

# 人工湿地深度净化污水处理厂尾水的应用研究

## ——以济宁市“污水处理厂+人工湿地”治污模式为例

王卫星 张珊

山东省济宁生态环境监测中心

**摘要:**当前大部分城镇污水处理厂排放尾水与《地表水环境质量标准》(GB3838-2002)中Ⅲ类水质标准相差甚远,即使污水处理厂尾水达标排放,进入河段和湖区依然是污染源。“污水处理厂+人工湿地”治污模式,是消除污水处理厂外排水一级A和地表水Ⅲ类水之间的差距,解决污水处理厂达标排放仍是“污染源”困境的有效技术手段。本文深入研究探讨人工湿地技术在污水处理厂尾水深度净化处理的工艺、设计、参数、效果、运行维护等技术性要点,并以济宁市“污水处理厂+人工湿地”治污模式进行案例分析,为人工湿地设计建设及运行维护提供参考。

**关键词:**人工湿地;城镇污水处理厂;尾水处理

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2023.05.113

### 引言

目前,我国大多数城镇污水处理厂设计排放标准为一级A标准和B标准,与《地表水环境质量标准》相差甚远<sup>[1]</sup>。虽然各种水处理技术不断发展,如活性污泥法、生物膜法等技术,但建设运行成本高、工艺复杂,推广高能低耗的污水处理技术是当前重要任务。人工湿地在污水处理领域具有巨大的潜力,该技术具有工艺设备简单、能耗低、维护和运行成本低、净化效果好、生态功能丰富等优点,适合在污水处理厂、旅游区和广大农村地区广泛推广应用<sup>[2]</sup>。

### 一、人工湿地概述

人工湿地是通过建立生态系统,利用基质、湿地植

物和微生物对污染物质的吸附、吸收或降解,使水得到净化的处理技术。目前国内外人工湿地类型多种多样,各具有优缺点。湿地植物的选择、基质种类和结构设计对人工湿地污水处理效果有着直接影响。

#### (一)人工湿地类型

##### (1)表面流人工湿地

也称为水面湿地系统,具有池体构造,且进水口和出水口明确、污水在基质层表面以上从进水端水平流向出水端的人工湿地。该类型水位较浅,一般在0.1-0.9m,是和自然湿地最为接近的类型。

##### (2)潜流型人工湿地

也被称为渗滤人工湿地,包括水平潜流人工湿地和垂直潜流人工湿地。水平潜流人工湿地是指污水在基质层表面以下水平流出的人工湿地,垂直潜流人工湿地是指污水垂直通过池体中基质层的人工湿地。该类型具有充分利用基质截留作用、基质表面形成的生物膜和植物根系的吸收降解作用,提高污水处理能力,另一方面污水从地表下流动,保温性好,受气温影响小,污水净化能力好,是目前应用更为广泛的类型。

##### (3)复合型人工湿地

复合型人工湿地指由表流人工湿地和潜流人工湿地或其他附属工艺(如稳定塘)组合而成的复合型人工湿地。利用不同类型的工艺优化组合,发挥各种工艺治理技术优势,形成高效的绿色生态污水处理系统,达到高效去除污染物的目的。

#### (二)人工湿地植物

表1 各类人工湿地的优缺点比较<sup>[3]</sup>

人工湿地类型	优点	缺点
表面流人工湿地	投资较低,对有机质、悬浮物处理效果较好	易受天气、温度影响,对营养盐处理效果一般
水平潜流人工湿地	能承受较大水力负荷、处理效果较好	对各类营养盐处理效果一般,建设成本高,容易发生基质堵塞
垂直潜流人工湿地	进水形式多样、受天气温度影响小、对营养盐处理效果较好	对有机质处理效果一般,建设成本较大,容易发生基质堵塞

人工湿地植物筛选遵循4个原则:1)植物适应性原则。选择考虑抗逆性强、生物量大、净化能力强、生长周期长的植物。2)景观性原则。从群落布置、合理布局和景观美学等方面对植物进行配置,与周围环境景观融合一致。3)多样性原则。选择多种植物组合去污,可提高湿地系统的处理性能,通常系统越复杂处理效果越稳定。4)多用途原则。湿地植物回收资源化利用可以减少二次污染,还可产生经济效益。

人工湿地植物分为水生、湿生和陆生三大类型。水

生类型包括挺水植物如芦苇、莲、香蒲等;浮水植物如凤眼莲、浮萍等;浮叶植物如睡莲、菱等;沉水植物如狐尾藻、金鱼藻等。湿生类型包括湿生草本植物如龟背竹、姜花等;湿生木本植物如水杉、水松等。陆生类型包括陆生草本植物如雏菊、金鱼草等;陆生木本植物包括夹竹桃、木槿等。根据人工湿地类型对植物配置方式也不同,对于水位相对较深的表面流人工湿地,通常配置耐深水的水生和湿生植物,对于水位相对较浅的潜流型人工湿地,通常配置为不耐深水的部分挺水植物、湿

