

## 污水处理与回用

赵亚芳,白华清,孙政. 人工湿地在污水处理中的应用案例及常见问题探讨[J]. 净水技术, 2022, 41(5):53-61.

ZHAO Y F, BAI H Q, SUN Z. Application case and common problem discussion of constructed wetland in sewage treatment[J]. Water Purification Technology, 2022, 41(5): 53-61.

扫我试试?

## 人工湿地在污水处理中的应用案例及常见问题探讨

赵亚芳,白华清,孙 政

(中国市政工程西南设计研究总院有限公司,四川成都 610225)

**摘 要** 人工湿地是建立在生态学基础上的一项新型生态污水处理技术,因其具有好的出水水质、能增加绿地面积、低投资、能改善和美化生态环境、操作简单、维护和运行费用低廉等优点,从而被广泛应用。文中分析人工湿地的应用现状,以大理州洱源县邓北桥人工湿地、贵阳都溪河片区人工湿地和成都西区人工湿地为例,剖析了人工湿地在处理微污染水、污水处理厂尾水方面的优势及存在的问题,同时分析了人工湿地在其他污水处理中的应用效果及呈现的问题,并针对人工湿地在实际应用中出现的堵塞、易受季节影响、脱氮除磷效果不稳定、占地面积大、数据库匮乏等问题提出相应的解决对策,以期为人工湿地以后的应用提供理论参考和指导。

**关键词** 人工湿地 应用现状 问题和对策 堵塞 污水处理

中图分类号: X703 文献标识码: A 文章编号: 1009-0177(2022)05-0053-09

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2022.05.009

### Application Case and Common Problem Discussion of Constructed Wetland in Sewage Treatment

ZHAO Yafang, BAI Huaqing, SUN Zheng

(Southwest Municipal Engineering Design & Research Institute of China Co., Ltd., Chengdu 610225, China)

**Abstract** Constructed wetland is a new type of ecological sewage treatment technology based on ecology. It has the advantages of good effluent quality, increased green area, low investment, improvement and beautification of ecological environment, simple operation, low maintenance and operation costs, etc. So it has been widely used. This paper analyzed the application status of constructed wetlands. Taking Dengbeiqiao constructed wetlands in Eryuan County, Dali Prefecture, Duxi River area constructed wetlands in Guiyang, and Chengdu West area constructed wetlands as examples, the advantages and existing problems of constructed wetlands in the treatment of micro-polluted water and sewage treatment plant tail water were analyzed. At the same time, it analyzed the application effects and problems of constructed wetland in other sewage treatment. Corresponding solutions were proposed for the problems of blockage, susceptibility to seasonal influences, unstable denitrification and phosphorus removal effects, large land area, and lack of databases in the actual application of constructed wetlands, which have been expected to provide theoretical reference and guidance for the future application of constructed wetlands.

**Keywords** constructed wetland application status problem and solution blockage sewage treatment

[收稿日期] 2021-06-30

[作者简介] 赵亚芳(1987—),女,硕士,主要从事污水废水处理研究及设计工作,E-mail:360428330@qq.com。

人工湿地自20世纪70年代在德国首次投入使用以来,就凭借着好的出水水质、能够增加绿地面积、低投资、改善和美化生态环境、操作简单、维护和

运行费用低廉等优点,被许多国家纷纷用于污水治理。人工湿地技术从研究、开发到工程应用,不断取得成功,在改善水质和生态环境方面发挥着不可替代的作用,受到了各国的普遍关注,展现出广阔的应用前景。

人工湿地建立在生态学基础上,是由人工建造且控制、运行与沼泽地类似的地面,污水与污泥在沿一定方向流动的过程中,主要利用人工基质、微生物、植物等对污水进行净化的一项新型生态污水处理技术。本文主要阐述了国内外人工湿地在处理污水中的应用现状,着重分析了人工湿地在处理微污染源、污水处理厂尾水、其他污水方面的效果及遇到的问题,针对人工湿地出现的堵塞问题、易受季节影响、脱氮除磷效果不稳定、占地面积大、数据库匮乏等问题提出了相应的解决对策,以期为人工湿地的推广应用提供借鉴。

## 1 人工湿地的应用现状

国内外人工湿地被广泛用于处理低污染水、生活污水、生产废水等。低污染水有微污染的水源水、污水处理厂的尾水;生活污水有农村生活污水、城市生活污水;工业废水有采矿废水<sup>[1]</sup>、采油废水<sup>[2]</sup>、高盐度废水<sup>[3]</sup>、城市垃圾渗滤液<sup>[4]</sup>等。近年来,随着国民经济的发展,国家对污水治理和环境问题越来越重视,各省相继出台了地方污水治理标准及污水排放标准,人工湿地被广泛用于微污染水处理、污水深度处理、生活污水处理及工业污水处理。人工湿地的基建投资大约是传统二级污水处理厂建设成本的2/3,处理污水的运行成本大约是传统二级处理的1/2。本文对人工湿地在应用中的典型案例进行分析,并对人工湿地在污水处理过程中呈现的问题进行阐述,对解决问题的办法进行剖析。

### 1.1 大理州洱源县邓北桥人工湿地处理微污染水的应用

微污染源的主要特点是污染物浓度低且水量巨大,采用高基建、高耗能强化的传统处理方法处理微污染源,投资巨大,但采用人工湿地等组合工艺处理微污染水效果显著。永安江是洱海北部重要的支流之一,年径流量占洱海径流量的5%。从2010年8月—2012年8月,对永安江水质进行水质调查,水体主要超标污染物为TN,水体中TN、氨氮、TP质量浓度分别在0.40~4.20、0.050~0.800、0.000~

