

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2021.22.002

人工湿地类型的选择及案例分析

肖海文, 刘馨瞳, 翟俊, 孟令剑

(重庆大学 三峡库区生态环境教育部重点实验室, 重庆 400045)

摘要: 人工湿地技术在我国污(废)水处理、黑臭水体修复、海绵城市建设、水源地保护等领域的应用日益广泛。确定人工湿地类型是人工湿地工程设计的首要步骤,不但关系到工程占地和相关污染物去除,还直接对工程造价、运行管理费用、生态景观效应等产生影响。总结了近年来国内工程实践中人工湿地的主要类型,分析了因地制宜进行人工湿地类型选择的要点及其对工程设计各方面的影响,并结合重庆市某水源地保护湿地实际工程设计,探讨了人工湿地类型选择中方案比选的思路,以期为我国人工湿地相关工程设计提供一定的借鉴。

关键词: 人工湿地; 污水处理; 生态修复

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2021)22-0011-07

Type Selection of Constructed Wetlands and Related Design Case Analysis

XIAO Hai-wen, LIU Xin-tong, ZHAI Jun, MENG Ling-jian

(Key Laboratory of Three Gorges Reservoir Region's Eco-Environment <Ministry of Education>, Chongqing University, Chongqing 400045, China)

Abstract: The constructed wetland technology has been widely used in the fields of sewage/wastewater treatment, black and odorous water restoration, sponge city construction, and water source protection. Choosing the type of constructed wetland according to local conditions is the first step in the design of constructed wetland, which not only affects the land occupation and related pollutant removal, but also directly affects the project cost, operating cost and ecological landscape effect. This paper summarized the main types of constructed wetlands in recent years, analyzed the selection principles of constructed wetland types and the influence on engineering design. Combined with the engineering design of a water source protection wetland in Chongqing, the idea of comparison and selection of constructed wetland type design schemes was introduced, which could provide some reference for the design of constructed wetland related projects in China.

Key words: constructed wetland; sewage treatment; ecological restoration

近年来,在水环境治理和保护领域,人工湿地技术以其工艺简单、净化效果好、抗冲击负荷能力强、投资运行费用省、极具生态景观效应等优势在我国污(废)水处理、黑臭水体修复、海绵城市建设、城市/农业径流污染控制中应用日益广泛^[1-12]。因地制宜、合理地选择人工湿地类型是人工湿地设计的首要步骤,直接关系到人工湿地的占地面积、水质净化效果、工程投资、运行费用、生态景观效应以及维

护管理难易程度。然而,目前国家及地方人工湿地相关设计规范、手册对不同类型人工湿地的适用条件、选用要点等论述较少,而文献报道的工程案例也多关注于人工湿地的流程布局、污染物净化效果以及填料、植物选择等,鲜有进行人工湿地类型选择的思路介绍以及方案比较实例。笔者回顾了人工湿地的基本类型和特点,总结了近年来国内工程实践中人工湿地的主要类型,分析了在达到相同处理目标

的前提下,类型选择对人工湿地工程设计的重要影响,并结合重庆市某水源地保护工程实例,探讨了人工湿地类型选择时方案比选的思路,分析了不同类型方案对工程占地、高程布置、生态景观效应、运行管理费用的影响,以期为我国人工湿地相关工程设计提供一定的借鉴。

1 人工湿地的类型和应用

1.1 人工湿地的基本类型

国家相关设计规范、手册中按水在湿地内的流动特征,将人工湿地分为表流(FWS)、水平潜流(HSSF)和垂直潜流(VF)3种基本类型,其中垂直潜流又可分为上向流和下向流两种。近年来,在这些流态基本型的基础上出现了一些流态改进型,如垂直上向潜流和下向潜流结合的上下折流人工湿地^[13-14],以及通过“进水-充满-放空-闲置”方式交替运行的垂直流人工湿地(又称潮汐流湿地)^[15]等。

