

潜流人工湿地水力学研究进展

牛瑞华, 宋新山, 周斌, 王宇晖

(东华大学 环境科学与工程学院, 上海 201620)

摘要: 人工湿地因其具有负荷率高、耐冲击负荷、处理效果可靠、占地面积小、美化环境等优点, 正受到生态工程领域越来越广泛的关注和重视。在潜流人工湿地系统设计中, 水力学因素直接关系到污染物的去除效果。通过系统梳理国内外对潜流人工湿地水力学的研究方法及进展, 分析了潜流人工湿地水力学特征参数及其影响因素, 重点探讨了湿地构造、基质、植物和运行方式等因素对水力学特征的影响及其优化途径, 为完善潜流人工湿地系统水力设计, 提高水力效率, 提升污染物去除效果提供理论指导和技术支持。

关键词: 潜流人工湿地; 水力学; 水力参数

中图分类号: X703 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-1683(2014)01-0094-03

Research Progress on Hydraulics of Subsurface Flow Constructed Wetland

NIU Ruihua, SONG Xinshan, ZHOU Bin, WANG Yuhui

(College of Environmental Science and Engineering, Donghua University, Shanghai 201620, China)

Abstract: Subsurface flow constructed wetland (SSFW) is drawing more and more attentions in ecological engineering due to its high load rate, bearing capacity against impact load, reliable treatment effects, less occupied land, and aesthetic effect. In the design of SSFW, hydraulic condition has significant and direct influences on the removal efficiency of pollutants. The research methods and progress on hydraulics of SSFW were illustrated in this paper. The characteristic parameters of hydraulics of SSFW and their impact factors were analyzed. The effects of construction, filter, plant, and inflow configuration of SSFW on the characteristics of hydromechanics were discussed, which can provide theoretical and technical support on hydraulic design of SSFW, increasing of hydraulic efficiency, and improvement of removal effects on pollutants.

Key words: subsurface flow constructed wetland; hydraulics; hydraulic parameters

随着人们对环境问题重视的不断加深, 各种水污染治理技术相继出现, 其中人工湿地(CWS)被证实是一种低成本、生态化的污水处理技术, 在国内外的研究和应用十分广泛^[1]。2010年, 环保部发布了《人工湿地污水处理工程技术规范》, 标志着CWS技术在我国水处理领域的工程化应用进入了规范阶段。

人工湿地除污效率受到多种因素影响, 包括气候温度、基质微生物、植物种类、运行方式等, 对此国内外相关研究颇多。另外, 水力条件的改变会影响人工湿地污水的停留时间、污染物与基质的有效接触面积等, 从而对人工湿地除污效果起到关键作用。目前, 应用广泛的潜流人工湿地的水流方式需要通过人为控制来进行调整, 对其水力条件的研究显得更为重要^[1-3], 也逐步受到重视。但是, 关于人工湿地水力条件的影响因素及其优化方法的研究成果相对零散。因此,

笔者着重归纳分析人工湿地水力学的研究方法和影响水力条件的主要因素, 为提升人工湿地对污染物去除效果提供一定借鉴。

1 潜流人工湿地水力学研究方法

潜流人工湿地内水的流态属于多孔介质流。但是, 在人工湿地基质中, 错综复杂的根系导致其周围极易出现紊流, 所以其水力特征很难用渗流研究中的成熟理论来描述^[3]。目前, 人工湿地水力学研究方法主要包括理论分析法、数值模拟法和实验法。

1.1 理论分析法

理论分析法是利用流动模型假设, 给出所研究问题的解析解或简化方程。当潜流水的流动状态为层流时, 人工湿地的水力学方程可采用达西公式表述^[4]; 当渗流的雷诺数 $Re >$

收稿日期: 2013-7-16 修回日期: 2013-11-10 网络出版时间: 2013-12-17

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/doi/10.3724/SP.J.1201.2014.01098.html>

基金项目: 国家自然科学基金(51079028); 国家科技重大专项课题(2012ZX07205-005)