0.279 mg/L,总体为《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)中劣V类水体,为满足《云南洱海绿色流域建设与水污染防治中长期规划》中提出Ⅲ类水的要求。在永安江中游建邓北桥人工湿地,湿地占地面积为65 800 m<sup>2</sup>,经处理后排放回永安江,邓北桥人工湿地的平面布置如图1所示,工艺流程如图2所示,微污染源依次经过氧化塘—一级表流湿地—水平潜流湿地—二级表流湿地处理,达标后排放回永安江。

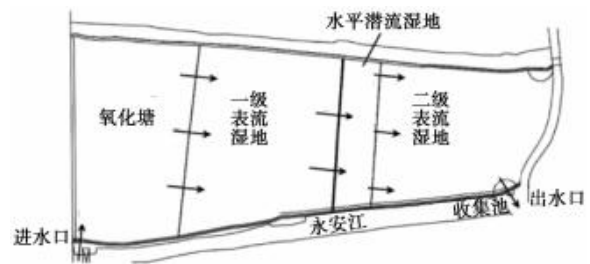


图1 人工湿地处理微污染水平面布置图

Fig. 1 Layout Plan of Constructed Wetland for Treatment of Micro-Polluted Water

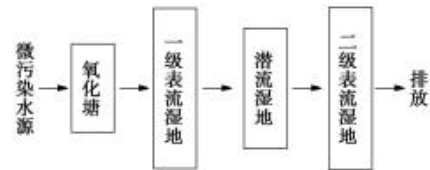


图2 人工湿地系统处理微污染水流程图

Fig. 2 Flow Chart of Constructed Wetland System for Treatment of Micro-Polluted Water

经过人工湿地处理后,出水TN平均质量浓度为1.60 mg/L,最低质量浓度为0.00 mg/L,最高质量浓度为3.07 mg/L;出水氨氮平均质量浓度为0.130 mg/L,最低质量浓度为0.015 mg/L,最高质量浓度为1.200 mg/L;出水TP平均质量浓度为0.350 mg/L,最低质量浓度为0.000 mg/L,最高质量浓度为0.210 mg/L,出水水质总体达到地表水Ⅲ类排放标准。

每年的12月—来年2月,TN、氨氮浓度最高,冬季的平均去除率仅为34.89%、43.76%。原因可能有以下几点:①冬季气温偏低,微生物的活性受限制,进而导致出水中TN及氨氮浓度偏高;②冬季植物自然枯死,植物对TN及氨氮的吸收量受到影响;③受到进水水质波动的影响,降水及上游居民的生活生产会影响进水的流量及人工湿地的负荷,导致

进水中 TN 的最高值 (3.07 mg/L) 远高于其平均值 (1.60 mg/L), 进水中氨氮的最高值 (0.200 mg/L) 也远高于其平均值 (0.130 mg/L)<sup>[5]</sup>。此外, 传统人工湿地与混合潜流人工湿地、垂直流人工湿地相比, 具有启动慢、易堵塞、占地面积大等缺点。以下介绍混合型潜流人工湿地、垂直流人工湿地的应用。

## 1.2 贵阳综保区都溪河片区污水处理厂尾水深度处理的应用

都溪河片区污水处理厂以及人工湿地近期规模

为 5 000 m<sup>3</sup>/d, 远期规模为 10 000 m<sup>3</sup>/d, 经过污水处理厂处理后的尾水达《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002) 一级 A 标准后, 排入混合型潜流人工湿地, 经过人工湿地处理后的出水水质优于 GB 18918—2002 一级 A 标准, 主要指标 (BOD<sub>5</sub>、COD<sub>Cr</sub>、氨氮、TP 等) 达到 IV 类水体标准, 即“准 IV 类”。经过人工湿地处理后的水排入生态涵养区, 混合型潜流湿地进出水水质如表 1 所示。

混合型潜流人工湿地区位如图 3 所示。

表 1 混合型潜流人工湿地设计进出水水质标准

Tab. 1 Designed Water Quality Standard of Influent and Effluent for Mixed Subsurface Flow Constructed Wetlands

项目	pH 值	BOD <sub>5</sub> /(mg·L <sup>-1</sup> )	COD <sub>Cr</sub> /(mg·L <sup>-1</sup> )	SS /(mg·L <sup>-1</sup> )	TN(以 N 计) /(mg·L <sup>-1</sup> )	氨氮 /(mg·L <sup>-1</sup> )	TP(以 P 计) /(mg·L <sup>-1</sup> )
进水指标	6~9	≤10	≤50	≤10	15	5(8)	0.5
出水指标	6~9	6	30	10	10	1.5(3)	0.3

注: 括号外数值为水温>12℃时的控制指标, 括号内数值为水温≤12℃时的控制指标

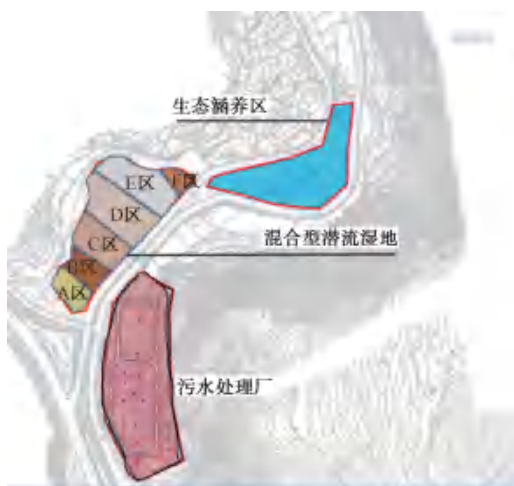


图 3 混合型潜流人工湿地位置各区布置示意图

Fig. 3 Schematic Diagram of Layout of Each Area of Mixed Subsurface Flow Constructed Wetlands