从构造看,FWS人工湿地最接近自然湿地系统,单位面积造价最低,运行没有填料堵塞风险,通常用于污水处理厂尾水处理、雨水径流污染控制、畜牧养殖废水处理等。HSSF人工湿地单位面积造价较FWS系统高,其最大特点在于能最低限度地降低水中病原微生物的暴露,卫生条件好而且适合寒冷天气。另外,如果使用一些特殊吸附性填料,可增强水中磷和重金属的去除。HSSF湿地通常用于生活污水的二级处理、有机工业废水处理等。VF人工湿地单位面积造价最高,布水和集水系统也最复杂,但硝化效果好,主要用于污水二级处理、畜禽养殖粪便污水处理、生物污泥脱水以及垃圾渗滤液处理等。

1.2 复合型人工湿地

如果在一个人工湿地处理流程中出现上述3种基本型的组合,通常称为复合型人工湿地(Hybrid/combined system)。该类型湿地主要是为了强化不同污染物的去除而将不同类型的人工湿地进行组合,如欧洲针对生活污水分散处理研发了经典MPIP人工湿地工艺(Seidel系统)^[16]、多级复合人工湿地系统等^[17]。在复合型人工湿地中通常又会根据设计目标,选择以某一种基本型为主导类型。

1.3 国内常用的人工湿地类型

通过收集分析近年来国内不同废水处理工程中常用的人工湿地类型,可知涉及雨水径流处理的人工湿地以FWS类型为主,这主要由雨水径流的高冲

击负荷、高堵塞风险等决定,但城市径流受占地面积限制通常较农业径流大,因此城市径流通常会加入潜流系统以提高污染物负荷、减小占地^[11]。以水体治理和修复为目的的城市河水净化工程中,湿地类型的选择主要取决于是否受占地限制和对景观的要求,例如建于河滩、占地面积受限的洙水河湿地,采用FWS系统,负荷仅为 $0.03 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ ^[10],而类似进水水质的龙岗河湿地^[2]由于建设场地面积有限,采用VF系统,负荷高达 $3.16 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 。污水处理厂尾水处理通常以废水深度处理和资源化利用为目的,对出水氮磷及有机物浓度要求较高,且在污水厂后的处理流程通常有占地限制^[1-3],因此,以潜流湿地(HSSF或VF)为主。近年来,人工湿地在村、镇等小规模或分散式生活污水处理中多有应用,类型通常以VF为主^[6-8,16-17],这主要因为生活污水中氮、磷及有机物负荷较高。

2 人工湿地类型选择的影响因素

进水水质、水量和处理目标是人工湿地设计的根本依据,同时也是人工湿地类型选择和计算的前提。然而,达到相同的处理目标往往可以有多种不同的类型选择方案,如何从中优选出最佳方案则必须因地制宜地考虑工程项目和建设场址的各项自然、社会、经济特征,具体需要考虑的因素包括场址的占地限制、地形地势、气候条件、进水特征和处理目标、项目的生态景观要求以及对运行管理的难度和费用要求等。

① 占地限制

占地通常是人工湿地应用的一个限制性因素,尤其是在用地紧张的城市化区域,项目场址的占地面积在很多情况下都会受到限制。占地面积通常用人工湿地污染物负荷或水力负荷进行计算和校核。通常认为FWS、HSSF和VF人工湿地的负荷依次增大,具体可见《人工湿地污水处理工程技术规范》(HJ 2005—2010)的负荷参考值。但规范中不同类型湿地负荷取值范围较大,并且没有反映出出水目标值对进水负荷取值的影响,故在设计选用时有一定的局限性。

美国Kadlec等^[18]对全球400多个人工湿地实际工程的运行数据进行了统计,列出了不同类型人工湿地有机负荷与出水浓度的关系(见图1),结果表明FWS和HSSF系统在达到相同处理目标时,有机物去除负荷差异并不明显,一级反应动力学计算

也得出了类似结论。但 VF 系统有机物和氨氮的去除负荷则明显大于其他两类湿地^[18]。

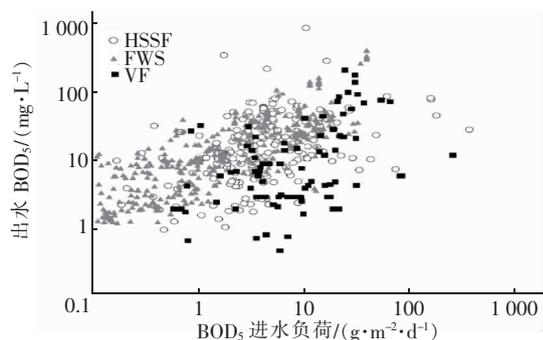


图1 不同类型人工湿地有机负荷与出水目标的关系

Fig. 1 Relationship between organic load and effluent target of different types of constructed wetland

