

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2020.18.005

## 我国人工湿地标准中潜流湿地设计分析

张翔<sup>1,2</sup>, 李子富<sup>1,2</sup>, 周晓琴<sup>1,2</sup>, 郑蕾<sup>1,2</sup>

(1. 北京科技大学 能源与环境工程学院, 北京 100089; 2. 北京市工业典型污染物资源化处理重点实验室, 北京 100089)

**摘要:** 人工湿地污水处理技术是一种处理污水的生态处理方法,近年来在我国得到快速发展和推广应用。2009年起,国家和部分省份的职能部门颁布实施了一系列人工湿地标准,用于指导并规范人工湿地设计建设,内容主要包括人工湿地构筑物设计、污染负荷设计和水力负荷设计等3方面的参数。比较了各个标准中潜流人工湿地的设计参数,发现不同标准的污染负荷和水力负荷差异明显。人工湿地设计面积计算结果表明,对于不同性质的废水,设计时应核算不同的设计参数,不应只根据水力负荷或仅采用污染负荷进行人工湿地设计。同时,需要考虑气候、湿地填料、深度、植物等其他因素对人工湿地处理效果的影响。

**关键词:** 人工湿地标准; 污染负荷; 水力负荷; 湿地设计面积

**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2020)18-0024-08

## Design Analysis of Subsurface Flow Wetland in Constructed Wetland Standards in China

ZHANG Xiang<sup>1,2</sup>, LI Zi-fu<sup>1,2</sup>, ZHOU Xiao-qin<sup>1,2</sup>, ZHENG Lei<sup>1,2</sup>

(1. School of Energy and Environmental Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100089, China; 2. Beijing Key Laboratory of Resource-oriented Treatment of Industrial Pollutants, Beijing 100089, China)

**Abstract:** The constructed wetlands technology for sewage treatment is an ecological treatment method, which has been rapidly developed and applied widely in China in recent years. Since 2009, some relevant functional government departments of nation and provinces have promulgated and implemented a series of design standards, which are used to guide and standardize the design and construction of constructed wetlands. These standards mainly include the parameters of constructed wetland structure design, pollution load design, and hydraulic load design. By comparing the design parameters of subsurface flow constructed wetlands in each standard, it is found that the pollution load and hydraulic load of various standards are significantly different. The calculation results of the constructed wetland design area show that different design parameters should be used for different types of wastewater, and the constructed wetland design cannot be based on hydraulic load or pollution load only. At the same time, it is necessary to consider the influence of climate, wetland substrate, depth, plants and other factors on the treatment effect of the constructed wetland.

**Key words:** constructed wetland standard; pollution load; hydraulic load; wetland design area

人工湿地是生态工程技术的一种,它模拟自然生态系统的物质循环和能量利用原理,通过填料、植物和微生物的协同作用使污水得到净化。该技术应用广泛,既可以处理生活污水,也可以用于河湖水和尾水的深度处理<sup>[1-2]</sup>。为了保证人工湿地工程质量和处理效果,国家及地方政府的有关职能部门分别开展了人工湿地工程技术标准的制定。苏锦明<sup>[3]</sup>对最早的两部标准《人工湿地污水处理技术导则》(RISN—TG 006—2009)和《人工湿地污水处理工程技术规范》(HJ 2005—2010)的设计参数进行了研

究讨论。常雅婷等<sup>[4]</sup>总结了国内人工湿地的相关规范/规程,并讨论了国内各地区人工湿地设计参数的特点。收集整理了目前国内人工湿地相关的导则、规程和规范,针对各个标准中关于潜流人工湿地的设计参数进行比较分析,并针对不同的处理对象提出了潜流型人工湿地设计计算的建议,同时,对气候、湿地填料、植物等其他因素的影响进行了分析。