混合型潜流人工湿地占地有效面积为 12 500 m<sup>2</sup>, 设计水深为 1.5 m, 混合潜流人工湿地由 A~F 区这 6 个区域组成, 该系统可以完成“氨化-硝化-反硝化”的过程, 使系统高效脱氮。此外, 该系统也可有效地氧化还原性物质, 改变水体氧化还原电位, 促进水体中磷的去除 (主要依赖于植物的吸收和磷的固定), 该混合型潜流人工湿地的主要设计内容如表 2 所示。

A 区处于兼氧状态, 漂浮植物通过根系吸收污水中的营养物质, 利用生物挂膜来降低水体有机物含量; B~E 区均采用微孔曝气, 处于富氧状态, 植物通过微孔曝气增加水体中的溶解氧, 促使氨氮在硝化细菌作用下, 转化为硝态氮, 完成硝化作用, 以降低水体中的氨氮含量, 硝态氮在水体底部厌氧环境下被反硝化细菌还原成气态氮 (N<sub>2</sub>、N<sub>2</sub>O) 而进入大

表 2 混合型潜流人工湿地分区布置

Tab. 2 Location of Mixed Subsurface Flow Constructed Wetlands

分区	设计	状态	有效面积/m <sup>2</sup>
A	根系发达漂浮植物+挂膜+微生物系统	兼氧状态	1 740
B	微孔曝气+漂浮植物+微生物系统	富氧状态	1 460
C	微孔曝气+高密度浮游动物+营养掠夺型水草+微生物系统	富氧状态	2 500
D	微孔曝气+中密度浮游动物+耐污型水草+微生物系统	富氧状态	3 200
E	微孔曝气+低密度浮游动物+净水型水草+鱼虾螺贝+微生物系统	富氧状态	2 800
F	珊瑚沙	富氧状态	800



气。而磷元素则可以在水体底部矿化或被聚磷菌吸收,降低水体磷的含量;C~E区沉水植物选择耐污能力较强,依据沉水植物特性,深化吸收、降解水体中氮、磷及部分有机污染物。为了更好地应对季节性变化对人工湿地的影响,使脱氮除磷效果更好,使人工湿地的出水更稳定,成都市西区人工湿地采用下流式预埋微生物垂直流人工湿地。

### 1.3 成都市西区污水处理厂尾水深度处理的应用

成都市西区污水处理厂主要收集犀浦和高新西区部分污水,现状规模为 5.99 万 m<sup>3</sup>/d,一期、二期出水标准均执行国家一级 A 排放标准,随着《四川省岷江、沱江流域水污染物排放标准》(DB 51/2311—2016)标准的执行,西区污水处理厂的污水需深度处理后才能达标排放。因此,将西区污水处理厂的污水提升至垂直流人工湿地,经过人工湿地处理,出水达标后排放至清水河。下流式预埋微生物垂直流人工湿地的平面图如图 4 所示,工艺流程如图 5 所示,污水厂出水依次经过尾水提升泵房-人工湿地处理后达标排放。

人工湿地易堵塞,氮、磷去除效果不稳定、不理想,该系统针对以上问题做出了优化设计,工程采用下流式预埋微生物垂直流人工湿地。该人工湿地的具体构造如图 6 所示,湿地进水采用进水渠及布水管,湿地内部穿孔布水管及湿地底部穿孔收集管均采用硬聚乙烯塑料排水管,由分渠到总渠收集,科学设置布水系统,可防止填料堵塞。此外,湿地构筑物内自下而上放置砾石、大石、碎石、专业填料、砂、土,每铺设一层填料后,在该填料的表面放置固体专性



图 4 垂直流人工湿地平面布置图

Fig. 4 Flat of Vertical Flow Constructed Wetland

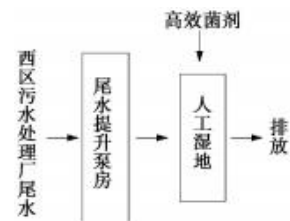


图 5 垂直流人工湿地处理工艺流程图

Fig. 5 Flow Chart of Vertical Flow Constructed Wetland Treatment

菌种粉末(或颗粒)或放置包埋固定化的专性菌种填料,在砂、土内种植挺水植物,这些专性菌种包括高效的好氧、兼氧、厌氧、硝化、反硝化纯菌及高效的低碳源除磷脱氮填料(缓释碳源),可有效提高脱氮除磷效果。

人工湿地进水水质为一级 A 标准,出水水质达到《四川省岷江、沱江流域水污染物排放标准》(DB 51/2311—2016),具体参数如表 3 所示。



图 6 人工湿地构造图

Fig. 6 Structure Diagram of Constructed Wetland

表3 设计进出水水质标准  
Tab. 3 Designed Water Quality Standard of Influent and Effluent

项目	pH 值	BOD <sub>5</sub> /(mg·L <sup>-1</sup> )	COD <sub>Cr</sub> /(mg·L <sup>-1</sup> )	SS /(mg·L <sup>-1</sup> )	TN(以 N 计) /(mg·L <sup>-1</sup> )	氨氮 /(mg·L <sup>-1</sup> )	TP(以 P 计) /(mg·L <sup>-1</sup> )
进水指标	6~9	≤10	≤50	≤10	35	5(8)	0.5
出水指标	6~9	6	30	10	10	1.5(3)	0.3