因此,对于场地面积受限的项目,如果进水有机物浓度较高(如生活污水、畜禽养殖污水等),可首选 VF 湿地或以 VF 系统为主的复合人工湿地。对于场地面积限制较小的工程,当进水有机物浓度较低(如农业径流、城市径流、污水厂尾水等)时可优先考虑 FWS 湿地,如前述的洮水河湿地^[10]。事实上,在场地面积受限较小的北美地区,FWS 系统为最主要的湿地类型^[19];而在面积受限较大的欧洲和日本,应用 VF 或以 VF 为主的复合型人工湿地的工程实例则更多^[16-17]。

② 地形地势

人工湿地高程布置应与场地的地形地势一致,以避免额外的能耗提升,而高程布置受限于湿地内的水损。不同类型湿地水力坡度不同,HJ 2005—2010 规范中表流湿地水力坡度 < 0.5%,潜流湿地坡度为 0.5% ~ 1.0%,而且潜流湿地更为复杂的布水和集水系统带来的水头损失也远远高于表流湿地。

受湿地总水损的限制,场地地形平整适合选择 FWS 系统,而选择 HSSF 和 VF 系统则可能不得不采用中途提升泵或增加挖填土方量才能满足高程布置的要求。而且,场地平坦还不利于设置潜流湿地的布水系统和可调水位控制设施。

对于地势落差大的场地,则可充分利用重力势能,在减少挖填方量的情况下设置多级 VF 或 HSSF 系统。由于潜流系统的水损会随进水负荷、堵塞情况及季节气温的变化而变化,利用地势高差设置可调水位控制设施(见图 2)可以灵活地应对这些情

况,尤其是应对运行中 HSSF 和 VF 湿地中的堵塞情况,最大程度地防止潜流湿地表面出现壅水现象,影响处理效果。另外,地势陡的阶梯型地形还可充分利用地势落差设置前置跌水曝气系统,以提高 HSSF 系统的有机物降解和硝化效果。

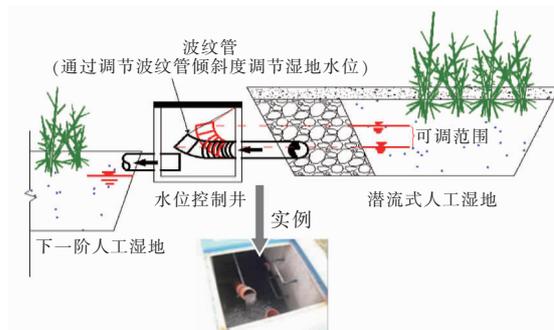


图2 利用地势高差设置水位可调设施

Fig. 2 Adjustable water level facilities setting by the elevation difference

③ 场址气候

气候对人工湿地类型的影响主要表现在是否出现冬季冰冻方面。冬季有持续冰冻的建设场址一般不适合 VF 湿地,这是因为 VF 布水系统易冻结而导致湿地运行失效。而 HSSF 人工湿地却能依靠填料、植物、植物凋落物及积雪等保证 -15 ~ 0 °C 范围内填料下仍有水的流动^[18]。另外,在低于 10 °C 条件下大多数沉水植物和浮水植物生长缓慢或停止生长,因此在北方地区应谨慎选用依靠这些植物作用除污的 FWS 湿地。

④ 特定污染物去除

通常不同工程项目对污染物有不同的去除要求,VF 湿地系统具有良好的好氧条件,氨氮去除效果优于其他两类人工湿地。但由于其反硝化效果较差,因此在总氮去除率上较其他两种湿地优势不明显^[18]。而 HSSF 系统则有良好的硝态氮去除效果,所以,在进水氮浓度高或脱氮要求严格时,通常采用 VF + HSSF 或倒置 VF + HSSF 系统^[3,17-18](见图 3)。