1 我国颁布的相关人工湿地技术标准

表 1 中列出了我国发布的人工湿地相关标准的机构以及发布时间。

表 1 我国目前已发布施行的标准

Tab.1 China's current published standards

发布年份	发布机构	适用水体	标准名
2009	住建部	生活污水、二级出水及其他类似性质出水	《人工湿地污水处理技术导则》(RISN—TG 006—2009)(以下简称住建部导则)
2010	环保部		《人工湿地污水处理工程技术规范》(HJ 2005—2010)(以下简称环保部规范)
2012	上海市建设交通委		《人工湿地污水处理技术规程》(DG/TJ 08—2100—2012)(以下简称上海规程)
2014	江苏省住建厅		《有机填料型人工湿地生活污水处理技术规程》(DGJ 32/TJ 168—2014)(以下简称江苏规程)
2016	北京市质监局		《农村生活污水人工湿地处理工程技术规范》(DB 11/T 1376—2016)(以下简称北京规范)
2012	浙江省质监局		《农村生活污水处理技术规范》(DB 33/T 868—2012)(以下简称浙江规范)
2011	宁夏自治区质监局		《农村生活污水处理技术规范》(DB 64/T 699—2011)(以下简称宁夏规范)
2017	广东省质监局		《水解酸化—人工湿地无动力污水处理工程技术规范》(DB 44/T 1995—2017)(以下简称广东规范)
2015	青海省质监局和环保厅		《河湟谷地人工湿地污水处理技术规范》(DB 63/T 1350—2015)(以下简称青海规范)
2019	天津市住建委		《天津市人工湿地污水处理技术规程》(DB/T 29—259—2019)(以下简称天津规程)
2018	山东省质监局	微污染水体	《人工湿地水质净化工程技术指南》(DB 37/T 3394—2018)(以下简称山东指南)
2010	云南省质监局	低浓度污水	《高原湖泊区域人工湿地技术规范》(DB 53/T 306—2010)(以下简称云南规范)

从表 1 可见,我国最早的人工湿地技术标准是 2009 年由住建部标准定额研究所组织编制并发布的,近年来发布的标准包括天津规程、山东指南和广东规范。广东规范只含有水平流湿地的设计,不包括垂直流湿地的设计,山东指南、浙江规范不对潜流湿地类型进行区分,统一推荐设计参数。青海规范的内容主要是针对复合潜流湿地设计推荐的参数。

按地区看,华东地区的标准最多,包括浙江规范、江苏规程、上海规程等,华南地区有广东规范,华北地区有北京规范和天津规程,西南地区有云南规范,西北地区有青海规范和宁夏规范。

2 标准中潜流人工湿地设计参数分析

2.1 人工湿地标准中的参数与指标

各个技术标准中,垂直流人工湿地和水平流人工湿地的设计指标有悬浮物(SS)浓度、COD 负荷、BOD<sub>5</sub> 负荷、水力负荷、水力停留时间、床体深度、核心处理层厚度和核心层粒径范围。COD 负荷、BOD<sub>5</sub> 负荷指的是单位面积人工湿地可削减的有机污染物质量,常用于计算人工湿地床体面积。水力负荷指单位时间单位面积人工湿地接纳的污水量。水力停留时间指水在人工湿地处理区总容积内的平均停留时间。

## 2.2 人工湿地工程设计

人工湿地工程设计主要是面积设计计算,但是要保证良好的处理能力,湿地系统的设计深度、填料性质和粒径、植物种类等因素也非常重要。

### 2.2.1 人工湿地负荷设计

#### ① 进水 SS 指标和有机污染负荷指标

悬浮物 SS 会在湿地基质的空隙中积累,为了保

证湿地的正常运行,必须控制进水 SS 浓度。各标准中潜流人工湿地进水 SS 浓度的限值见表 2。由表 2 可知,北京规范、浙江规范和山东指南中没有对潜流人工湿地的进水 SS 浓度做出规定,云南规范的 SS 浓度最高限值为 400 mg/L,明显高于其他标准。环保部规范和广东规范对水平流人工湿地的进水 SS 浓度要求值最低,为 60 mg/L。

表 2 各标准中潜流人工湿地进水 SS 浓度的限值

Tab. 2 Limits of influent SS concentration of subsurface flow constructed wetland in different standards  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$