注:括号外数值为水温>12℃时的控制指标,括号内数值为水温≤12℃时的控制指标

### 1.4 人工湿地在其他污水处理中的应用

人工湿地在生活污水、生活污水+工业废水的处理方面也应用较多(表4),人工湿地处理生活污水时能有效去除 COD<sub>Cr</sub>、BOD<sub>5</sub>,去除率分别可达到 92.4%、94.5%,SS 去除率可达 88.8%;人工湿地处理工业废水+生活污水时,COD<sub>Cr</sub>、BOD<sub>5</sub> 去除率分别

可达到 85.8%、81.2%,SS 的去除率可达 93.8%;总体上,人工湿地对 TN、TP 的去除效果不稳定,具体与人工湿地的进出水水质、水量、人工湿地的种类有关。由表 5 可知,出水 COD<sub>Cr</sub>、BOD<sub>5</sub> 可达 GB 18918—2002 一级 A 标准,出水 SS 的去除率接近一级 A 标准,部分可达标排放。

表4 人工湿地系统去除效率比较  
Tab. 4 Comparison of Removal Efficiency in Constructed Wetlands System

工程	参考文献	应用湿地类型	BOD <sub>5</sub> 去除率	COD <sub>Cr</sub> 去除率	SS去除率	TN去除率	TP去除率	污水类型
白泥坑人工湿地	[6]	潜流	90.0%	92.4%	88.1%	/	/	生活污水
深圳石岩河人工湿地	[7]	垂直流	94.5%	88.3%	57.0%	46.7%	94.9%	生活污水
某住宅小区人工湿地	[8]	复合垂直流	92.6%	91.4%	88.8%	70.8%	94.3%	生活污水
北京昌平人工湿地	[9]	表面流	85.8%	81.2%	93.8%	64.6%	55.1%	生活污水工业废水
山东荣成市人工湿地	[10]	表面流	72.5%	63.8%	73.9%	45.1%*	30.2%	生活污水工业废水

注:带\*的数值为氨氮去除效率

表5 人工湿地进出水水质比较  
Tab. 5 Comparison of Water Quality of Influent and Effluent for Constructed Wetlands

工程	参考文献	BOD <sub>5</sub> /(mg·L <sup>-1</sup> )		COD <sub>Cr</sub> /(mg·L <sup>-1</sup> )		SS/(mg·L <sup>-1</sup> )		TN/(mg·L <sup>-1</sup> )		TP/(mg·L <sup>-1</sup> )	
		进水	出水	进水	出水	进水	出水	进水	出水	进水	出水
白泥坑人工湿地	[6]	71.2	7.1	140.0	10.7	99.4	11.8	/	/	/	/
深圳石岩人工湿地	[7]	122.3	6.7	214.9	25.2	32.8	14.1	18.4	9.8	3.9	0.2
某住宅小区人工湿地	[8]	126.8	9.4	255.7	21.9	67.0	7.5	57.7	16.8	6.6	0.4
北京昌平人工湿地	[9]	125.0	17.8	547.0	103.0	275.0	17.0	14.4	5.1	0.9	0.4
山东荣成市人工湿地	[10]	82.6	22.7	248.3	90.0	105.6	27.6	20.4*	11.2*	2.9	2.0

注:带\*的数值为氨氮值

## 2 存在的问题及对策

### 2.1 堵塞问题及解决对策

堵塞是人工湿地存在的普遍问题,美国环境保护署(EPA)对 100 多个正在运行的人工湿地进行调查,其中,50%的人工湿地在投产后 5 年内存在堵塞问题<sup>[11]</sup>,堵塞后人工湿地会存在绕流甚至短流现象,影响污水的停留时间,导致出水水质不达标;另

外,污水长期淤积在人工湿地表面,阻隔了氧气向湿地深层扩散,不仅降低了污染物的去除率,同时还会导致污水恶臭、滋生蚊虫。针对上述问题,提出以下几点建议。

#### 2.1.1 预处理

预处理是解决人工湿地堵塞问题的重要手段,可有效降低人工湿地中有机负荷和悬浮物,还能提

高污水的可生化性,减少后续处理单位的负荷。常见的预处理措施有沉砂池、粗细格栅、沉淀池、化粪池、除油池等。目前,很多学者研究了生物法与人工湿地的组合工艺,包括人工快速渗滤系统(CRI)<sup>[12]</sup>、SBR<sup>[13]</sup>、生物絮凝<sup>[14]</sup>、浮化生物床<sup>[15]</sup>、厌氧池<sup>[16]</sup>及生物接触氧化<sup>[17]</sup>等,研究发现经过这些预处理措施可以有效预防人工湿地堵塞的发生。

### 2.1.2 增加污水中的溶解氧

溶解氧使基质保持在好氧状态,可提高微生物的活性,也可有效防止堵塞。提高基质中溶解氧的方法有干湿交替布水、曝气等。干湿交替的方式有间歇式进水和停床轮休,在有水的时候可以使基质保持好氧的状态,促进微生物的代谢;在系统落干期间,由于微生物得不到污水中有机物持续供给,微生物进入了内源呼吸期,分解胞外聚合物,防止聚合物蓄积。李怀正等<sup>[18]</sup>研究干湿交替的轮休措施对人工湿地堵塞程度的影响,结果表明,轮休措施能有效改善人工湿地的堵塞问题,主要表现在采取措施以后单位基质中不可滤物质的含量较之前降低。张伟进<sup>[19]</sup>研究表明,曝气湿地基质的孔隙率比未曝气基质的孔隙率大很多,孔隙率的大小与曝气时长成正比。此外,还有其他复氧方式<sup>[20]</sup>,如跌水曝气、喷淋曝气、自然导气等。