生和陆生植物类型<sup>[4]</sup>。

### (三) 人工湿地基质

基质又被称为填料,科学的选配基质是建设高效人工湿地的重要条之一。将不同粒径的基质材料按一定厚度铺成人工湿地床体,供植物生长和微生物附着,同时具有过滤、沉淀、吸附和絮凝作用,有效去除水体中的悬浮物、氮、磷等污染物,还为植物和微生物生长和氧气传输提供必要条件。

基质一般选择孔隙率高、质轻、容量小、松散、比表面积大、化学稳定性好、无毒无害、吸附能力强的材料。人工湿地基质用量较大,选择基质时,还应当考虑材料是否价廉、高效、易得并且安全。基质包括天然材料如沸石、石灰石、白云石等,工业副产品如煤渣、矿渣、粉煤灰等,人造产品如活性炭、陶粒、膨胀蛭石等。

但基质及其容易发生堵塞,会明显降低人工湿地污水污染物处理效果。大量实际案例运行过程中,基质堵塞是最为突出的技术难题。为预防基质堵塞,要定期预防性检验维修,加强预处理措施,去除污水中的悬浮物和漂浮物,减少湿地中的沉积。合理设计基质配比,选择合适的基质材质和粒径,既要满足人工湿地基质床的渗透系数,又要充分发挥基质本身的去污能力,在保证净化效果与防止堵塞之间找到最为合适的平衡点<sup>[5]</sup>。

### (四) 人工湿地结构设计

人工湿地的运行有多种组合方式,一般有单一式、串联式、并联式和综合式等。潜流型人工湿地如采用多个单元时,单元面积最好在 $800\text{m}^2$ 以内,采用并联式运行时,每个单元面积应平均分布,以确保配水均匀。

人工湿地运行方式包括推流式、回流式、阶梯进水式和综合式四种。回流式可稀释进水的有机物和悬浮物浓度,增加水中溶解氧,也可促进硝化和反硝化作用。阶梯进水式可以避免堵塞,使植物长势均匀,有利于硝化脱氮作用。综合式一方面设置出水回流,另一方面又将进水分布至基质床的中部,可以减轻基质床前端的负荷。

人工湿地建设时,应对湿地底部和侧部60cm厚度范围进行渗透性测定,原有土层渗透系数大于 $10^{-8}\text{m/s}$ 时,应做防渗处理。一般采用水泥砂浆或混凝土防渗、塑料薄膜防渗和黏土防渗。采用塑料薄膜防渗时薄膜厚度宜大于1.0mm,两边衬垫土工布,以降低根系和紫外线对薄膜的影响。采用黏土防渗黏土厚度大于60cm,并进行夯实。

为确保人工湿地均匀的集水配水,集配水系统通常采用穿孔管、配水或集水管、配水或集水堰等方式<sup>[6]</sup>。潜流人工湿地通常采用穿孔管集水,设置在末端底层基质层,流速要大于 $0.8\text{m/s}$ ,集水孔口宜斜向下 $45^\circ$ 交错布置,孔口直径大于10mm。

设计潜流型人工湿地时要有一定深度,为湿地植物提供必要的好氧条件促其生长。还应考虑雨季高水位,淹没最大水位应控制在200mm以下,以保证大部分植物

存活并发挥净化功能。

## 二、济宁市“污水处理厂+人工湿地”治污模式案例分析

济宁市位于南四湖流域各入湖河流的下游,环抱南四湖,是南水北调东线一期工程的重要通道城市,国省控断面水质稳定达到地表水Ⅲ类标准是水污染防治工作的生命线和底线。济宁市地表水环境容量小,除汛期外,河道内基本无自然径流,城镇污水处理厂排水对河流和南四湖有最直接影响。近期,济宁市大力推广实施“污水处理厂+人工湿地”治污模式,全市39家规模化污水处理厂下游配建人工湿地。污水处理厂外排水经配建人工湿地净化后,主要指标由一级A提升到地表水三类,每年消减化学需氧量约7600吨、氨氮约2300吨,极大促进了水生态环境改善。