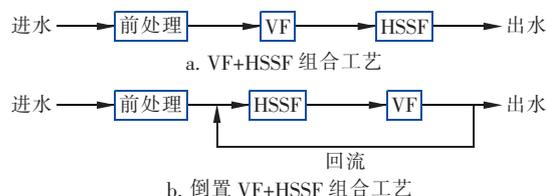


图3 强化脱氮的人工湿地类型组合

Fig. 3 Combination of constructed wetland types with enhanced denitrification

由于磷或重金属主要依靠沉积作用在湿地内去除,因此,对于有除磷或重金属去除要求情况,通常选用有特殊吸附效果填料的 HSSF 或 VF 系统。例如,海蛎壳-废砖块组合填料 HSSF 系统用于养猪废水除磷时,TP 去除率可达 88.41%^[20]。

在进水有机物浓度较低的情况下(如灰水、雨水径流),FWS 系统对病原微生物具有更好的去除效果^[18]。因此,对于出水微生物学指标(如大肠杆菌或总细菌数)要求严格的情况,如果进水有机负荷低,则适合选择 FWS 系统,反之则应选择潜流式 VF 或 HSSF 湿地系统。

⑤ 生态景观要求

近年来,在海绵城市建设、小区中水回用、城市径流污染控制、湿地公园建设等领域,往往会对人工湿地的生态景观提出一些具体要求,限制了湿地类型的选择。例如,以下三种情况一般只能选择 HSSF 系统:a. 出于卫生健康考虑而禁止人体直接接触湿地处理水;b. 严格防止蚊蝇滋生;c. 需要气味控制。

对于进水水质较好、鼓励或以促进生物多样性为目标的湿地设计(如城市湿地公园),则应优选 FWS 系统和以 FWS 为主的复合型人工湿地,因为开阔的水面有利于底栖生物、浮游生物、爬行动物及鱼类等生存并形成更大的湿地生物链(网)。这类具有自由水面的表流湿地系统更趋近于天然湿地,生态景观效应更强。例如,上海东滩湿地公园以堤湖、沼泽、光滩、水涉禽招引区等形式设计的表流湿地系统超过了整个公园面积的 2/3,开阔的水面和重建的乡土植物群落内形成了以浮游生物、螃蟹(人工投放)等底栖动物以及大量鸟类的稳定食物网,吸引了大量野生水禽。目前,该湿地已成为全国著名观鸟区,并成功展开了扬子鳄的引入和放归试验。

⑥ 运行费用

人工湿地的运行费用通常包括电费和人工管理维护费用。电费主要包括提升泵费用(很多人工湿地可实现全程重力流而省去提升电费)以及个别情况下的曝气费。VF 和 HSSF 系统由于水损高,提升能耗高于 FWS 系统。通常只有需要提高负荷的潜流系统会有人工曝气^[21]。人工费主要包括植物收割、前处理清淤、填料堵塞维护、设备管理维护费等。通常认为表流湿地无论是人工收割还是机械收割其费用均高于潜流人工湿地^[18];然而,表流人工湿地

由于堵塞风险低,其前处理清淤以及填料堵塞维护和设备维护费都低于潜流人工湿地;另外,潜流人工湿地的布水与集水系统等控制相对复杂,其设备管理维护费较表面流人工湿地高,其中 VF 系统最高。综合比较,FWS 系统的运行费用及管理难度通常低于潜流系统。

3 案例分析

3.1 工程概况

重庆南湖水源地保护一期工程是典型的针对农业面源污染控制的湖库保护生态工程,人工湿地设计主要针对汇入南湖的李家溪农业径流水质净化。工程设计目标为:①保证输入南湖水库的李家溪径流水质达到地表水Ⅲ类标准,为南湖二级水源地保护区水域功能提供保障;②在李家溪入湖口构建水源地保护可持续生态景观,促进生物多样性恢复。