项 目	进水 SS 限值							
	环保部规范	广东规范	住建部导则	上海规程	宁夏规范	江苏规程	云南规范	天津规程
水平流湿地	60	60	100	100	100	80	400	80
垂直流湿地	80	无						

污染负荷指标通常有 COD 负荷(有机负荷)、BOD<sub>5</sub> 负荷(有机负荷)和其他污染(氨氮、总氮和总

磷)负荷。各标准中潜流人工湿地有机污染负荷建议值见表 3。

表 3 各标准中潜流人工湿地有机污染负荷取值

Tab. 3 Recommended values for organic loading rate of subsurface flow constructed wetlands in different standards

$\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$

项目		全国		华北		华东				华南	西南	西北
		环保部规范	住建部导则	北京规范	天津规程	上海规程	江苏规程	浙江规范	山东指南	广东规范	云南规范	宁夏规范
垂直流湿地	COD 负荷	17.8 ~ 26.7 *	≤20 **	≤17.4 *	13.0 ~ 17.4 *	≤60 **	50 ~ 90 **	19.0 ~ 28.6 *	0.5 ~ 10 **	无	10 ~ 15 **	16 ~ 32 ** (18.2 ~ 27.3 *)
	BOD <sub>5</sub> 负荷	8 ~ 12 **	≤9 *	≤8 **	6 ~ 8 **	≤25.2 *	21 ~ 37.8 *	8 ~ 12 **	0.2 ~ 4.2 *	无	5 ~ 8 **	8 ~ 12 **
水平流湿地	COD 负荷	17.8 ~ 26.7 *	≤16 **	≤17.4 *	10.9 ~ 17.4 *	≤40 **	25 ~ 45 **	19.0 ~ 28.6 *	0.5 ~ 10 **	20 ~ 50 **	10 ~ 15 **	18.2 ~ 27.3 *
	BOD <sub>5</sub> 负荷	8 ~ 12 **	≤7.2 *	≤8 **	5 ~ 8 **	≤16.8 *	10.5 ~ 18.9 *	8 ~ 12 **	0.2 ~ 4.2 *	5 ~ 15 **	5 ~ 8 **	8 ~ 12 **

注: \* 指根据宋丽丽等<sup>[5]</sup>统计的全国各个地区的生活污水  $\rho(\text{BOD}_5)/\rho(\text{COD})$  比值进行的 COD 负荷与 BOD<sub>5</sub> 负荷的换算值。 \*\* 指规范标准推荐值。

由表 3 可知,大部分标准的污染负荷指标设计值仅推荐了 COD 负荷或 BOD<sub>5</sub> 负荷,广东规范和云南规范对两种指标都有推荐值。对于垂直流湿地,江苏规程的最高 COD 负荷可达 90  $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ ,而住建部导则的最高 COD 负荷为 20  $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 。对于水平流湿地,最高的 COD 负荷限值为广东规范的 50  $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ ,而住建部导则的最高 COD 负荷为 16  $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 。各标准建议两种湿地的 BOD<sub>5</sub> 负荷,大部分的设计值在 12  $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$  以下。Li 等<sup>[6]</sup>对 1990 年—2015 年运行超过 3 年的人工湿地工程的数据进行了分析,发现垂直流湿地的 BOD<sub>5</sub> 负荷范围为 10.6 ~ 55.3  $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ ,而西方国家普遍为

6 ~ 10  $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 。

由表 3 数据还可看出,北京规范和云南规范的污染负荷低于环保部规范中的最小污染负荷值,北京规范的取值与住建部导则较为接近,而上海规程和江苏规程的最大污染负荷值很大程度超过了环保部规范的最大值,这可能是由人工湿地设计的床体深度、选择的基质材料以及气候的差异造成的。对于垂直流湿地,上海规程建议填料粒径为 2 ~ 6 mm,而北京规范推荐的粒径为 0.2 ~ 5 mm,北京规范和上海规程其他设计指标比较接近。

#### ② 水力负荷指标

除山东指南和云南规范外,其他人工湿地标准

的适用对象都是生活污水、二级出水或类似性质污 水。各标准中潜流人工湿地水力负荷建议值见表 4。

表 4 各标准中潜流人工湿地水力负荷建议值

Tab. 4 Recommended values of hydraulic loading rate for subsurface flow constructed wetlands in different standards