### (一) 济宁经济开发区某中水净化生态湿地

济宁经济开发区某中水净化生态湿地用于处理经开区某污水处理厂尾水,采用潜流人工湿地工艺,湿地出水作为邗鉴公园和润河公园的水景补充水。湿地表面积 $45000\text{m}^2$ ,水力停留时间43.2h。潜流人工湿地尺寸为 $225\text{m}\times 217\text{m}$ ,共16格,并联运行,每个单元尺寸为 $105\text{m}\times 26\text{m}$ ,每个单元分三级运行。一级复合潜流人自下而上各层填料的分布:素土夯实,3:7灰土200mm,防水土工膜(两布一膜 $700\text{g}/\text{m}^2$ )、粗砂100mm、5-12cm碎石500mm、2-4cm火山岩400mm、遮阳网、种植土200mm。一级复合潜流湿地内设置配水系统与导膜系统。二级复合潜流人工湿地自下而上各层填料的分布:素土夯实,3:7灰土200mm,防水土工膜(两布一膜 $700\text{g}/\text{m}^2$ )、粗砂100mm、沉水性纳米仿生微生物载体900mm、表层汇水区240-290mm,二级湿地前端设置曝气增氧系统与导膜系统。其中沉水性纳米仿生微生物载体的比表面积 $>10000\text{m}^2/\text{m}^3$ ,湿地运行正常后在二级湿地投放水生动物。三级复合潜流人工湿地自下而上各层填料的分布:素土夯实,3:7灰土200mm,防水土工膜(两布一膜 $700\text{g}/\text{m}^2$ )、粗砂100mm、5-12cm碎石500mm、2-4cm火山岩400mm、遮阳网、种植土200mm。三级复合潜流湿地内设置自动虹吸集水系统。湿地植物选择吸污纳污能力较强的驯化后香蒲、芦苇、再力花交叉种植,一级湿地每平方米种植密度16棵,三级湿地每平方米种植密度16颗。

该湿地水质净化明显,COD、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 和TP的年平均去除率分别为43%、20%、29%,其中COD处理效率最高。 $\text{NH}_3\text{-N}$ 年平均去除率较低,但是夏季处理效率明显高于秋冬季。1-8月份 $\text{NH}_3\text{-N}$ 进水大于 $1\text{mg}/\text{L}$ ,高于地表水环境质量Ⅲ类水标准,经人工湿地处理后出水达到了Ⅲ类水。

### (二) 嘉祥县某化工产业园人工湿地

嘉祥县某化工产业园人工湿地位于化工产业园新焦满线南侧、薛公岔河西岸,是园区的污水处理配套设施,分人工湿地一期、二期工程建设完成。一期工程占地73亩,设计污水处理量 $10000\text{m}^3/\text{d}$ ,根据建设用地地形,污水处理厂外排水通过引水管道以重力流形式依次

表2 济宁经济开发区某中水净化生态湿地2022年水质监测结果

	COD (mg/L)			NH <sub>3</sub> -N (mg/L)			TP (mg/L)		
	进水	出水	去除率	进水	出水	去除率	进水	出水	去除率
1月	11	7	36%	1.14	0.938	18%	0.07	0.04	43%
2月	11	8	27%	1.08	0.839	22%	0.1	0.06	40%
3月	10	6	40%	1.1	0.97	12%	0.09	0.06	33%
4月	12	7	42%	1.1	0.898	18%	0.1	0.07	30%
5月	12	6	50%	1.08	0.912	16%	0.11	0.08	27%
6月	16	8	50%	1.07	0.671	37%	0.13	0.1	23%
7月	10	5	50%	1.05	0.798	24%	0.16	0.12	25%
8月	15	8	47%	1.142	0.8	30%	0.14	0.11	21%
9月	14	8	43%	0.992	0.722	27%	0.16	0.12	25%
10月	16	9	44%	0.885	0.767	13%	0.15	0.1	33%
11月	17	9	47%	0.809	0.761	6%	0.15	0.12	20%
12月	16	9	44%	0.792	0.64	19%	0.14	0.1	29%

流经潜流湿地人工湿地、表面流人工湿地，处理出水排入下游薛公岔河。分为12个单元格并联运行，设计单元格尺寸为35×60m。二期工程占地约100亩，设计污水处理量20000m<sup>3</sup>/d。湿地采用“潜流人工湿地+表流人工湿地”的工艺对污水处理厂的尾水进行自然净化。污水处理厂排放尾水通过管道输送至湿地处理区，然后经分水井配水后，进入本项目水平潜流人工湿地单元中，潜流湿地出水通过渠道收集，再进入下一级的表面流人工湿地，表面流湿地出水达到出水水质要求，进入薛公岔河。该人工湿地工程以芦苇、香蒲、水葱、菖蒲为主体植物，水平潜流型人工湿地净化植物选用芦苇和水葱，采用单种群落分开种植的方法，人工湿地前段25m种植芦苇，终端后15m种植水葱，后段10m净化植物可选用香蒲和菖蒲，采用单群落，单元间交替种植。