李家溪汇水流域面积 3.5 km²,人工湿地设计处理水量为旱季 6 000 m³/d,雨季 9 000 m³/d,设计进、出水水质见表 1。

表 1 设计进、出水水质

Tab. 1 Design influent and effluent quality

项 目	李家溪水质			人工湿地设计进、出水水质	
	旱季	雨季	均值	进水	出水*
pH 值	7.08 ~ 7.48	7.14 ~ 7.56	7.40	6 ~ 9	6 ~ 9
浊度/NTU	21 ~ 32	25 ~ 68	33	40	15
COD/ (mg · L ⁻¹)	40 ~ 56	32 ~ 45	51	60	20
TN/ (mg · L ⁻¹)	1.16 ~ 1.67	1.05 ~ 1.52	1.50	2.00	1.00
NH ₃ - N/ (mg · L ⁻¹)	0.65 ~ 1.21	0.55 ~ 1.12	1.01	1.50	1.00
TP/ (mg · L ⁻¹)	0.15 ~ 0.18	0.16 ~ 0.19	0.17	0.20	0.05

注: *出水水质达到《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)中的Ⅲ类标准。

人工湿地建设场址可用面积约 2.9 hm²,位于李家溪入湖口,属于亚热带季风性湿润气候。场址为原有溪口滩涂和废弃鱼塘,由南向北坡向南湖,平均坡度为 0.52%,属于地势落差小的平坦地形。

3.2 人工湿地类型的方案比选

根据进、出水水质和工程设计目的,拟定了两个均能达到处理目标但类型不同的人工湿地方案进行比选,其工艺流程和主要设计参数分别见图 4 和表 2。其中,方案一采用以 FWS 系统为主的湿地类型,

表面流与潜流湿地面积比约为 23 : 1;方案二采用以 VF + HSSF 系统为主的湿地类型,潜流与表面流湿地面积比约 9 : 1。

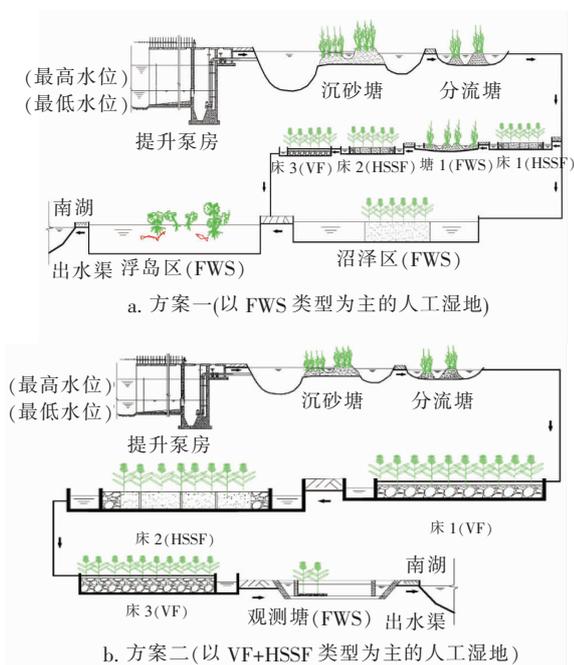


图4 方案一和方案二工艺流程对比

Fig. 4 Comparison of treatment process of scheme 1 and scheme 2

表2 主要技术参数的方案比较

Tab. 2 Comparison of the main technical parameters

项目	方案一	方案二
前处理/m ²	沉砂塘:1 566 分流塘:318	沉砂塘:1 520 分流塘:760
分区面积/ m ²	沼泽区:1 186 床1:320 塘1:325 床2:326 床3:250 浮岛区:18 422	床1:4 256 床2:4 300 床3:2 128 观测区:1 245
水力负荷/ (m ³ · m ⁻² · d ⁻¹)	0.264	0.422
有机负荷/ (kgBOD ₅ · m ⁻² · d ⁻¹)	43.9	70.3
总水损/kPa	13.7	29.2
提升泵	WQ140 - 5, N = 4 kW	WQ140 - 9, N = 7.5 kW
吨水投资/ (元 · m ⁻³)	760	985
运行费用/ (元 · m ⁻³)	0.071	0.106
注: 投资计算中不含征地费,运行费用含系统折旧费。		