L · m<sup>-2</sup> · d<sup>-1</sup>

项 目		环保部规范	住建部导则	北京规范	天津规程	上海规程	江苏规程	浙江规范	山东指南	广东规范	云南规范	宁夏规范
水力负荷 建议值	垂直流 湿地	<1 000 (北方 200 ~ 500; 南方 400 ~ 800)	≤80(生物处理) ≤120(深度处理)	≤200	≤400	≤300	800 ~ 1 000	40 ~ 240	200 ~ 1 000	无	100 ~ 500	200 ~ 500
	水平流 湿地	< 500	≤40 <sup>a</sup> 100 ~ 300 <sup>b</sup>	≤200	≤250	≤200	400 ~ 600	40 ~ 240	200 ~ 1 000	250	100 ~ 500	< 500

注: <sup>a</sup> 指面积不受限情况下水力负荷值;<sup>b</sup> 指面积受限情况下水力负荷值。

由表 4 可知,垂直流人工湿地的水力负荷设计值普遍高于水平流人工湿地,各标准中垂直流湿地的水力负荷有明显不同。云南规范和宁夏规范中水力负荷范围与环保部规范相近并保持一致,推荐的设计值应与设计人口规模及经济发展状况相符合。水平流湿地的水力负荷除山东指南外,大部分标准的建议设计值都在环保部规范的建议范围内。山东指南的适用对象为微污染水体,水力负荷最大值超过环保部规范的建议值。

与环保部规范相比,北京规范和天津规程、上海

规程及浙江规范和广东规范规定的水力负荷最大值小于其对北方地区和南方地区建议的最小值,这可能归因于北京市、天津市、上海市、浙江省和广东省已执行或即将执行更高的农村生活污水排放标准,而江苏规程使用的是有机填料并且核心处理层厚度更大,水力负荷范围则超过环保部规范建议的最大值。

2.2.2 人工湿地深度设计

不同标准的人工湿地床体深度和核心处理层厚度如表 5 所示。

表 5 各标准对潜流人工湿地深度建议值

Tab. 5 Recommended values for depth of subsurface flow constructed wetlands in different standards

mm

项 目		住建部导则	北京规范	天津规程	上海规程	江苏规程	浙江规范	广东规范	云南规范	宁夏规范
垂直流 湿地	床体深度	≥800	800 ~ 2 000	1 200 ~ 1 600	≤2 000		800 ~ 1 200		1 500 ~ 2 000	1 600 ~ 2 000
	核心处理层厚度	≥500			600 ~ 900	800 ~ 1 700				1 200 ~ 1 400
水平流 湿地	床体深度		800 ~ 1 500	600 ~ 1 200	700 ~ 1 200	1 250 ~ 1 350	800 ~ 1 200	>1 000	1 000 ~ 1 500	1 600 ~ 2 000
	核心处理层厚度	≥500			500 ~ 1 000	900 ~ 1 000				

大多数标准中垂直流人工湿地床体深度至少 800 mm,最大 2 000 mm,核心处理层厚度至少 400 mm。宁夏规范的床体深度范围最大,为 1 600 ~ 2 000 mm。垂直流湿地床体深度一般需要根据冬季的环境温度、植物种类和根系生长深度确定,以保证湿地床中必要的好氧条件和一定的保温效果<sup>[7]</sup>。床体深度越大,水平流湿地和垂直流湿地的容水量越大,间歇运行的垂直流湿地好氧条件越好,但提高了单位面积的成本,并且更换基质难度大、成本高,维护困难。水平流湿地深度至少 600 mm,最大 2 000 mm。部分标准缺少对核心处理层厚度的