该湿地工程水质净化明显，COD年平均去除率为40%，2-11月份进水COD浓度均高于地表水环境质量Ⅲ类水标准，经人工湿地处理后出水达到了Ⅲ类水标准。1月和12月份去除率较低，考虑冬季温度较低，对COD处理产生一定影响。NH<sub>3</sub>-N去除率不稳定，最高去除率达到约70%，最低只有24%，但年平均去除率44%，高于济宁经济开发区中水净化生态湿地，由此表明复合型人工湿地NH<sub>3</sub>-N处理效果要好于单一潜流型人工湿地。TP年平均去除率32%，其中7月份进水浓度高于地表水环境质量Ⅲ类水标准，经人工湿地处理后出水达到了Ⅲ类水标准。

### (三) 存在问题及对策

人工湿地运行过程中，基质容易发生堵塞，济宁市人工湿地运行过程中也不例外。因基质堵塞，导致缩短污水停留时间，从而无法保证污染物的高效去除，需要定期耙松湿地表面基质以增强通气，严重堵塞的还要更换基质层或进行药物冲洗。另外，随季节变化产生的温度变化导致污染物去除效果不稳定，其中夏季污染物去除率明显高于冬季。冬季气温低，人工湿地中植物生长

表3 嘉祥某化工产业园人工湿地2022年水质监测结果

	COD (mg/L)			NH <sub>3</sub> -N (mg/L)			TP (mg/L)		
	进水	出水	去除率	进水	出水	去除率	进水	出水	去除率
1月	7	5	29%	0.394	0.285	28%	0.051	0.044	14%
2月	26	14	46%	3.75	1.72	54%	0.055	0.051	7%
3月	24	14	42%	0.792	0.453	43%	0.044	0.039	11%
4月	31	17	45%	2.91	0.934	68%	0.147	0.121	18%
5月	25	14	44%	0.733	0.454	38%	0.063	0.038	40%
6月	25	13	48%	3.5	1.474	58%	0.085	0.045	47%
7月	30	8	73%	1.24	0.906	27%	0.241	0.085	65%
8月	22	17	23%	1.36	0.725	47%	0.119	0.046	61%
9月	24	16	33%	0.374	0.285	24%	0.095	0.065	32%
11月	18	11	39%	0.983	0.344	65%	0.08	0.06	25%
12月	16	13	19%	1.297	0.812	37%	0.07	0.05	29%

较慢，微生物活性低，代谢不旺盛导致，可通过定期收割人工湿地植物、选择适当的本土植物或通过投加高效脱氮菌、固磷菌等协调菌来缓解季节变化对污水处理效果的影响。

### 结语

综上，人工湿地使污水处理厂尾水得到了深度净化，可以稳定达到地表水Ⅲ类水质标准，解决了污水处理厂尾水排放仍是“污染源”的难题。利用人工湿地处理城镇污水处理厂尾水，通过选择适宜的组合工艺、合理配置植物选配和填料设计，加强运行维护，采取适当的防堵塞措施和冬季运行保障措施，可有效提高出水稳定性。

### 参考文献

- [1] 孙文章. 北方高效潜流人工湿地技术在污水厂尾水处理中的应用[J]. 工程技术研究, 2021, 6(22): 37-38.
  - [2] 严倩倩, 张智谋. 人工湿地在污水厂尾水深度净化的应用研究[J]. 能源与环境, 2020(6): 90-91.
  - [3] 陈永华. 人工湿地污水处理技术[M]. 科学出版社, 2021.
  - [4] 陈永华, 吴晓芙. 人工湿地植物配置与管理[M]. 中国林业出版社, 2012.
  - [5] 张翔凌. 不同基质对垂直流人工湿地处理效果及堵塞影响研究[D]. 中国科学院研究生院博士学位论文.
  - [6] 付乐, 张世元. 城镇污水处理厂尾水湿地处理工艺研究[J]. 工程技术研究2023, 131(8): 95-98.
  - [7] 李美玉, 李婉, 魏佳明, 邢翔宇, 苏星, 刘志喜, 杨子晴. 人工湿地在污水处理厂尾水水质净化中的应用[J]. 环境生态学, 2022, 4(6): 54-58.
- 作者简介: 王卫星(1972.10-), 性别: 男, 民族: 汉, 籍贯: 山东, 职务/职称: 主任, 学历: 研究生, 单位: 山东省济宁生态环境监测中心, 研究方向: 环境监测、环境政策。