### 2.1.3 选择合适的填料

填料的粒径、级配及种类对人工湿地的堵塞有一定的影响。莫凤鸾等<sup>[21]</sup>将湿地中小粒径的砂子改为大粒径的碎石后,成功解决了人工湿地的堵塞问题;Zhao等<sup>[22]</sup>研究表明,反级配的人工湿地能有效防止人工湿地的堵塞;詹德昊<sup>[23]</sup>认为,有机质主要积累在基质表层及上层,通过定期更换湿地填料可有效防止湿地堵塞;成都市西区污水处理厂提标工程通过科学计算除磷填料的数量,可保证整体填料在不堵塞情况下的使用寿命(10~50年均可)。因此,是否采用合理的级配以及是否定期更换表层填料关系到人工湿地是否容易堵塞。

### 2.1.4 选择合适的湿地植物

研究表明,约73%的人工湿地孔隙堵塞源于地上植物残体造成的有机物的积累<sup>[14]</sup>,约27%的孔隙堵塞由湿地植物的地下茎和根部造成。深圳石岩河人工湿地采用纸莎草作为湿地植物<sup>[24]</sup>,纸莎草由于茎秆柔软,叶与基质表面长期接触,腐烂后在其周围

形成大面积的板结,导致人工湿地系统的堵塞。因此,选择残留物中难降解化合物水平较低、分泌物易降解、根性富氧能力强湿地植物,并注意合理密植、控制生长速度、定期收割减少植物残留,就可以有效防止孔隙堵塞。国内常用的植物有芦苇、美人蕉、香蒲、风车草、菖蒲、茭白等<sup>[25]</sup>。

### 2.1.5 投加蚯蚓

引入蚯蚓可缓解人工湿地的堵塞,同时增加人工湿地系统的生物多样性,延长食物链,提高净水能力,降低污染负荷,优化的蚯蚓人工湿地能依靠蚯蚓、植物、基质、微生物的联合作用实现污水的高效净化<sup>[26-27]</sup>。

## 2.2 易受季节性影响及解决对策

在设计建造新的人工湿地之前,应对其周围的人工湿地进行充分调研,分析调研结果,因地制宜。合适的植物配置及工程措施对人工湿地的稳定运行、对抗外界环境影响等方面具有重要的影响。

### 2.2.1 选择本土植物

山东荣成市人工湿地<sup>[10]</sup>、邓北桥人工湿地在运行期间,氨氮和TP的去除效果表现出明显的季节变化,其中,氨氮去除呈现夏季高、冬季低的现象,可能是冬季气温低,人工湿地中微生物活性低,代谢不旺盛导致。Michael等<sup>[28]</sup>建议,改进选择植物的标准,尽量选择原生植被,提高植物对当地气候和环境的适应能力。刘曦等<sup>[29]</sup>研究表明在云南大理邓北桥附近建造人工湿地时优先考虑荷花、梭鱼草、芦苇、风车草等。Lin等<sup>[30]</sup>建议在广东省建造人工湿地,优先考虑潜水植物。

### 2.2.2 选择有后续利用价值的植物

在秋季,大量的人工湿地植物收获,如果处理不当,容易造成污染物质的二次释放<sup>[31]</sup>,成为地表水和地下水的污染源。Lin等<sup>[32]</sup>针对秋季人工湿地植物大量收割,处理不当造成污染问题提出解决方法,即利用收获的人工湿地植物秸秆生产燃料乙醇,研究表明,芦苇是一种理想的生产乙醇的生物物质能源,其在同步糖化发酵120h后,乙醇的产率和含量较高,分别为104.84%和34.89%。在夏季,湿地很难维持正常的运行状态,亚热带地区绿狐尾藻湿地系统对养猪废水具有很好的处理效果,对TN、TP、氨氮和COD<sub>Cr</sub>的平均去除率可达90%<sup>[33]</sup>。



### 2.2.3 采取工程措施

在冬季,通过补充碳源,水平潜流人工湿地对 TN 的去除率为 76.01%<sup>[34]</sup>,垂直流人工湿地及水平潜流人工湿地对 TN 的去除率达 71%;成都市西区污水处理厂提标工程考虑到运行初期及冬季、植物长势不好,在湿地前加入多种协调菌,如高效脱氮菌、固磷菌等,待植株长大后整个生态系统形成且具有良好的去除氮、磷、有机物的功能时,不再添加生物菌种。因此,可通过定期收割人工湿地植物、选择适合当地气候的本土植物或通过投加协调菌的方法来缓解季节变化对污水处理效果的影响。

### 2.3 脱氮除磷效果不稳定及解决对策

人工湿地对 SS、COD<sub>Cr</sub>、BOD<sub>5</sub> 及细菌的去除率可达 90% 以上,但氮、磷的去除率接近 50%,为 60%~86%<sup>[12,15]</sup>,针对这一问题,国内外专家提出了一些解决方法。钟乐等<sup>[35]</sup>采用电解的方法强化处理低碳氮比的污水,结果显示,电解强化技术对系统 TN、氨氮、TP 的去除率有明显提高,分别可达 82.10%、88.30%、87.74%;王皓等<sup>[36]</sup>采用电解强化—三级串联潜流人工湿地的组合工艺处理农村生活污水,接种污泥来自合肥市望塘城市污水处理厂,每一级人工湿地都是由钢化玻璃构成,钢化玻璃后接出水池,钢化玻璃尺寸为  $L \times W \times H = 1\ 500\ \text{mm} \times 540\ \text{mm} \times 248\ \text{mm}$ ,一级基质以沸石为主,二级、三级基质以废砖为主,在一级、二级装置中安装电解装置并为其提供恒定电流,选用美人蕉和芦苇等植物,待植物成活后开始试验,装置稳定运行 17 个月以后,取水样测定,结果表明,水力负荷为  $0.3\ \text{m}^3 / (\text{m}^3 \cdot \text{d})$  时,系统对 TP、TN、氨氮的去除率分别可达 93.13%、92.22%、95.22%,此时填料的沉淀和吸附作用对磷的贡献率在 70% 左右,出水水质可达《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)一级 A 标准。因此,氮、磷去除效果不理想时,可考虑应用电解强化工艺。此外,不同种类的潜水植物对营养物质的去除效率也不同<sup>[37]</sup>,根据进出水水质要求,合理地选择湿地植物,对水质的净化效果尤为重要。