由表2可看出,在前处理相同的情况下,不同类型人工湿地设计方案在工程占地、水损和高程布置、吨水投资、能耗及运行费用上差异明显。

潜流人工湿地对提高处理系统负荷、减小占地效果明显,以潜流人工湿地为主的方案二占地比以表流人工湿地为主的方案一降低了近40%。

方案二在其工程吨水投资和运行费用上远高于方案一,主要体现在潜流湿地的填料、布水、集水系统以及为平坦场址满足潜流湿地高水力坡度而产生的挖填方工程量上。在运行费用中,两种方案的人工费基本相当,但方案二由于水损大,吨水电耗远大于方案一,导致其吨水运行费较方案一高出约50%。

表流系统吨水造价普遍低于潜流系统,例如表流型洙水河湿地的吨水投资(1 409 元/m³[10]),远低于以潜流型为主的流溪河湿地[5](3 304 元/m³)和浙江乡镇人工湿地[7](5 125 元/m³)。一般来讲,由于布水能耗和更高的水力坡度,潜流系统吨水运行费用通常也高于表流系统,这与本项目方案比较的结论一致。例如,采用表流系统洙水河和文山人工湿地吨水运行成本分别为0.036[10]和0.011元/m³[12],而采用潜流系统的陕西村镇人工湿地[4]、浙江乡镇人工湿地[7],其吨水运行本分别为0.375、0.905元/m³,潜流湿地运行费用大大高于表流系统。然而值得注意的是,如果建设场址地势变化陡、进水接入标高(如阶梯地势的山地场址),则采用潜流系统可充分利用重力水头,亦可避免多余的提升能耗,使其运行费用与表流系统相差不多。

本项目所在建设场址地势平坦,这给高水损的潜流湿地(方案二)高程布置带来难度。相反对于水头要求小的表流湿地(方案一)则可依原有地势而建,挖填方量导致的工程造价会小很多。

通过两个方案的比较可看出,本项目条件下采用FWS湿地类型为主的系统在造价和运行成本上优势明显。而且,由于没有堵塞风险,也没有复杂的布水和集水系统,FWS湿地的运行管理更加容易。FWS湿地系统更接近自然湿地,裸露的水面可吸引更多鸟类、爬行类、两栖类等生物,非常符合项目甲方对保护生态景观、促进溪口生物多样性恢复的要求。而且,由于场址位于溪口滩涂和废弃鱼塘,用地宽裕,占地并不是项目的限制因素。因此,最终确定采用以FWS人工湿地类型为主的方案一。

3.3 人工湿地运行效果

以 FWS 系统为主的人工湿地于 2013 年正式建成并运行,除雨季 TP 浓度有时超标外,其他各项监测指标均达到设计值(见表 3)。人工湿地对 COD、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、TN、TP 和浊度的去除率分别达到 81%、63%、74%、53% 和 78% 以上,有效地降低了湖水的面源污染输入。

表 3 工程运行效果(2014 年—2015 年)

Tab.3 Engineering operation effect(2014 - 2015)

项 目		进水均值	出水均值	目标水质
雨季 (5月— 8月)	COD/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	42.84	9.02	20
	$\text{NH}_4^+ - \text{N}/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	0.78	0.29	1.00
	TN/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	3.01	0.58	1.0
	TP/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	0.19	0.09	0.05
	浊度/NTU	81.2	11.4	
旱季 (9月— 次年 4月)	COD/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	60.25	9.62	20
	$\text{NH}_4^+ - \text{N}/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	1.21	0.25	1.00
	TN/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	1.95	0.5	1.00
	TP/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	0.09	0.04	0.05
	浊度/NTU	32.5	7.2	

Kadlec 等^[19]统计了实际工程运行的 282 个表流系统和 86 个潜流系统的 TP 去除负荷及其与进、出水浓度的关系。结果表明,出水 TP < 0.1 mg/L 情况下,表流系统对 TP 的去除负荷显著高于潜流湿地系统。因此本案例中雨季 TP 超标与湿地类型选择关系不大,主要是由于汇水区雨季农肥的大量施用使 TP 进水负荷远高于旱季造成的(雨季负荷为旱季的 2.1 倍)。如果能在工程沼泽区添加促进除磷的特殊填料以及增加出水区浮岛面积,应该能对雨季除磷起到很好的强化作用。

