

垂直流人工湿地工艺设计概述

李忠卫, 王全金, 李 丽

(华东交通大学 土木建筑学院, 江西 南昌 330013)

摘要: 简单介绍了人工湿地的定义、类型及其运行的影响因素, 阐述了垂直流人工湿地系统的主要设计内容, 包括湿地床体设计、植物群落的构建、基质的选择和铺设、自动增氧系统的建设等方面, 并给出了相关的设计参数。

关键词: 人工湿地; 垂直流; 工艺设计

中图分类号: X703.1

文献标识码: A

人工湿地是一种由人工建造和监督控制的、与沼泽地类似的地面, 它是利用自然生态系统中的物理、化学和生物的重重协同作用来实现对污水的净化。湿地系统主要由各种具有透水性的基质、水生植物、水体、湿地中低等动物和好氧或厌氧微生物种群五部分组成^[1]。人工湿地系统运行情况是否良好取决于进水水质、湿地的设计以及出水水质要求等因素^[2]。Miklas Scholz 通过相关性分析得出湿地的去除率与电导率、温度、溶解氧和总悬浮物有密切关系^[3]。人工湿地根据水流方式的差异可分为三种: ①自由表面流人工湿地(SFW), ②水平潜流人工湿地(SSFW), ③垂直流人工湿地(VFW)。为了使出水水质达到指定的排放标准, 必须对湿地进行合理的设计, 针对不同类型的湿地其设计方法和构建过程在某些方面会有所不同。垂直流人工湿地在净化污水方面有较好的效果, 尤其是脱氮除磷方面。但人工湿地系统较传统污水处理工艺占地较大, 与其他类型人工湿地相比, 其基建费用相对较高。设计参考公式方面各地均有差异, 相关参数不全或者较少。因此, 垂直流人工湿地的设计在整个系统的建设过程中占据重要作用。本文较为全面地介绍了垂直流人工湿地系统设计方法和相应的强化措施。

1 垂直流人工湿地的设计

垂直流人工湿地系统的设计中包括选址、系统工艺、核心设施、水力负荷、植物、基质、床体结构的设计等, 其中较为重要的为人工湿地床体设计与参数的选定、湿地基质的构建、植物群落的构建三个方面。

1.1 湿地床体设计

垂直流人工湿地中水的流态满足一级推流动力学, 可采用一级动力学方程计算湿地所需表面积^[4]。

$$A_s = [Q(\ln C_0 - \ln C_e)] / (K_T D n) \quad (1)$$

式中: C_e —出流 BOD_5 (mg/L);

C_0 —入流 BOD_5 (mg/L);

K_T —与温度有关的一级反应速率常数 (d^{-1});

Q —系统平均流量 (m^3/d);

D —床层深度 (m);

n —床层孔隙率;

A_s —系统表面积 (m^2)

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, 某一特定潜流湿地系统的 K_{20} 与床体填料的孔隙率 n 有关, 关系式为 $K_{20} = K_0$

收稿日期: 2008-03-10

基金项目: 江西省自然科学基金项目(2007GZC084), 江西省教育厅自然科学基金项目(赣教技字[2007]193号)

作者简介: 李忠卫(1985-), 男, 江西吉安人, 在读硕士。

($37.3n^{4.172}$) 对典型城市污水取 $K_0 = 1.893 d^{-1}$, 高浓度有机工业废水 $K_0 = 0.198 d^{-1}$ [4]. 英国人 Kitkuth 推荐用 $A_s = 5.2Q(\ln C_0 - \ln C_e)$ 计算表面积[5]. Cooper 指出垂直流湿地的人均占地面积为 $1 - 2 m^2/PE$ (人口当量) 最高可达到 $5 m^2/PE$ [6]. Diederik P. L. Rousseau 通过调查得出垂直流人工湿地处理规模在 $4 - 2000 PE$ 时, 平均占地面积为 $3.8 m^2/PE$ [7].