建议。

2.2.3 填料性质和粒径要求

人工湿地基质的粒径是人工湿地设计的重要参数,一方面,粒径的大小影响湿地比表面积,粒径越小,基质床体比表面积越大,对污染物的吸附效果越好,且越有利于微生物的附着生长。另一方面,粒径的减小,降低了湿地床体的水力传导性,增加了湿地堵塞风险<sup>[8]</sup>。潜流人工湿地最常选用的基质粒径为 4 ~ 16 mm,对于水平流人工湿地,在进水配水区和出水集水区需要使用更大粒径的基质<sup>[7]</sup>。北京规范和宁夏规范要求填料粉末含量应符合设计要



求,但没有给出具体要求。住建部导则和广东规范要求填料粒径符合级配曲线范围,但广东规范没有给出级配曲线。各标准中潜流人工湿地基质粒径建

议值见表 6。另外,丹麦湿地指南要求黏土和淤泥(粒径  $<0.125\text{ mm}$ )的含量必须小于  $0.5\%$  [9],可供参考。

表 6 各标准中潜流人工湿地基质粒径范围建议值

Tab. 6 Recommended particle size range for subsurface flow constructed wetlands in different standards mm

项 目	住建部 导则	北京 规范	天津 规程	上海 规程	浙江 规范	广东 规范	云南 规范	宁夏 规范
垂直流湿地 核心层基质粒径	0.2 ~ 6	0.2 ~ 5		2 ~ 6	上:2 ~ 8 中:12 ~ 30 下:30 ~ 100		上:60 ~ 100 中:10 ~ 20 底:5 ~ 10	8 ~ 16
水平流湿地 核心层基质粒径		2 ~ 20	4 ~ 8	4 ~ 30	上:2 ~ 8 中:12 ~ 30 下:30 ~ 100	上:粗砂(筛选) 中上:5 中下:150 ~ 300 下:300 ~ 600	中段:20 ~ 40 末段:5 ~ 10	16 ~ 32
水平流湿地进、 出水区基质粒径	进水区: 6 ~ 16; 出水区: 8 ~ 16	20 ~ 100	进水区: 25 ~ 15; 出水区: 10 ~ 15	40 ~ 80			60 ~ 100	进水区: 16 ~ 6; 出水区: 8 ~ 16

## 2.2.4 植物要求

各标准对人工湿地的植物部分提出了植物种类选用、种植密度、种植时间、种植方法、植物驯养和植物管理等方面的建议,住建部导则、上海规程、江苏规程对植物部分的描述相对更细致。各标准对人工

湿地选用植物的要求可以总结为耐污去污能力强、根系发达和生物量大、移植成活率高、耐寒、抗病害、兼顾观赏性和经济性的 6 个特性,部分标准提及其中 3 ~ 4 点。各个标准中对于植物种类、数量、种植时间的要求如表 7 所示。

表 7 各个标准中对于植物种类、数量、种植时间的要求

Tab. 7 Requirements for plant species, quantity and planting time in different standards