4 结语

在人工湿地工程中,因地制宜、合理地选择人工湿地的类型至关重要,不仅关系到工程的占地面积、污染物去除效果,还直接影响到工程的高程布置、造价、运行费用以及生态景观效应。在工程设计时进行湿地类型的方案比选是必要的,尤其是对大型人工湿地工程。需要考虑的因素包括建设场地面积的限制、场址的地形、气候特征、特定污染物的去除要求、甲方需要达到的生态景观效果以及对运行管理的能耗和难易程度的要求等。

参考文献:

[1] 李昆,王玲,李兆华,等. 污水处理厂尾水处理的人工

湿地设计[J]. 农业科学与技术(英文版),2015(3): 568 - 572,582.

LI Kun, WANG Ling, LI Zhaohua, *et al.* Design of constructed wetland for treatment of tailwater from wastewater treatment plant[J]. Agricultural Science & Technology (English Edition),2015(3):568 - 572,582 (in Chinese).

[2] 陈思莉,易皓,魏清伟,等. 河道旁路人工湿地处理系统设计实例[J]. 中国给水排水,2015,31(24):56 - 59.

CHEN Sili, YI Hao, GUO Qingwei, *et al.* Design of river bypass constructed wetland treatment system[J]. China Water & Wastewater,2015,31(24):56 - 59.

[3] 韩万玉,魏俊,赵梦飞,等. 东阳市江滨景观带湿地公园设计案例分析[J]. 中国给水排水,2019,35(4): 20 - 23.

HAN Wanyu, WEI Jun, ZHAO Mengfei, *et al.* Case study on design of constructed wetland park in Jiangbin landscape belt of Dongyang [J]. China Water & Wastewater,2019,35(4):20 - 23(in Chinese).

[4] 潘瑞玲,向衡. 乡镇污水处理中复合人工湿地的设计与应用——以陕南某镇为例[J]. 净水技术,2019(7):125 - 129.

PAN Ruiling, XIANG Heng. Design and application of township sewage treatment by composite constructed wetland system—example of a town in southern Shaanxi [J]. Water Purification Technology, 2019(7): 125 - 129(in Chinese).

[5] 陈思莉,江栋,张英民,等. 人工湿地工艺处理农村生活污水工程实例[J]. 给水排水,2012,38(增刊1): 221 - 223.

CHEN Sili, JIANG Dong, ZHANG Yingmin, *et al.* A Case study of constructing rural domestic sewage by constructed wetland process [J]. Water & Wastewater Engineering,2012,38(S1):221 - 223(in Chinese).

[6] 焦珍,张素珍,胥俊杰. 垂直流人工湿地处理北方农村生活污水工程实例[J]. 江苏农业科学,2011,39(3):545 - 547.

JIAO Zhen, ZHANG Suzhen, XU Junjie. A case study of vertical flow constructed wetland for treating rural domestic sewage in north China[J]. Jiangsu Agricultural Sciences,2011,39(3):545 - 547(in Chinese).

[7] 李欲如,王晓敏,梅荣武. 环境敏感区农村生活污水处理工艺设计案例分析[J]. 能源环境保护,2019,33(4):33 - 36.