### 2.4 占地面积大及解决对策

崔理华提出了一种复合人工湿地,污水经处理后,各项指标均能达到一级 A 标准,同时可减少占地面积。何强等<sup>[38]</sup>提出序批式深床人工湿地,湿地系统总用地为  $1.87\ \text{m}^2 / \text{m}^3$  污水;成都市西区污水处

理厂提标工程采用下流式预埋微生物垂直流人工湿地占地少,用地仅为  $1 \sim 1.5\ \text{m}^2 / \text{m}^3$  污水,与传统二级处理工艺相比,湿地面积大大减小。以贵阳综保区都溪河片区人工湿地为例,设计规模同为  $10\ 000\ \text{m}^3 / \text{d}$ ,如果采用表流人工湿地,占地面积约 10 万  $\text{m}^2$ ;如果采用潜流人工湿地,占地面积约为 2 万  $\text{m}^2$ ;如果采用复合型潜流人工湿地,占地面积仅为 1.25 万  $\text{m}^2$ 。与传统的表流人工湿地相比,复合人工湿地及垂直流人工湿地更有利于湿地面积的减小。

### 2.5 数据库匮乏及解决对策

自 2009 年起,国家及部分相关部门针对人工湿地颁布了一系列的法律法规,主要是用于人工湿地的水力负荷、污染物负荷及人工湿地构筑物设计方面,由于颁布的部门不一样,各规范中对这 3 个参数的规定也有很大差异。此外,不同性质的污水、不同水力负荷和污染负荷的取值、湿地面积的计算结果不同,不能一概而论,且实际设计运行经验缺乏。针对上述问题,张翔等<sup>[39]</sup>对环保部规范、住建部导则以及各地关于人工湿地的规范进行了对比研究,建议统计各地区典型潜流人工湿地的实际运行数据,经过对比分析,得出每个区域最适合的参数,归纳运行及设计经验,制定出一些设计参数、取值规范、运行管理方案等,为后期人工湿地的建造提供依据。

### 3 结语

综上,尽管人工湿地运行除了受植物、微生物、基质等构成要素影响外,还受季节、气候、水质等外在环境因素的影响,显现出极强的非可控性及复杂性,但人工湿地是一种新型生态污水处理技术,具有传统二级处理工艺不可替代的优势,如造价低、投资少、出水水质好、能与其他工艺组合处理各种废水,自身本身就是一个小型的水生态景观系统,有独特的绿化功能。相对于人工湿地在污水修复方面的诸多优势和潜力,人工湿地运行易受外环境影响等问题都是次要的,并且这些问题可以通过不同的人工湿地组合工艺、优化的人工湿地处理结构、合理配置湿地植物、专业的维护与管理、专性菌种的放置、机理研究的深入、数据库的完善等来解决。因此,人工湿地在我国有广阔的应用前景。

