} Q_d} \right]$$

对床表面积  $A_S$ , Kaklec 和 Knight 建议用下式

计算:  $A_S = \left( \frac{0.0365 Q_d}{10^4 k} \right) \ln \left( \frac{C_0 - C^*}{C_e - C^*} \right)$

初步设计时,  $k$  值可取 34 m/y, 背景 BOD<sub>5</sub> 值可由下式计算:

$$C^* = 3.5 + 0.05 C_0$$

FWS 系统的有机负荷随废水性质和条件变化很大,其范围在 18 - 110 kgBOD<sub>5</sub> (ha · d)。一般只作为设计校核的指标,它的控制对维持系统好氧状态及防止蚊虫、恶臭等非常重要。

FWS 系统的水力负荷可达 150 - 500 m<sup>3</sup> / (ha · d)。在确定水力负荷的同时应考虑气候、土壤状况、渗透系数和植被类型等场地条件,还应考虑接纳水体的水质要求,尤其注意由于蒸发、蒸腾的失水量对夏季处理的影响及在干旱地区设计湿地的可行性。在特殊情况下,要求湿地设计达到零排放时,湿地中的水主要通过蒸发、蒸腾、补充地下水或系统内回用等途径完成,这时水力负荷与水平衡计算是设计时需要重点考虑的问题。

### 2.2 SFS 系统的设计

在 SFS 系统中,水流有 2 种基本流态,即层流与紊流。当湿地床中所用填料的粒径不大、污水充满填料缝隙并处于饱和状态时水流为层流,此时可用达西公式计算<sup>[1-3]</sup>,即:  $Q = K_s A c S_v$ 。

对其中的渗透系数  $K_s$ , 到目前为止尚无准确的测定,对于以砾石为基质的湿地,欧洲人建议取 10<sup>-3</sup> m/s, 而美国的经验认为  $K_s$  不宜大于 10<sup>-4</sup> m/s。

当  $Re > 1 - 10$  时,水流变为紊流,此时不宜用 Darcy 公式,可用 Ergun 公式计算<sup>[1-3]</sup>。

$$S = 150 \mu v \left[ \frac{(1-n)}{D_p n} \right]^2 / g + 1.75 (1-n) v^2 / D_p n g$$

湿地表面积  $A_S$  可用下计算<sup>[1]</sup>:

$$A_S = Q (\ln C_0 - \ln C_e) / (K_T D n)$$

式中:

$K_T$  与温度的关系为  $K_T = K_{20} (1.1)^{T-20}$ 。据有关文献报道和实际试验,某一特定 SFS 系统的  $K_{20}$  与床体填料的孔隙率  $n$  有关,关系式为  $K_{20} = K_0 (37.3 n^{4.172})$ , 对典型城市污水取  $K_0 = 1.839 \text{ d}^{-1}$ , 高浓度有机工业废水  $K_0 = 0.198 \text{ d}^{-1}$ 。

英国人 Kitkuth 推荐用  $A_s = 5.2Q(\ln C_0 - \ln C_e)$  计算表面积。

符号说明:

$A_c, A_s$ —湿地床的横截面积,表面积; $m^2$ ;

$C_e, C_0$ —进水、出水  $BOD_5$ ;  $mg/L$ ;

$Q$ —平均设计流量; $m^3/d$ ;

$K_s$ —渗透系数; $m^3/(m^2 \cdot d)$ ;

$K_{20}, K_T$ —温度 20 ,T 时的速率常数; $d^{-1}$ ;

$K_0$ —某一填料中植物根系充分发展后的最佳速率常数; $d^{-1}$ ;

$L$ —湿地床长度; $m$ ;

$W$ —湿地床宽度; $m$ ;

$D$ —湿地床深度; $m$ ;

$S$ —底坡或水力坡度;(-)。

由上述各式,即可确定湿地床的基本尺寸。湿地床长度  $L$  通常定为 20 - 50 m。过长,易造成湿地床中的死区,且使水位难于调节,不利于植物的栽培。此外,湿地的长度比  $L/W$  也不应过大,建议控制在 3 以下,常采用 1 1,对于以土壤为主的系统,  $L/W$  比应小于 1 1。床深  $D$  一般须根据所栽种植物的种类及根系的生长深度确定,以保证湿地床中必要的好氧条件。对于芦苇湿地系统,处理城市或生活污水时,  $D$  一般取 0.6 - 0.7 m;而用于较高浓度有机工业废水的处理时,  $D$  一般在 0.3 - 0.4 m 之间。