作者简介: 牛瑞华(1989-), 男, 河南人, 硕士研究生, 主要从事水污染治理及水环境研究。E-mail: nrh36@163.com

通讯作者: 王宇晖(1984-), 男, 上海人, 讲师, 博士, 主要从事水环境及水生态研究。E-mail: yhwang@dh.u.edu.cn

10^{-5} 时,对水流的扰动作用已不能忽视,一般则可采用厄刚(Ergun)公式来描述^[9]。随着潜流人工湿地理论研究的深入,多种水力学模型相继被提出:Kadeld^[7]提出了理想推流模型(PFM),Florent^[8]提出了弥散推流模型(DPFM),Han^[9]等人提出了多流弥散模型(MFDM),Deans^[10]提出了连续完全混合反应器模型(CSTRM)。这些模型对湿地构造、运行方式、和水力学参数的选择等方面提供了一定的借鉴。

1.2 数值模拟法

数值模拟法通过数值计算和图像显示对流场问题进行研究。随着紊流理论的发展和计算机计算能力的提高,数值模拟方法有了较大的发展。其中,计算流体力学技术将实验研究与理论分析方法联系起来,使很多简化流动模型的方法得到发展和完善^[2],为人工湿地水动力模拟和数学建模分析提供了有效手段。例如,范立维^[11]采用计算流体力学(CFD)对潜流人工湿集水区对水力学性能的影响进行了数值模拟研究,结果表明在平均停留时间相差不大的情况下,散度成为潜流人工湿地水力效率的主要影响因素;肖海文^[12]对人工湿地水力停留时间分布进行了模拟研究,通过比较分析水力停留时间分布的早期高峰、峰值集中和尾部倾斜拖长等流态特征,结果表明活塞流反应器并联完全混合反应器模型处理效果最好。

1.3 实验法

实验法是人工湿地水力学研究中最常用的方法,它是利用示踪剂表征相应的水流运动,对其分析后得到水流运动的规律性。其基本原理是在系统进水中瞬时加入示踪剂脉冲,绘出系统出水中示踪剂浓度随时间的响应曲线(RTD),以判断湿地系统短流、死区比例以及水力效率^[13]。Florent^[14]等将活塞流离散模型和多釜串联模型运用到潜流人工湿地水力学研究中,通过示踪剂实验指出其更适合模拟潜流人工湿地中的非理想流动。王久贤^[13]对白泥坑人工湿地水力学计算进行了研究,由示踪剂试验确定了系统中水力停留时间分布(RTD),提出RTD的不同是湿地处理效率差异的主要原因。

2 潜流人工湿地水力学特征描述

潜流人工湿地水力学特征参数主要包括水深、流量、水力负荷、水力停留时间(HRT)等。

水深对湿地内部的氧含量影响较大,是湿地植物生长、微生物繁殖的制约因素,溶解氧过低将使氨氧化过程受到影响,因此对水深的控制尤其重要。

水力负荷是通过单位面积的水流体积。在不同的水力负荷条件下,湿地的污水处理效果差异很大:水力负荷过高,水力停留时间缩短,污水处理效果相应降低。这是因为水力负荷过高时,植物根系、微生物、基质对污染物的接触面积过低,不能充分发挥湿地系统的去污能力^[15]。

HRT与人工湿地处理效率密切相关。HRT时间过短,污染物与植物、微生物和基质的接触时间较短,生化反应不充分,从而导致处理效果不佳。反之,HRT过长,容易引起污水滞留、厌氧区域扩大以及基质堵塞等问题。因此,HRT是影响人工湿地污染物去除效率的重要因素。

此外,水力条件还能直接或间接改变人工湿地的物理化

学性质,如氧化还原电位、pH值等。

根据上述水力指标对人工湿地的影响,人们提出了能综合分析影响人工湿地污染物去除效率的指标——水力效率^[9],例如,王世和等^[17]研究了水力条件对人工湿地处理效果的影响,通过测定分析水深、水力负荷、水力停留时间等对人工湿地中的COD、悬浮物、氨氮等去除效果的影响及其规律,探明了各自净化机理。国外也有很多学者提出了衡量人工湿地水力效率的指标,如Tact^[18]提出的短路值,Tackston^[9]提出的有效体积比等。