另外, 也可以根据植物供氧能力来计算湿地床表面积. 污水的需氧量 R_0 可用式(2)进行估算, 植物的供氧量 P_0 可用式(3)进行估算.

$$R_0 = 1.5Q(C_0 - C_e) \quad (2)$$

$$P_0 = A_s T_o / 1000 \quad (3)$$

通常湿地植物的供氧能力 T_o 在 $5 - 45 gO_2/m^2 \cdot d$, 一般为 $20 gO_2/m^2 \cdot d$. 由上述方程可计算出处理床表面积, 在实际工程中求出的表面积通常还应乘以一个安全系数, 一般为 2 [8].

在湿地设计过程中, 水力学设计是湿地工艺设计中一薄弱环节[9]. 通常, 潜流型人工湿地的水力负荷可达 $150 - 500 m^3/(ha \cdot d)$, 最佳水力负荷在 $187 - 374 m^3/(hm^2 \cdot d)$ 之间. 虽然根据实验, 垂直流湿地最大水力负荷可以到 $2000 mm/d$, 但为了长期安全运行起见, 建议水力负荷不超过 $1000 mm/d$. 相关文献推荐的取值范围为 $80 - 620 mm/d$ [10]. 同时在设计过程中, 还需要考虑气候, 蒸腾等外界作用. E. J. Dunne 建议设计时需要考虑 5 年或 25 年内的最大暴雨径流以确保系统不会因水力负荷过大而不能正常运行[2].

通过表面积确定湿地床体的几何尺寸. 湿地床长度一般为 $20 m - 50 m$. 过长, 易造成湿地床中的死区, 且使水位难于调节, 不易植物的栽培. 湿地长宽比 (L/W) 也不应过大, 建议控制在 $3:1$ 以下, 通常采用 $1:1$; 土壤为主的系统 L/W 应小于 $1:1$. 湿地床底坡一般取 $1\% - 8\%$, 需根据基质性质及湿地尺寸加以确定, 对以砾石为基质的湿地床一般取 2% , 潜流湿地不宜大于 1% .

1.2 植物

湿地植物的选择有以下几个原则: ①植物的净化能力和耐污能力强; ②具有较强的抗逆性(如抗冻、抗热、抗病虫害, 适应环境能力强); ③易于管理; ④植物的年生长周期长, 生长速度快; ⑤具有一定的综合利用价值.

湿地设计中常选用高大的挺水植物, 常用的有: 芦苇(Phragmites)、美人蕉(Canna)、香蒲(Typha)、

菖蒲(Calamus)、灯心草(Juncus)、蔗草(Scripus)和苔草(Cares)等, 目前应用最多的是芦苇. 美国人工湿地常用的植物有芦苇、香蒲、灯心草、水葱等; 深圳白泥坑人工湿地栽种了芦苇、荇菜、灯心草、蒲草等[11]. 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. 目前, 针对湿地植物的实用经济性和观赏价值要求越来越高, 传统的湿地植物已经不能很好满足这些要求. 陈志澄对[12] 27种植物进行了对比试验, 实验结果表明, 野芋头、花叶万年青、象草、风车草、红草、蜘蛛兰、千手观音、水葱和花蝴蝶等 18种植物, 可以作为人工湿地生态系统选种植物. 其中象草是一种既有强污水降解能力又能作饲料的品种, 适用于畜牧业的水污染治理. 在植物群落构建时应尽可能增加湿地系统的生物多样性, 采用多层次、多种植物群落结构, 防止选用部分植物因不适宜湿地生长环境而被淘汰, 从而影响系统的处理能力. 多层次、多植物配置的植物床能有效去除污水中的污染物[13]. 另外, 在进行多层次、多物种配置时, 有必要结合植物筛选工作, 以确保配置更有效.

植物的种植密度也影响着湿地的处理效率, 密度过大容易造成湿地基质层孔隙率大大降低, 容易导致基质堵塞; 种植密度太小, 不能够有效的增加微生物的附着面积, 植物的输氧量也大大降低, 影响了系统的处理效率. 一般的种植密度应维持在 $1 - 3 株/m^2$, 栽种的季节宜在秋季或早春[5].