床横截面面积与温度、有机负荷无关,只受填料的水力学特性影响。在借鉴有关经验的基础上人们建议,通过填料横截面的平均流速  $Q/A_c$  以不超过 8.6  $m/d$  为宜,以避免对填料根茎结构的破坏。湿地床底坡一般取 1% - 8%,须根据填料性质及湿地尺寸加以确定,对以砾石为填料的湿地床一般可取 2%。

### 2.3 其它设计问题

人工湿地的基本尺寸确定后,还需考虑如场地选择、栽种植物的种类、进出水系统的布置等一些具体问题。

1) 场地选择:与传统二级生物处理工艺相比,单位体积污水处理量所需人工湿地的面积约为传统二级生物处理地的 2 - 3 倍。采用人工湿地处理污水时,应尽量选择有一定自然坡度的洼地或经济价值不高的荒地,一方面可减少土方工程量,利于排水,降低投资;另一方面,可减少对环境的影响。

2) 植物的栽种:人工湿地系统设计中,应尽可能增加湿地系统的生物多样性,以提高湿地系统的处理性能,延长使用寿命。

在选择湿地植物物种时,可根据耐污性、生长适应能力、根系的发达程度及经济价值和美观要求确定,同时也要考虑因地制宜。可用于人工湿地的植物有芦苇、茭苳、大米草、水花生、稗草等,目前最常用的是芦苇。芦苇的根系较为发达,是具有巨大比表面积的活性物质,其生长可深入到地下 0.6 - 0.7 m,具有良好的输氧能力。种植芦苇时,一般应尽量选用当地芦苇进行移栽,其具体方法是将有芽苞的芦苇根分剪成 10 cm 长左右,将其埋入 4 cm 深的土中并使其端部露出地面。插植的最佳季节在秋季或早春,插植密度可为 1 - 3 株/ $m^2$ 。

3) 进出水系统的布置:湿地床进水系统的设计应尽量保证配水的均匀性,一般采用多孔管或三角堰等。多孔管可设于床面上或埋于床面以下,埋于床面下的缺点是配水调节较为困难。多孔管设于床面上方时,应比床面高出 0.5 m 左右,以防床面淤泥和杂草积累而影响配水。同时应定期清理沉淀物和杂草等,保证系统配水的均匀性。系统的进水流量可通过阀或闸板调节,过多的流量或紧急变化时应有溢流、分流措施。

湿地出水系统的设计可采用沟排、管排、井排等方式,合理的设计应考虑受纳水体的特点、湿地系统的布置及场地的原有条件。为有效地控制湿地水位,一般在填料层底部设穿孔集水管,并设置旋转弯头和控制阀门。对严寒地区,进、出水管的设置须考虑防冻措施,并在系统的必要部位设置控制阀和放空阀。

4) 填料的选用:进水配水区和出水集水区的填料一般采用粒径为 60 - 100 mm 的砾石,分布于整个床宽。处理区填料表层可优先选用钙含量为 2 - 2.5  $kg/100 kg$  的混合土,以利于提高脱磷效果。表层之下以 5 - 10 mm 粒径石灰石掺和适量土壤,厚度为 150 - 250 mm,再往下,全部采用 5 - 10 mm 粒径石灰石填料,或用不同级配砾石、花岗岩碎石铺设。由于表层土壤在浸水后会有一定的下沉,因此,建造时填料表层标高应高出设计值 10% - 15%。

5) 湿地床的水位控制:通常,湿地进水的水位是不变的,为使污水在床体内以推流式流动,须对床层的水位加以控制。通常, SFS 系统对水位的

控制有几点要求:在系统接纳最大设计流量时,湿地进水端不出现雍水,以防发生表面流;在系统接纳最小设计流量时,出水端不出现填料床面的淹没,以防出现表面流;为了利于植物的生长,床中水面浸没植物根系的深度应尽量均匀,并尽量使水面坡度与底坡基本一致。

6)防止地下水污染:为防止湿地系统因渗漏而造成地下水污染,要求在工程时尽量保持原土层,并在原土层上设置防渗层。防渗层的设置方法有多种,如采用厚度为0.5-1.0 mm的高密度聚乙烯树脂,或油毛毡密封铺垫等,为防止床体填料尖角对薄膜的损坏,施工时可在塑料薄膜上预铺一层细砂。