3 潜流人工湿地水力学特征的影响因素

3.1 湿地构造

湿地结构是影响潜流人工湿地水力学特征的一大因素。Garcia^[20]等通过示踪剂实验研究了长宽比对潜流人工湿地水流运动的影响,结果表明长宽比增加,会导致水力停留时间增加、活塞流比例升高、死区率降低。Alcocer^[21]等研究了长宽比对潜流人工湿地水力效率的影响,发现较大的长宽比可以降低短流影响,提高水力效率。Holland^[22]等通过染料示踪剂实验研究了水深对潜流人工湿地水力效率的影响,实验结果表明增大水深有助于提高水力效率。

3.2 基质

基质种类、尺寸以及填充方式对潜流人工湿地水力特征均有影响。William^[23]等研究了粗砾、豆砾以及砂三种填料的芦苇潜流人工湿地水力传导性,实验结果表明豆砾是潜流人工湿地填料较好的选择,其水力传导性较好,不易堵塞。Alcocer^[21]等通过示踪剂实验研究了基质粒径等对潜流人工湿地水力学性能的影响,结果表明,较小的粒径可以增加水力停留时间,减少短流,但会降低活塞流比例。Suliman^[16]等研究了基质装填方式对潜流人工湿地水力学性能的影响,结果显示填料分层装填可以提高湿地除污效率。

3.3 湿地植物

King^[24]等研究了植物根部结构和微生物膜对人工湿地水体流态的影响,结果显示单一因素并不能完全表征其对人工湿地水流的影响。Grismer^[25]等通过示踪剂实验研究了植物对潜流人工湿地水流弥散的影响,认为植物加深了水流弥散程度。Eva^[26]等研究了植物根区对潜流人工湿地水流运动的影响,认为植物的蒸发作用对水流运动有着较大影响。

3.4 运行方式

Suliman^[16]等研究了进出水位置对潜流人工湿地水力学性能的影响,结果显示不同进出水方式使得水力停留时间不同,导致湿地处理效果迥异。宋新山等^[27]研究了不同布水方式对水平潜流人工湿地水力效率的影响,发现对流扩散模型能够较好模拟一般推流、波流、对角流,基于对流扩散机制的叠加模型能够较好模拟多向入流、多点进水类型的人工湿地。

4 存在的问题

目前,潜流人工湿地水力学特性的研究中普遍采用示踪剂模拟实验方法分析水流规律,但是该方法存在一定缺陷,涉及到示踪剂及其注入方法的选择等诸多问题,有必要利用

更先进的研究方法来探讨潜流人工湿地水力学特性。

潜流人工湿地水力学性能影响因素,如湿地构造、基质类型及尺寸、湿地植物和运行方式等对水力停留时间的影响,是目前主要的研究内容,但大部分研究都停留在观测分析各因素对水力停留时间分布(RTD)曲线形状的影响方面,鲜有根据RTD拟合模型进行模拟计算。此外,在人工湿地实际工程应用中,湿地基质堵塞是一个经常发生的问题,而上述水力因素与基质堵塞之间的关系也鲜有研究。

参考文献(References):