规范名称	潜流湿地建议植物种类	数量	种植时间
环保部 规范	芦苇、蒲草、荸荠、莲、水芹、水葱、茭白、香蒲、千屈菜、菖蒲、水麦冬、风车草、灯芯草等	按种类与工程要求调整, 推荐为 $9 \sim 25\text{ 株/m}^2$	春季
住建部 导则	芦苇、香蒲、美人蕉、菖蒲、水葱、风车草、灯芯草、再力花等	按种类调整,芦苇为 $4 \sim 6\text{ 株/m}^2$	春季
北京规范	芦苇、香蒲、菖蒲、水葱、千屈菜、茭白等		春季(最佳)夏季、秋季
天津规程	芦苇、香蒲、菖蒲、黄花鸢尾、千屈菜、水葱、蕉草等	$9 \sim 25\text{ 株/m}^2$	宜春季或初夏, 夏末或初秋也可
上海规程	芦苇、蒲草、荸荠、莲、水芹、水葱、茭白、香蒲、千屈菜、菖蒲、水麦冬、风车草、灯芯草	有植物种类与种植密度表,芦苇为 $16 \sim 25\text{ 株/m}^2$ ( $2 \sim 3\text{ 株或芽/丛}$ )	3 月、4 月或越冬期
江苏规程	芦苇、香蒲、美人蕉、水葱、灯芯草、旱伞草、再力花、千屈菜、鸢尾、麦冬等	各类植物按规程中间距要求 种植,芦苇为 $25\text{ 株/m}^2$	4 月初—8 月底, 成活率高
浙江规范	芦苇、香蒲、菖蒲、美人蕉、风车草、水竹、水葱、大米草、灯芯草、再力花、芦竹、鸢尾、千屈菜、纸莎草等	$8 \sim 10\text{ 穴/m}^2$ , $2 \sim 3\text{ 株/穴}$	
山东指南	芦苇、香蒲、菖蒲、水葱、黄花鸢尾等本地植物	$9 \sim 25\text{ 株/m}^2$	
广东规范	芦苇、香蒲、水葱、美人蕉、风车草、香根草、再力花、泰国慈菇、水禾、水竹、花叶芦竹等	有植物种类与种植密度推荐表, 芦苇为 $16 \sim 25\text{ 丛/m}^2$ ( $2 \sim 3\text{ 株或芽/丛}$ )	3 月、4 月或越冬期
云南规范	芦苇、香蒲、菖蒲、旱伞竹、风车草、美人蕉、马蹄莲等	$4\text{ 丛/m}^2$ , $2 \sim 3\text{ 株/丛}$	春季
宁夏规范	芦苇、香蒲、美人蕉、菖蒲、水葱、千屈菜、茭白等	有植物配置表, 芦苇为 $16 \sim 20\text{ 株/m}^2$	
青海规范	芦苇、香蒲、菖蒲、水葱等	依株行距计算得 $13 \sim 33\text{ 株/m}^2$	春季,在适宜地区 于夏末秋初亦可

芦苇、香蒲、菖蒲、水葱为各规范均推荐选用的人工湿地植物,环保部规范、上海规程、江苏规程、浙江规范、广东规范中提及的植物种类数量较多。各标准对单位面积栽种的植物数量建议范围存在差异,云南规范的植物种植密度最小,住建部导则对芦苇的建议种植密度最小,其理由是挺水植物生长繁殖速度快,种植初期密度不宜过大。除未给出种植时间的标准外,各标准都建议在春季栽种植物,上海规程和广东规范提及越冬期可以栽种植物,可能与当地气候有密切关系,江苏规程提及春季栽种最为适宜,实践证明8月底前栽种均可以成活。环保部规范、住建部导则、上海规程、江苏规程、云南规范、宁夏规范、青海规范给出了植物栽种移植的方式。住建部导则、宁夏规范、青海规范提及了植物种植后驯养的方法。在植物收割方式上,大部分标准规定为定期收割,浙江规范为衰败后及时收割,北京规范为越冬期保存,到开春后收割。

综合来看,部分标准还需要对人工湿地的植物维护管理部分进行更详尽的规范说明,补充植物种植时间和植物的驯养方法等方面的内容,并且各标准可以结合本地气候特征和生态环境情况,参考实际工程和科研结果,确定可以选用的植物种类、不同植物合适的种植密度和成活率高的种植时间。

### 2.2.5 标准中的其他设计要求

基质材料通常选用砂、砾石、沸石和石灰石等一种或多种填料组合。大部分标准未明确规定运行方式,部分提及适当采用间歇运行防堵塞,上海规程和广东规范规定可以采用连续运行、间歇运行和潮汐运行3种运行方式。只有北京规范对间歇运行时间进行了说明:对于连续流运行的湿地池体,至少每月降低一次湿地水位,实施间歇运行3~5 d。

设计使用年限仅有北京规范和山东指南提及,北京规范的设计使用年限为30年,山东指南建议质保期一般为2年。

## 3 典型潜流人工湿地的设计面积分析

依据表4并参考《给水排水设计手册(第5册):城镇排水》《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)及《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002),用COD负荷进行湿地最小面积计算的3种情况:①中污染负荷,设定进水COD为400 mg/L,出水COD为二级标准(100 mg/L);②低污染负荷,设定进水COD为250 mg/L,出水COD为二