### 3 人工湿地的运行及经济分析<sup>[2-3]</sup>

#### 3.1 人工湿地的启动与运行

人工湿地污水处理系统的启动一般要经历2个阶段:即系统调试、植物复活、根系发展不稳定阶段和植物生长成熟、处理效果良好的稳定成熟阶段。

在启动阶段,芦苇等植物栽种后即须充水。初期可将水位控制在地面下25 mm左右处。按设计流量运行3个月,将水位降低至距床底0.2 m处,以促进芦苇等植物根系向深部发展。待根系深入到床底后,再将水位调节至地表下0.2 m处开始正常运行。进入稳定成熟阶段后,系统处于动态平衡,植物的生长仅随季节发生周期性变化,而年际间则处于相对稳定的状态,此时系统的处理效果充分发挥,运行稳定。人工湿地系统从启动到成熟一般需1-2年时间。

对设计合理的人工湿地系统,在进水水质及水量变化不大时,一旦进入稳定成熟期,系统可自流运行,无须任何动力设备,也无须更多的维护。湿地中的植物一般可于冬季干枯时定期收割。

#### 3.2 人工湿地的经济分析

鉴于我国的实际情况,工程造价及运行费用仍是当前一般建设单位选择污水处理工艺优先考虑的因素。由于人工湿地的土建施工比较简单,且正常情况中几乎无须耗能,因此,其造价和运行费用远比传统二级生物处理工艺节省。目前的资料均表明,人工湿地工程造价和运行费用仅为传统工艺的1/10-1/2。表1为深圳白泥坑人工湿地与有关污水处理厂的投资及运行费用的比较。

可见,单位污水投资额不足一般工艺的1/4,运行费用仅为传统活性污泥地的10%。

表1 深圳白泥坑人工湿地系统与有关污水处理厂的经济比较

工程名称	总投资(万元)	单位污水投资额(元/m <sup>3</sup> )	年运行费用(万元)	吨水处理成本(元/m <sup>3</sup> )	单位污水占地量(m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup> )
深圳某厂	3 300	660	>100	>0.20	2.67
蛇口某厂			>100	>0.20	
珠海某厂	1 500	830	>100	>0.20	1.20
海南某厂	547	574	36.5	0.20	1.20
白泥坑工程	42.9	138	=2.0	0.02	2.79

有分析表明,如不考虑征地费,人工湿地的投资与处理规模间有近似线性关系;当考虑征地费用时,费用与处理规模间呈凸函数形式。因此,人工湿地污水处理技术对中小城镇、居民小区及城市分散型的污水处理更有其独到的优越性,对我国目前正在规划建设中的中、小城镇及其沿海地区的污水处理厂的设计和建设更有特别重要的意义。

## 4 结语

人工湿地作为一种新型生态污水处理技术,具有投资省、运行简便、处理效果稳定、出水水质好等诸多优点,不失为我国经济尚欠发达、地理条件相对宽裕的广大中小城镇、居民小区污水处理的优选方案。但由于国内人工湿地污水处理技术的发展及其应用时间还相对较短,人们对其的认识也有一个过程,加之技术相对滞后,因而人工湿地的应有潜力未能得到深入挖掘。但从近年来国内外的研究进展,特别是国内如火如荼的开发应用,及包括去污机理、动力学模型等理论的进一步成熟,人工湿地作为一种经济有效的污水处理手段,必将成为我国污水处理的重要工艺而得到广泛应用。

### 参考文献

- [1] 高拯民,李宪法编.城市污水土地处理利用设计手册,北京:中国标准出版社,1990.
- [2] 诸惠昌.新型废水处理工艺—人工湿地的设计方法[J].环境科学,1993;14(2):39-43.
- [3] 沈耀良.新型废水处理技术—人工湿地[J].污染防治技术,1996;(1-2):1-8.
- [4] M. B. Green, Constructed Reed Beds: A Cost-Effective Way to Polish Wastewater Effluents for small Communities, Wat, Environ. Res., 1994;66(4):188-193.
- [5] S. C. Reed, Subsurface Flow Wetland-A Performance Evaluation, Wat, Environ. Res., 1995;67(2):244-248.

作者简介:王薇(1978-),女,东南大学环境工程系硕士研究生,主要从事水处理技术研究,已发表论文2篇。