- [1] 胡康萍. 人工湿地设计中的水力学问题研究[J]. 环境科学研究, 1991, 4(5): 8-12. (HU Kang ping. Hydraulic Factors in Constructed Wetlands Design[J]. Research of Environmental Sciences, 1991, 4(5): 8-12. (in Chinese))
- [2] 赵秉文, 姜坪, 陈晓春. CFD技术及其在水处理研究中的应用[J]. 环境科学与技术, 2006, 29(6): 77-78. (ZHAO Bing wen, JIANG Ping, CHEN Xiao chun. Computational Fluid Dynamics Technique: Its Application to Water Treatment [J]. Environmental Science & Technology, 2006, 29(6): 77-78. (in Chinese))
- [3] 陆琦, 郭宗楼. 人工湿地系统水力学优化设计研究[D]. 浙江大学, 2005: 36-42. (LU Qi, GUO Zong lou. Study on Hydraulic Optimal Design of Constructed Wetland [D]. Zhejiang University, 2005: 36-42. (in Chinese))
- [4] Fisher P J. Hydraulic Characteristics of Constructed Wetlands at Richmond, NSW, Australia[J]. Constructed Wetlands in Water Pollution Control, 1990, 2: 21-31.
- [5] 清华大学水力学教研组. 水力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2010: 412-415. (Hydraulics Teaching and Research Group of Tsinghua University. Hydraulics[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2010: 412-415. (in Chinese))
- [6] 沈耀良. 废水生物处理理论与应用[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2006: 327-336. (SHEN Yaoliang. Theory and Application of Biological Wastewater Treatment[M]. Beijing: China Building Industry Press, 2006: 327-336. (in Chinese))
- [7] Kadlec R H. Detention and Mixing in Free Water Wetlands[J]. Ecological Engineering, 1994, 3(4): 345-380.
- [8] Florent C, Gerard M, Yves G. Hydrodynamics of Horizontal Subsurface Flow Constructed Wetlands [J]. Ecological Engineering, 2003, 21(2-3): 165-173.
- [9] Han R P, Zhang J H, Zhou W H, et al. Equilibrium Biosorption Isotherm for Lead Ion on Chaff [J]. Journal of Hazardous Materials, 2005, 125(1-3): 266-271.
- [10] 张涛, 宋新山, 卢守波. 多介质潜流人工湿地的水动力过程模拟[J]. 环境科学与技术, 2011, 34(4): 27-30. (ZHANG Tao, SONG Xin shan, LU Shou bo. Mathematical Modeling of Hydrodynamics in Heterogeneous Subsurface Flow Constructed Wetland[J]. Environmental Science and Technology, 2011, 34(4): 27-30. (in Chinese))
- [11] 范立维, 海热提, 卢泽湘. 用CFD研究潜流人工湿地集水区对其水力学性能的影响[J]. 化工学报, 2007, 58(12): 3024-3026. (FAN Li wei, HAI Re ti, LU Ze xiang. CFD Study on Effect of Catchment Area on Hydraulic Performance of Subsurface Flow Constructed Wetland[J]. Journal of Chemical Industry and Engineering, 2007, 58(12): 3024-3026. (in Chinese))
- [12] 肖海文, 翟俊, 邓荣森, 等. 人工湿地水力停留时间分布模拟[J]. 环境科学学报, 2012, 32(12): 2998-3005. (XIAO Hai wen, ZHAI Jun, DENG Rong sen, et al. Modeling the Residence Time Distribution of Constructed Wetland[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2012, 32(12): 2998-3005. (in Chinese))
- [13] 王久贤. 白泥坑人工湿地水力学计算研究[J]. 广东水利水电, 1997, (6): 50-52. (WANG Jiur xian. Hydraulic Calculation of Constructed Wetlands in Bainikeng[J]. Guangdong Water Resources and Hydropower, 1997, (6): 50-52. (in Chinese))
- [14] Florent C, Gerard M, Yves G. Hydrodynamics of Horizontal Subsurface Flow Constructed Wetlands [J]. Ecological Engineering, 2003, 21(2-3): 165-173.
- [15] 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: 36-39. (WANG Shi he. Theory and Technology of Wastewater Treatment by Constructed Wetland[M]. Beijing: Science press, 2007: 36-39. (in Chinese))
- [16] Suliman, Futsaether, Oxaal. Hydraulic Performance of Horizontal Subsurface Flow Constructed Wetlands for Different Strategies of Filling the Filter Medium into the Filter Basin [J]. Ecological Engineering, 2007, 29(1): 45-55.
- [17] 王世和, 王薇, 俞燕. 水力条件对人工湿地处理效果的影响[J]. 东南大学学报, 2003, 33(3): 359-362. (WANG Shi he, WANG Wei, YU Yan. Influence of Hydraulic Condition on Treatment Effect of Constructed Wetland[J]. 2003, 33(3): 359-362. (in Chinese))
- [18] Tact, Briganl. Application of Computational Fluid Dynamics Technique to Storage Reservoir Studies [J]. Water Science and Technology, 1998, 37(2): 219-226.
- [19] Thankston, Shields, Schroeder. Residence time Distribution of Shallow Basin [J]. Journal of Environment Engineering, 1987, 113(6): 1319-1332.
- [20] Garcia J, Chiva J. Hydraulic Behavior of Horizontal Subsurface Flow Constructed Wetlands with Different Aspect Ratio and Granular Medium Size [J]. Ecological Engineering, 2004, 23: 177-187.
- [21] Alcocer DJ R, Vallejos G G, Champagne P. Assessment of the Plug flow and Dead Volume Ratios in a Subsurface Horizontal flow Packed bed Reactor as a Representative Model of a Subsurface Horizontal Constructed Wetland [J]. Ecological Engineering, 2012, 40: 18-26.
- [22] Holland JF, Martin JF, Granata T, et al. Effects of Wetland Depth and Flow Rate on Residence Time Distribution Characteristics [J]. Ecological Engineering, 2004, 23(3): 189-203.
- [23] William E S, Tammo S S, Parlange J Y, et al. Hydraulic Conductivity of Gravel and Sandas Substrates in Rock-reed Filters [J]. Ecological Engineering, 1995, 4(4): 321-336.
- [24] King A C, Mitchell C A, Howes T. Hydraulic Tracer Studies in a Pilot Scale Subsurface Flow Constructed Wetland [J]. Water Science and Technology, 1997, 35(5): 189-196.
- [25] Grismer ME, Tausendschoen M, Shepherd HL. Hydraulic Characteristics of a Subsurface Flow Constructed Wetland for Wwery Effluent Treatment [J]. Water Environment Research, (下转第109页)