1.3 基质

基质的选用过程中通常需要考虑以下几个因素: (1) 具有良好的吸附性能和离子交换性能, 基质在磷的去除过程中主要是通过一些物理和化学(吸收、吸附、离子交换、络合反应等)作用实现, 因而选择合适的基质对磷的去除率有着重要的影响[14, 15]. 处理区基质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. (2) 基质的粒径不宜过大或过小, 粒径太小, 基质的水力传导率较小, 容易造成堵塞, 形成地表漫流; 粒径太大, 单位体积内微生物可附着的面积较小; 目前选用的基质粒径范围在 $0 - 30 mm$, 常用范围为 $4 - 16 mm$. (3) 有利于生物膜的形成和更新, 有利于提高有机物和氮的去除效率. 针对不同类型的污水选用的基质也不相同, 以 P 为特征的污水, 最好选择飞灰和页岩为基质. 而以有机污染物和悬浮物为特征的污水, 常选用土壤、细沙、砾石[16]. (4) 价廉, 基质占湿地建设费用的比例最大, 可达到 $50\% - 60\%$ [17]. 目前也

有一些关于新类型基质的研究,郭本华^[18]对沸石、页岩陶粒和碎石对磷的去除率进行了对比,结果表明对磷的去除效果最好的是碎石单元,依次是页岩陶粒、沸石。秦志伟^[19]通过对页岩、陶粒、蛭石、炉渣等基质进行对比试验,结果表明,对于高浓度污水,选用陶粒和蛭石结合效果较好;对于低浓度污水应选用陶粒和腐殖质作为基质;而富含氧化铁的炉渣在一定条件下可很好的去除污水中的磷。另有对炉渣、飞灰等九种基质的研究表明,炉渣的吸磷性能最好(8.89 gP/kg),其次是飞灰(8.81 gP/kg),另外,炉渣的使用寿命也是最长的,可达22年^[20]。

基质层厚度的确定取决于植物的根系生长深度、处理效率以及复氧效率。为了保证湿地床体中足够的氧供好氧菌利用,湿地的基质层厚度一般控制在0.6~0.8 m之间,垂直流湿地的基质层厚度可相对较厚,一般在0.7~0.8 m之间。人工湿地床体的深度一般是按水生植物根系自然扩展的深度来设计,一般为0.6~0.7 m。如蘆草床深度为0.76 m;芦苇床推荐深度为0.6~0.7 m;荇菜、席草和灯心草湿地床深度为0.45~0.6 m^[21];香蒲、灯心草的湿地床深度以0.2~0.6 m为宜^[22]。同时对于基质的铺设,为了达到更好的处理效率一般在不同高度选用的基质粒径也不相同。垂直潜流湿地基质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。表层之下以粗粒径砾石掺和适量土壤,厚度为150~250 mm,再往下全部采用较细粒径的砾石,或用不同级配的其他基质铺设,也可几种基质一起掺和铺设。李爱权^[23]利用模拟实验研究了泥炭、砾石、蛭石组成的复合基质,结果表明,不同比值的基质单元对磷的去除率不一样,而且明显优于单一基质单元。另外,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%。

1.4 其他要素设计

人工湿地设计过程中除了以上几个重要部分外,还有其他要素在设计时也要得到重视,如场地的选择、进出水装置、防渗层和保温层的铺设、自动增氧系统等。

1) 场址

人工湿地处理单位体积污水时所需的占地面积是传统二级生物处理工艺的2~3倍。在选择场址时,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,可减少对周围环境的影响。

2) 进出水装置

湿地床进水时需尽量保证配水的均匀性,多采用多孔管或三角堰等。垂直流湿地常采用多孔管进水,架设在床面上或埋于床体底部,埋于床面底部的缺点是配水调节较为困难。因而,多孔管多设于高出床面0.5 m左右,以防床面淤泥和杂草积累而影响配水。

湿地的出水系统可采用沟排、管排、井排等方式,设计时应考虑受纳水体的特点、湿地系统的布置及场地条件等因素。为有效的控制湿地水位,垂直流人工湿地排水系统一般是在基质层布设穿孔集水管,并设置旋转弯头和阀门。对于严寒地区,进出水管的设置需考虑防冻措施,并在系统的必要部位设置控制阀和放空阀^[24]。