级标准(100 mg/L);③微污染负荷,设定进水COD为一级B标准限值(60 mg/L),出水COD为V类水标准限值(40 mg/L)。

用BOD<sub>5</sub>负荷进行湿地最小面积计算的3种情况:①中污染负荷,设定进水BOD<sub>5</sub>为220 mg/L,出水BOD<sub>5</sub>为二级标准(30 mg/L);②低污染负荷,设定进水BOD<sub>5</sub>为110 mg/L,出水BOD<sub>5</sub>为二级标准(30 mg/L);③微污染负荷,设定进水BOD<sub>5</sub>为一级B标准限值(20 mg/L),出水BOD<sub>5</sub>为V类水标准限值(10 mg/L)。

潜流人工湿地面积可依据污染负荷和水力负荷进行计算,具体公式分别如下:

$$A = Q(C_0 - C_1)/N \quad (1)$$

$$A = Q/N_q \quad (2)$$

式中  $A$ ——人工湿地面积,  $m^2$

$Q$ ——污水流量,  $m^3/d$

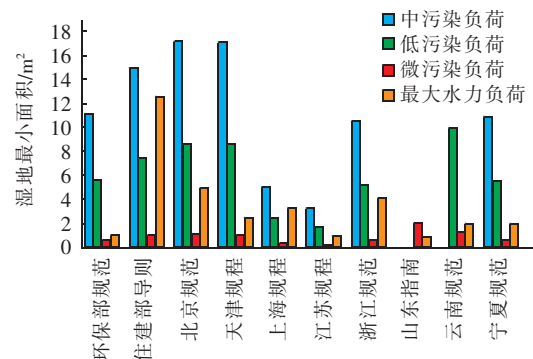
$C_0$ ——进水污染物浓度,  $mg/L$

$C_1$ ——出水污染物浓度,  $mg/L$

$N$ ——污染物负荷,  $g/(m^2 \cdot d)$

$N_q$ ——水力负荷,  $L/(m^2 \cdot d)$

将潜流人工湿地进水流量  $Q$  设为  $1 m^3/d$ , 依据各个标准的设计参数计算得出的两种潜流人工湿地最小要求的面积如图1所示。当污水的污染程度为中等污染时, 决定潜流人工湿地最小面积的主要指标为污染负荷, 而当污水的污染程度为微污染时, 大部分标准适用最大水力负荷来决定最小面积。以北京规范为例, 当垂直流人工湿地进水为中污染污水时, 以COD负荷计算得出的单位水量所需的最小面积为  $17.24 m^2$ , 水力负荷约为  $58 L/(m^2 \cdot d)$ ; 以BOD<sub>5</sub>负荷计算出的单位水量所需的最小面积为  $23.75 m^2$ , 水力负荷约为  $42 L/(m^2 \cdot d)$ , 小于其最大水力负荷  $200 L/(m^2 \cdot d)$  的设计要求。