步:首先,采用混凝沉淀过滤法,对离子超标矿井水进行预处理,使其达到生态用水和工业用水标准;其次,若是水中总硬度、硫酸盐含量或其他指标仍然偏高,选用电渗析、反渗透或纳滤法进行二次处理。其水质处理工艺流程为:矿井水→调节池→加药混合→水力旋流器→净化设备→电渗析、反渗透(需提前酸化)或纳滤器→紫外线消毒器→生态或工业用水。

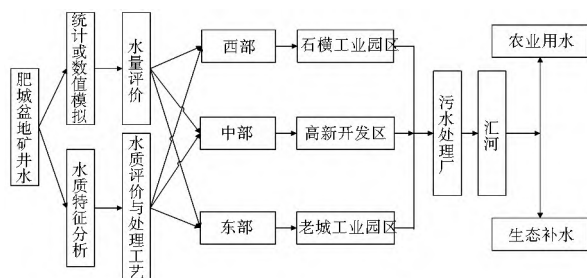


图7 肥城盆地矿井水开发利用模式

Fig. 7 The development and utilization mode of mining water in the Feicheng Basin

4 结论

肥城盆地矿井水现状利用率较低,工业用水潜在需求较大。对1982年-2011年矿井涌水量长序列数据分析发现,矿井水总体呈现显著增长趋势,且受水文地质条件影响较大。利用AquaChem5.1软件分析,矿井水质硬度和硫酸盐离子含量较高,需建立合理可行的矿井水处理工艺。根据肥城市区域发展规划,结合矿井水水质特征与空间分布规律,提出了肥城盆地矿井水资源开发利用模式。如果每年近3000万m³的矿井水得到充分利用,将对缓解城市水资源紧张、改善水生态环境具有重大意义。

参考文献(References):

[1] 何绪文,杨静,邵立南,等.我国矿井水资源化利用存在的问题与解决对策[J].煤炭学报,2008,33(1):63-66.(HE Xurwen, YANG Jing, SHAO Lirnan, et al. Problem and Countermeasure of Mine Water Resource Regeneration in China[J]. Journal of China Coal Society, 2008, 33(1): 63-66. (in Chinese))

[2] 张树军,许士国,高尧,等.淮北市采煤沉陷区非常规水资源开发利用研究[J].水电能源科学,2010,28(7):27-30.(ZHANG Shurjun, XU Shirguo, GAO Rao, et al. Study on Unconventional Water Resources Utilization of Coal Mining Subsidence Areas in Huaibei City[J]. Water Resources and Power, 2010, 28(7): 27-30. (in Chinese))