### 参考文献

[1] 阳承胜,蓝崇钰,束文圣.宽叶香蒲人工湿地对铅/锌矿废

- 水净化效能的研究[J]. 深圳大学学报, 2000(z1): 51-57.
- [ 2 ] 籍国东, 孙铁珩, 常士俊, 等. 人工潜流湿地处理稠油采出水的实验研究[J]. 环境科学学报, 2001(5): 619-621.
- [ 3 ] SANSANAYUTH P, PHADUNGCHER A, NGAMMONTHA S, et al. Shrimp pond effluent: Pollution problems and treatment by constructed wetlands[J]. Water Science and Technology, 1996, 34(11): 93-98.
- [ 4 ] NIVALA J, HOOS M B, CROSS C, et al. Treatment of landfill leachate using an aerated, horizontal subsurface-flow constructed wetland[J]. Science of the Total Environment, 2007, 380(1-3): 19-27. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2006.12.030.
- [ 5 ] 凌子微, 仝欣楠, 李亚红, 等. 处理低污染水的复合人工湿地脱氮过程[J]. 环境科学研究, 2013, 26(3): 320-325.
- [ 6 ] 陈韞真, 叶纪良. 深圳白泥坑、雁田人工湿地污水处理场[J]. 电力环境保护, 1996(1): 47-51.
- [ 7 ] 刘春常, 夏汉平, 简曙光, 等. 人工湿地处理生活污水研究——以深圳石岩河人工湿地为例[J]. 生态环境, 2005(4): 536-539.
- [ 8 ] 岳春雷, 常杰, 葛滢, 等. 利用复合垂直流人工湿地处理生活污水[J]. 中国给水排水, 2003(7): 84-85.
- [ 9 ] 李羚. 人工湿地处理污水技术及其在我国的应用现状和对策[J]. 现代城市研究, 2004(12): 33-39.
- [ 10 ] 宋志文, 王仁卿, 席俊秀, 等. 荣成人工湿地净化效果的季节和年际变化[J]. 农村生态环境, 2005(4): 43-48.
- [ 11 ] United States Environmental Protection Agency. Constructed wetlands treatment of municipal wastewaters manual [EB/OL]. (2011-08-24) [2021-06-29]. [https://cfpub.epa.gov/si/si\\_public\\_record\\_report.cfm?Lab=NRMRL&dirEntryId=64144](https://cfpub.epa.gov/si/si_public_record_report.cfm?Lab=NRMRL&dirEntryId=64144).
- [ 12 ] 武彦生, 高红武. 利用 CRI 作为人工湿地预处理措施的工艺研究[J]. 环境工程, 2012(2): 90-92.
- [ 13 ] 何强, 梁建军, 柴宏祥, 等. SBR 与人工湿地组合工艺处理生活污水的试验研究[J]. 建设科技, 2008(14): 16-20.
- [ 14 ] 周兴伟, 张勤. “生物絮凝+三级人工湿地”组合工艺处理小城镇高质量浓度生活污水[J]. 市政技术, 2008(6): 517-519.
- [ 15 ] 袁英兰, 常文越, 张帆, 等. 浮动生化床预处理工艺在人工湿地系统中的应用[J]. 环境保护科学, 2006(3): 16-18.
- [ 16 ] CHEN J, YAO J, BAI Y L, et al. Rural domestic wastewater treatment through anaerobism and artificial wetland [J]. Agricultural Science & Technology-Hunan. 2009, 10(5): 158-161.
- [ 17 ] 王磊, 李文朝, 柯凡, 等. 低氧接触氧化/微曝气人工湿地工艺净化污染河水[J]. 中国给水排水, 2008, 24(5): 22-26.
- [ 18 ] 李怀正, 叶建锋, 徐祖信. 轮休措施对堵塞型垂直潜流人工湿地的影响[J]. 环境科学学报, 2008(8): 1555-1560.
- [ 19 ] 张伟进. 湿地内部曝气对出水水质改善及堵塞防治研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2011.
- [ 20 ] 张之崑, 雷中方. 土壤渗滤法工艺运行中的主要问题及其缓解方案[J]. 环境科学与管理, 2006(5): 41-43.
- [ 21 ] 莫凤鸾, 王平, 李淑兰, 等. 人工湿地系统的维护[J]. 云南环境科学, 2004(s1): 5-8.
- [ 22 ] ZHAO Y Q, SUN G, ALLEN S J. Anti-sized reed bed system for animal wastewater treatment: A comparative study [J]. Water Research, 2004, 38(12): 2907-2917.
- [ 23 ] 詹德昊. 复合垂直流构建湿地长期安全运行机理与对策研究[D]. 武汉: 中国科学院, 2003.
- [ 24 ] 刘春常, 夏汉平, 简曙光, 等. 人工湿地处理生活污水研究——以深圳石岩河人工湿地为例[J]. 生态环境, 2005(4): 536-539.
- [ 25 ] 孙文杰, 余宗莲, 关艳艳, 等. 垂直流人工湿地净化污水的研究进展[J]. 安全与环境工程, 2011(1): 25-28, 44.
- [ 26 ] 王国芳, 金秋, 李先宁. 蚯蚓改善垂直潜流人工湿地处理农村污水效能的研究[J]. 中国给水排水, 2009, 25(23): 10-14.
- [ 27 ] 徐德福, 李映雪, 方华, 等. 蚯蚓对人工湿地系统优化分析[J]. 南京信息工程大学学报(自然科学版), 2010, 2(3): 242-247.
- [ 28 ] MICHAEL A, BRADEN I, SVENSON S, et al. Employing constructed wetlands to sustainably manage nutrient-bearing water: A review with an emphasis on soil behavior and effluent nutrient reduction [J]. Journal of Geoscience and Environment Protection, 2020, 8(9): 2327-4336.
- [ 29 ] 刘曦, 赵亚芳, 张小玲, 等. 2012 年洱海地区邓北桥人工湿地和永安江生态护岸植物群落多样性[J]. 湿地科学, 2018, 16(1): 45-50.
- [ 30 ] LIN X, QUN Z, GUIFENG W, et al. Case study of baiyun and caohai lakes implies how to implement wetland restoration/creation [J]. Open Access Library Journal, 2018, 5(10): 2333-9705.
- [ 31 ] RONGOEI P J K, KARIUKI S T. Implications of papyrus (*Cyperus papyrus* L.) biomass harvesting on nutrient regulation in nyando floodplain wetland, Lake Victoria, Kenya [J]. Open Journal of Ecology, 2019, 9(10): 443-457.
- [ 32 ] LIN Y, ZHAO Y F, RUAN X Y, et al. The potential of constructed wetland plants for bioethanol production [J]. Bioenergy Research, 2020, 13: 43 - 49. DOI: 10.1007/s12155-019-10065-y.
- [ 33 ] 王丽莎, 李希, 李裕元, 等. 亚热带丘陵区绿狐尾藻人工湿地处理养猪废水氮磷去向[J]. 环境科学, 2020, 42(3): 1433-1442.
- [ 34 ] 廖雪珂, 严晗璐, 王智源, 等. 低温季节水平潜流和垂直潜流人工湿地尾水深度处理中试[J]. 环境科学, 2020, 41(12): 5509-5517.
- [ 35 ] 钟乐, 夏磊, 丁杰. 电解强化人工湿地处理低碳氮比污水的



- 效能及机制[J]. 环境科学学报, 2020, 40(10): 3590-3597.
- [36] 王皓, 钱琪卉, 丁瑞睿, 等. 电解强化人工湿地对农村生活污水中氮磷的去除性能[J]. 环境工程学报, 2021(3): 1-10.
- [37] YAO Z Q, SONG B, LI Z, et al. Effects of submerged plants on the growth of eutrophic algae and nutrient removal in constructed wetlands[J]. Open Access Library Journal, 2016, 3(10): 2333-9705.
- [38] 何强, 龙熙, 周健, 等. 序批式深床人工湿地处理效能分析[J]. 重庆大学学报, 2011, 34(11): 148-154.
- [39] 张翔, 李子富, 周晓琴, 等. 我国人工湿地标准中潜流湿地设计分析[J]. 中国给水排水, 2020, 36(18): 24-31.