3) 防渗层和保温层

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,油毛毡密封铺垫等,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。在寒冷地区或冬季,要求对湿地进行隔离。好的覆盖物应具有:①二次有机填料能完全分解而不会影响系统的正常运行;②有营养平衡成份,pH值为中性;③结构蓬松,隔热效果好,不堵塞滤床;④种子在覆盖物上易发芽生长(如果将植物的种植作为目的之一);⑤湿气含养能力较好,湿地植物不会受到干旱的影响。树叶常被认为是一次性隔离物;然而树叶分布经常是不均匀的,同时易使热量散失。即使在隔离层有很小的裂口,也会使流动水中的热量损失很大。为了更有效地隔离,必须在设计的时候就将均衡地布置覆盖物作为人工湿地系统的一个主要部分。早期资料中提到许多用于人工湿地覆盖物的原材料,有树皮、树杆、木屑等,厚度控制在15 cm左右,下层覆盖一层5 cm左右的空气缝隙^[25]。

4) 自动增氧系统

为了提高垂直流湿地的硝化能力,可以加设人工增氧系统。可采取的措施有在湿地表面均匀分布曝气管,曝气管底部孔壁钻有小孔,并伸入湿地床体一定深度,设计深度视进出水水质和植物的复氧效率而定,也可在不同高度进行分层布设水平穿孔管。Michal Green^[26]等人对垂直流人工湿地加设曝气管,结果表明可明显增加湿地系统中的含氧量,大大提高硝化效率。另有试验在湿地系统中加设3层增

氧穿孔管,可使湿地中含氧量保持在 0.5 mg/L 以上^[27]。

2 结语与发展趋势

人工湿地是一种新兴的污水处理工艺,应用领域已从最初处理生活污水扩展到工业废水和控制面源污染等方面。然而,其工艺系统的设计多建立在统计数据和经验公式基础上,目前应用最广的是一级动力学模型,但仍然是建立在一定假设条件和忽略某些影响因素的基础上,其参数具有不确定性。想要得到合理的人工湿地系统设计方法,首先必须对其净化机理进行详细的研究,探讨各个转化过程,并进行细化,综合考虑各种因素,建立完整的数据库,确定具体的物料平衡方程、反应公式和相关动力学参数,运用软件对数据、方程进行统计、演算、修正、验证,最后完善人工湿地工艺系统的设计方法。

参考文献:

- [1] 尹军,崔玉波. 人工湿地污水处理技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006: 7-52.
- [2] E. J. Dunne. An integrated constructed wetland to treat contaminants and nutrients from dairy farmyard dirty water[J]. *Ecological Engineering* 2005 (24): 221-234.
- [3] Miklas Scholz. Performance prediction of mature experimental constructed wetlands which treat urban water receiving high loads of lead and copper[J]. *Water Research*, 2003, (37): 1270-1277.
- [4] 王世和. 人工湿地污水处理理论与技术[M]. 北京: 科学出版社, 2007: 174-188.
- [5] 王薇,俞燕,王世和. 人工湿地污水处理工艺与设计[J]. *城市环境与城市生态* 2001, 14(1): 59-62.
- [6] Cooper, P., Smith, M., Maynard, H. The design and performance of a nitrifying vertical-flow reed treatment system[J]. *Water Sci. Tech.*, 1997 (35): 215-221.
- [7] Diederik P. L. Rousseau, Peter A. Vanrolleghem, Niels De Pauw. Constructed wetland in Flanders: a performance analysis[J]. *Ecological Engineering* 2004 (23): 151-163.
- [8] 沈耀良, 杨铨大. 新型废水处理技术——人工湿地[J]. *污染防治技术*, 1996, 9(1,2): 1-8.
- [9] 赵桂瑜, 杨永兴, 杨长明. 人工湿地污水处理系统工艺设计研究[J]. *四川环境* 2005, 24(6): 24-27.
- [10] 吴振斌, 詹德昊. 复合垂直流构建湿地的构建方法及净化效果[J]. *武汉大学学报(工学版)* 2003, 36(1): 12-16.
- [11] 文乐元, 谢可军. 人工湿地——新型污水处理技术[J]. *西南林学院学报* 2002, 22(2): 76-79.
- [12] 陈志澄, 郭丹桂, 熊明辉等. 处理生活污水的植物品种的筛选[J]. *环境污染治理技术与设备* 2006, 7(4): 90-93.
- [13] 刘春常, 夏汉平, 简曙光等. 多层次多物种配置人工湿地处理生活污水研究[J]. *生态环境* 2006, 15(2): 229-233.
- [14] 王全金, 陈栋. 芦苇人工湿地处理技术研究进展[J]. *华东交通大学学报* 2004, 21(4): 1-5.
- [15] 王全金, 李丽等. 潜流人工湿地基质除氮磷效果研究[J]. *华东交通大学学报* 2006, 23(5): 1-3.
- [16] Drizo A, et al. Physico-chemical screening of phosphate-removing substrates for use in constructed wetland systems[J]. *Water Res.* 1999, 33(7): 3595-3602.
- [17] USEPA. Subsurface flow constructed wetlands for wastewater treatment[M]. A Technology Assessment, 1993.
- [18] 郭本华, 宋志文, 李捷, 等. 3种不同基质潜流湿地对磷的去除效果[J]. *环境污染治理技术与设备* 2006, 7(1): 110-113.
- [19] 秦志伟, 洪剑明. 人工湿地不同的水流方式和基质对氮和磷的净化的比较[J]. *首都师范大学学报(自然科学版)* 2006, 27(5): 102-106.
- [20] Defu Xu, Jianming Xu, et al. Studies on the phosphorus sorption capacity of substrates used in constructed wetland systems[J]. *Chemosphere*. 2006 (63): 344-352.
- [21] 胡康萍. 人工湿地设计的水力学问题研究[J]. *环境科学研究* 1991, 4(5): 8-12.
- [22] 陈水平, 夏宜铮. 香蒲、灯心草人工湿地的研究- II. 净化污水的空间[J]. *湖泊科学* 1998, 10(1): 62-66.
- [23] 李爱权, 李文朝, 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): 234-138.
- [24] Carl Dupoldt, Robert Edwards, et al. A Handbook of Constructed Wetlands[M]. Washington DC: The U. S. Government Printing Office, 1990: 17-23.
- [25] S. 华莱士, G. 帕金, C. 考思. 寒冷地区污水处理的人工湿地设计与运行[J]. *中国环保产业* 2003, (6): 40-42.
- [26] Michal Green, Eran Friedler, Iris Safrai. Enhancing Nitrification in Vertical Flow Constructed Wetland Utilizing a Passive Air Pump[J]. *Wat. Res.* 1998, 32(12): 3513-3520.
- [27] 孙亚兵, 冯景伟, 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.

Technological Design of Vertical Flow Constructed Wetland

LI Zhong - wei ,WANG Quan - jin ,LI Li

(School of Civil Engineering ,East China Jiaotong University ,Nanchang 330013 ,China)

Abstract: The paper briefly introduces the definition of constructed wetland types and the impact of operational factors. It also reveals the design of vertical flow constructed wetland system including the design of wetland bed selecting and paving the substrate building the vegetable communities and automated additional air system etc thus giving the engineer parameters.

Key words: constructed wetlands; vertical flow; technological design

(责任编辑:李萍)

(上接第13页)

[4] 西南交通大学结构工程试验中心. 重庆石柱县沿溪大桥检测评估报告[R]. 成都: 西南交通大学 2006.

[5] 严云,徐海燕,任亮,等. 钢管混凝土拉索拱桥桥型

结构特性分析[J]. 世界桥梁 2007 (3): 42 - 44.

[6] 胡常福,任亮. 应力叠加法在钢管混凝土拉索拱桥中的应用研究报告[R]. 南昌: 华东交通大学 2006.

Research on the Problems in Hybrid Truss Arch Bridge and Its Reinforcement Scheme

YAN Yun ,XU Hai - yan ,SHANG Guan - xing

(School of Civil Engineering and Architecture ,East China Jiaotong University Nanchang 330013 ,China)

Abstract: The sources of problems for the pre - stressed concrete hybrid truss arch bridge are discussed. The shortage of construction connection intensity analysis method and internal force adjusting are revealed. The stress superposition method is adapted to evaluate the bearing capacity of the old and dangerous hybrid truss arch that is divided into several construction stages. A finite element model is set up and verified by an example. The characters of the truss and arch are compared. According to variety of internal force of the inclined bar a reinforcement scheme that the inclined bar is replaced by the cable is also advanced. Its theoretic feasibility is verified.

Key words: hybrid truss arch; problem; reinforce; scheme

(责任编辑:王建华)