LI Yuru, WANG Xiaomin, MEI Rongwu. Case analysis

- of rural domestic sewage treatment process design in environmental sensitive areas[J]. *Energy Environmental Protection*, 2019, 33(4): 33-36 (in Chinese).
- [8] 马国胜,于森,赵昌平,等. 复合生物滤池与人工湿地组合工艺处理农村生活污水工程实例[J]. *现代农业科技*, 2015(3): 216-217.
MA Guosheng, YU Miao, ZHAO Changping, *et al.* Project example of rural sewage treatment by composite biological filter and artificial wetland combined technology [J]. *Modern Agricultural Science and Technology*, 2015(3): 216-217 (in Chinese).
- [9] 卢少勇,张彭义,余刚,等. 人工湿地处理农业径流的研究进展[J]. *生态学报*, 2007, 27(6): 2627-2635.
LU Shaoyong, ZHANG Pengyi, YU Gang, *et al.* Research progress of constructed wetland treating agricultural runoff[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(6): 2627-2635 (in Chinese).
- [10] 满丽. 洙水河滩人工湿地水质净化工程设计[J]. *中国给水排水*, 2017, 33(14): 66-69.
MAN Li. Design of constructed wetland for water purification in Zhushui River benchland [J]. *China Water & Wastewater*, 2017, 33(14): 66-69 (in Chinese).
- [11] 肖海文,柳登发,张盛莉,等. 人工湿地处理雨水径流的设计方法和实例[J]. *中国给水排水*, 2013, 29(8): 37-41.
XIAO Haiwen, LIU Dengfa, ZHANG Shengli, *et al.* Design and case of constructed wetland for stormwater runoff treatment[J]. *China Water & Wastewater*, 2013, 29(8): 37-41 (in Chinese).
- [12] 周越,王雷雷,吕锡武,等. 云南文山市饮用水源地入库河口湿地工程设计[J]. *中国给水排水*, 2016, 32(24): 83-86.
ZHOU Yue, WANG Leilei, LÜ Xiwu, *et al.* Design of constructed wetland project at estuary of reservoir as potable water source in Wenshan City, Yunnan Province [J]. *China Water & Wastewater*, 2016, 32(24): 83-86 (in Chinese).
- [13] 朱凯,刘小鹏,程继辉,等. 厌氧折流板反应器-复合人工湿地处理农村生活污水中试研究[J]. *水处理技术*, 2014, 40(12): 95-99.
ZHU Kai, LIU Xiaopeng, CHENG Jihui, *et al.* Pilot-scale study on ABR-hybrid constructed wetland process for rural domestic sewage treatment [J]. *Water Treatment Technology*, 2014, 40(12): 95-99 (in Chinese).
- [14] 李安峰,徐文江,潘涛,等. 新型复合折流人工湿地处理富营养化水的效果[J]. *中国给水排水*, 2013, 29(3): 29-32.
LI Anfeng, XU Wenjiang, PAN Tao, *et al.* Integrated baffled constructed wetland for treatment of simulated eutrophic water[J]. *China Water & Wastewater*, 2013, 29(3): 29-32 (in Chinese).
- [15] ZHI W, JI G D. Quantitative response relationships between nitrogen transformation rates and nitrogen functional genes in a tidal flow constructed wetland under C/N ratio constraints[J]. *Water Research*, 2014, 64: 32-41.
- [16] DAN T H, QUANG L N, CHIEM N H, *et al.* Treatment of high-strength wastewater in tropical constructed wetlands planted with *Sesbania sesban*: horizontal subsurface flow versus vertical downflow[J]. *Ecological Engineering*, 2011, 37(5): 711-720.
- [17] KATO K, INOUE T, IETSUGU H, *et al.* Performance of six multi-stage hybrid wetland systems for treating high-content wastewater in the cold climate of Hokkaido, Japan[J]. *Ecological Engineering*, 2013, 51: 256-263.
- [18] KADLEC R H, WALLACE S D. *Treatment Wetlands* [M]. 2nd ed. USA: CRC Press, 2008: 232-287.
- [19] KADLEC R H, PRIES J, LEE K. The Brighton treatment wetlands [J]. *Ecological Engineering*, 2012, 47: 56-70.
- [20] 段跟定,刘凯. 不同潜流湿地对养猪废水除磷效能的对比研究[J]. *中国给水排水*, 2015, 31(19): 91-95.
DUAN Gending, LIU Kai. Comparison study on two different constructed wetland systems for removal of phosphorus from swine wastewater [J]. *China Water & Wastewater*, 2015, 31(19): 91-95 (in Chinese).
- [21] FOLADORI P, RUABEN J, ORTIGARA A R C. Recirculation or artificial aeration in vertical flow constructed wetlands: a comparative study for treating high load wastewater [J]. *Bioresource Technology*, 2013, 149(12): 398-405.

作者简介:肖海文(1976-),女,四川雅安人,博士,副教授,从事雨水、废水的治理和资源化利用以及人工湿地废水处理技术研究工作。

E-mail: xiaohaiwen99@163.com

收稿日期: 2020-08-19

修回日期: 2020-11-16

(编辑:丁彩娟)