[3] 王其虎,叶义成,刘艳章,等.矿坑涌水对大气降水的响应分析

及预测[J].安全与环境学报,2012,12(1):182-185.(WANG Qirhu, YE Yircheng, LIU Yanzhang, et al. Response Analysis and Forecasting of the Pit-water Due to the Rainfall[J]. Journal of Safety and Environment, 2012, 12(1): 182-185. (in Chinese))

[4] 邢艳允,陶月赞,刘佩贵.矿坑用水可利用量研究[J].合肥工业大学学报(自然科学版),2012,35(6):794-798.(XING Yanyun, TAO Yuezan, LIU Peigui. Research on Available Quantity of Mine Pit Water[J]. Journal of Hefei University of Technology, 2012, 35(6): 794-798. (in Chinese))

[5] 孙娟,江行久.五龙煤矿涌水量及可利用水量评价[J].水资源保护,2010,26(3):27-29.(SUN Juan, JIANG Xingjiu. Water Yield and Evaluation of Available Water of Wulong Coal Mine [J]. Water Resources Protection, 2010, 26(3): 27-29. (in Chinese))

[6] 冯启言,王华,李向东,等.华东地区矿井水的水质特征与资源化技术[J].中国矿业大学学报,2004,33(2):194-196.(FENG Qiryan, WANG Hua, LI Xiangdong, et al. Characteristics and Utilization of Mine Water in East China[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2004, 33(2): 194-196. (in Chinese))

[7] 莫樊,郁钟铭,吴桂义,等.煤矿矿井水资源化及综合利用[J].煤炭工程,2009,(6):103-105.(MO Fan, YU Zhongming, WU Guirui, et al. The Regeneration and Utilization of Mine Water Resources[J]. Coal Engineering, 2009, (6): 103-105. (in Chinese))

[8] 田华.河南省矿井水资源化研究[J].水利水电技术,2012,43(3):6-8.(TIAN Hua. Study on Resourceization of Mille Water in Henan Province[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2012, 43(3): 6-8. (in Chinese))

[9] 范明元,李福林,仕玉治,等.黄河下游利津站入海水沙通量时序变化特征识别[J].水资源保护,2012,28(1):5-8.(FAN Mingyuan, LI Furin, SHI Yuzhi, et al. Identification of Characteristics of Time Series Change of Water and Sand Flux at Lijin Hydrological Station in Lower Yellow River[J]. Water Resources Protection, 2012, 28(1): 5-8. (in Chinese))

[10] 杨郦城,沈照理,文东光,等.鄂尔多斯白垩系地下水盆地硫酸盐的水文地球化学特征及来源[J].地球学报,2008,29(10):553-562.(YANG Lircheng, SHEN Chaoli, WEN Dongguang, et al. IHydrocheical Characteristics and Sources of Sulfate in Groundwater of the Ordos Cretaceous Groundwater Basin[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2008, 29(10): 553-562. (in Chinese))

(上接第96页)

2001, 73(4): 466-477.

[26] Eva M S, Uli M, Peter G. Performance Evaluation of Different Horizontal Subsurface Flow Wetland Types by Characterization of Flow Behavior Mass Removal and Depth-dependent Contaminant Load[J]. Water Research, 2013, 47: 769-780.

[27] 宋新山,张涛,严登华,等.不同布水方式下水平潜流人工湿地的水力效率[J].环境科学学报,2010,30(1):117-123.(SONG Xirshan, ZHANG Tao, YAN Denghua, et al. Hydraulic Efficiency of Horizontal Subsurface Flow Constructed Wetlands for Differential Inflow Configuration[J]. 2010, 30(1): 117-123. (in Chinese))

的水力效率[J].环境科学学报,2010,30(1):117-123.(SONG Xirshan, ZHANG Tao, YAN Denghua, et al. Hydraulic Efficiency of Horizontal Subsurface Flow Constructed Wetlands for Differential Inflow Configuration[J]. 2010, 30(1): 117-123. (in Chinese))