## (上接第 29 页)

- [19] WANG J, XU W H, CHEN L, et al. Excellent fluoride removal performance by CeO<sub>2</sub>-ZrO<sub>2</sub> nanocages in water environment[J]. Chemical Engineering Journal, 2013, 231: 198-205. DOI: 10.1016/j.cej.2013.07.022.
- [20] TEIXEIRA M A, MAGESTE A B, DIAS A, et al. Layered double hydroxides for remediation of industrial wastewater containing manganese and fluoride [J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 171: 275-284. DOI: 10.1016/j.jclepro.2017.10.010.
- [21] ZHANG Z J, TAN Y, ZHONG M F. Defluorination of wastewater by calcium chloride modified natural zeolite[J]. Desalination, 2011, 276(1): 246-252. DOI: 10.1016/j.desal.2011.03.057.
- [22] 彭明国, 封红旗, 李志宏, 等. 羟基钙改性膨润土吸附处理含氟废水[J]. 中国给水排水, 2016, 32(21): 90-95.
- [23] YIN H B, KONG M, TANG W Y. Removal of fluoride from contaminated water using natural calcium-rich attapulgite as a low-cost adsorbent[J]. Water, Air, & Soil Pollution, 2015, 226(12): 1-11. DOI: 10.1007/s11270-015-2691-0.
- [24] 卢承龙, 苟晓琴, 韩海生, 等. 天然铝硅酸盐矿物对氟离子的吸附性能研究[J]. 矿产保护与利用, 2020, 40(1): 28-36.
- [25] 郭正景, 简文荣, 卢致明, 等. 活化型硅藻土处理含砷氟工业废水应用研究[J]. 云南冶金, 2019, 48(4): 102-105.
- [26] 王恩文, 郭振华, 雷绍民, 等. 高氟选矿废水的吸附净化技术研究[J]. 矿业研究与开发, 2015, 35(10): 71-74.
- [27] LÜ J F, ZHENG Y X, TONG X, et al. Clean utilization of waste rocks as a novel adsorbent to treat the beneficiation wastewater containing arsenic and fluorine [J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 293(4): 126160. DOI: 10.1016/J.JCLEPRO.2021.126160.
- [28] 陈乐. 煤矸石合成 NaA 沸石及对模拟含氟、含磷废水的吸附性能研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古师范大学, 2020.
- [29] EPSHTEIN A, NIR O, MONAT L, et al. Treatment of acidic wastewater via fluoride ions removal by SiO<sub>2</sub> particles followed by phosphate ions recovery using flow-electrode capacitive deionization[J]. Chemical Engineering Journal, 2020, 400: 125892. DOI: 10.1016/j.cej.2020.125892.
- [30] 程伟玉, 高宇, 张军生, 等. 改性煤渣对含氟废水吸附性能的研究[J]. 山东化工, 2017, 46(11): 181-184.
- [31] 李娟, 刘新春, 余志晟, 等. 煤渣吸附水中氟和砷的研究[J]. 中国科学院大学学报, 2014, 31(4): 471-476.
- [32] 马淞江, 罗道成. 赤泥负载铈吸附剂对废水中氟的吸附性能研究[J]. 水处理技术, 2013, 39(1): 50-54.
- [33] 邹瑜. 钨冶炼渣净化钨冶炼废水新工艺及机理研究[D]. 赣州: 江西理工大学, 2018.
- [34] ISLAM M, PATEL R. Thermal activation of basic oxygen furnace slag and evaluation of its fluoride removal efficiency [J]. Chemical Engineering Journal, 2011, 169(1): 68-77. DOI: 10.1016/j.cej.2011.02.054.
- [35] WANG K T, LEI H Y, MUHAMMAD Y, et al. Controlled preparation of cerium oxide loaded slag-based geopolymer microspheres (CeO<sub>2</sub>@SGMs) for the adsorptive removal and solidification of F from acidic waste-water [J]. Journal of Hazardous Materials, 2020, 400: 123199. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2020.123199.
- [36] 沈小娃. 骨炭去除低浓度含氟废水的实验研究[D]. 赣州: 江西理工大学, 2011.
- [37] ZHANG X Q, QI Y L, CHEN Z H, et al. Evaluation of fluoride and cadmium adsorption modification of corn stalk by aluminum trichloride[J]. Applied Surface Science, 2021, 543: 148727. DOI: 10.1016/J.APSUSC.2020.148727.
- [38] 邓慧, 廖学品. 胶原纤维负载钨(IV)吸附剂的制备及其吸附水中氟离子的研究[J]. 工业用水与废水, 2011, 42(6): 67-70.
- [39] 刘咏, 刘娅, 任越琳, 等. 金属离子改性腐植酸钠吸附剂的制备及其除氟性能[J]. 中国环境科学, 2014, 34(4): 942-950.
- [40] WU L P, LIN X Y, ZHOU X B, et al. Removal of uranium and fluorine from wastewater by double-functional microsphere adsorbent of SA/CMC loaded with calcium and aluminum[J]. Applied Surface Science, 2016, 384: 466-479. DOI: 10.1016/j.apsusc.2016.05.056.
- [41] 薛志伟. 活性氧化铝在工业循环外排水除氟中的应用[J]. 化工设计通讯, 2020, 46(6): 258, 275.
- [42] 何嵩德, 吉青青, 黄光华, 等. 超磁分离+吸附法除高浓度含氟废水试验研究[C]. 北京: 《环境工程》2019年全国学术年会论文集, 2019.