a. 基于COD负荷计算的垂直流湿地

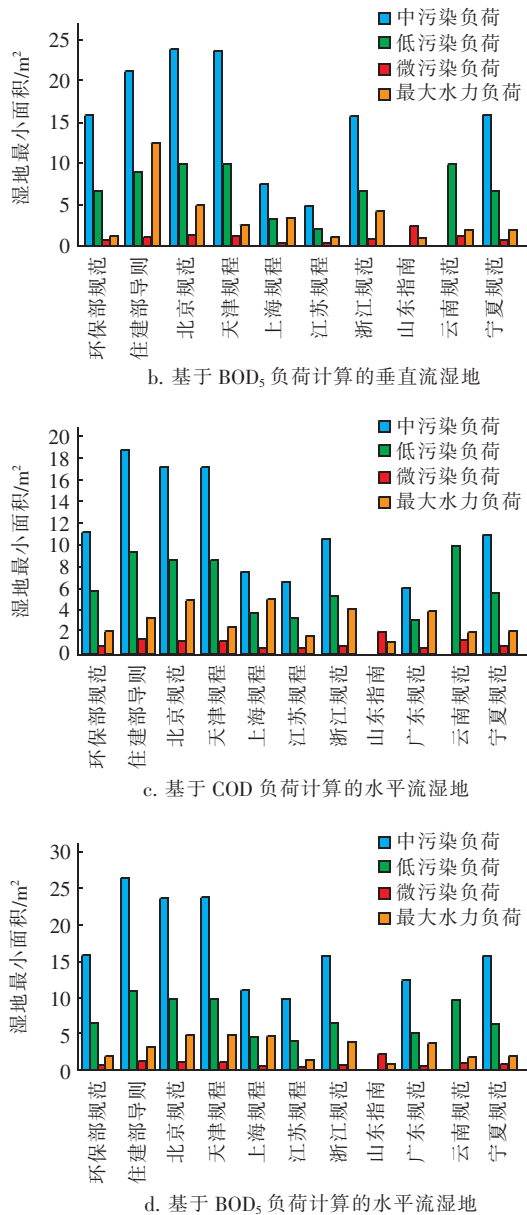


图1 不同标准中基于污染负荷计算的潜流人工湿地面积  
Fig.1 Area of subsurface flow constructed wetland based on pollution load in different standards

基于水力负荷对潜流湿地的设计面积进行计算,结果见图2。部分标准未给出最小水力负荷,无法计算最大设计面积。江苏规程以最小水力负荷计算面积时,达不到处理中所需的最小面积。因为江苏规程进水浓度限值较低,要求预处理后出水 COD 宜小于 150 mg/L。

综上,在计算湿地面积时需考虑污水的污染程度。用于生活污水处理的潜流人工湿地,其面积由污染负荷决定,处理的污水污染物浓度越高,则所需

面积越大,水力负荷越低。而用于微污染浓度污水处理的潜流人工湿地,面积主要由水力负荷决定。

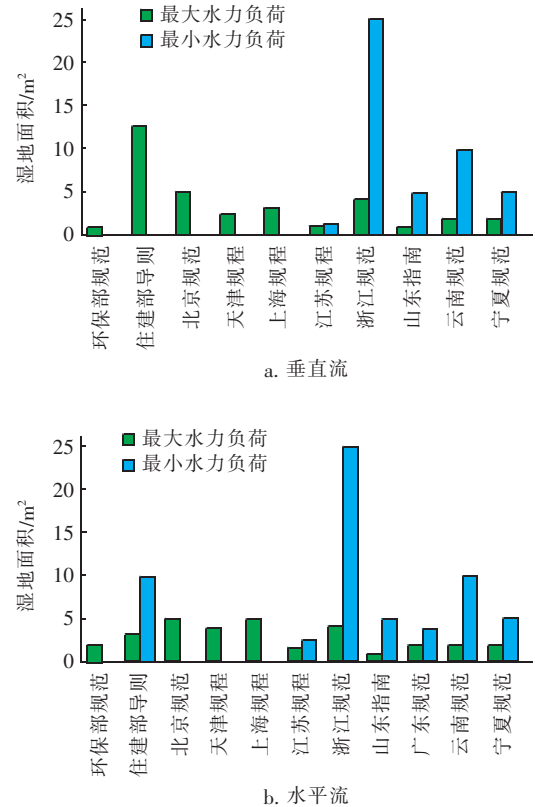


图2 不同标准中基于水力负荷计算的潜流人工湿地面积  
Fig.2 Area of subsurface flow constructed wetland based on hydraulic load in different standards

#### 4 结语

依据我国人工湿地各标准的设计负荷值进行设计面积计算,结果显示处理中污染负荷和低污染负荷的污水时,湿地最小设计面积应由污染负荷设计值决定,而微污染浓度的污水(二级出水和类似性质污水)处理需要综合考虑污染负荷设计值和水力负荷设计值。

对于不同污水源,应分别进行设计参数的规定,如处理生活污水,各个标准的水力负荷应适当降低,处理微污染的二级出水或湖水时最小水力负荷可以适当增大以充分利用人工湿地净水能力。不同标准的污染负荷差异明显,污染负荷随污水的性质和条件变化,潜流湿地所能承受的污染负荷受到填料种类、粒径范围、填料组合、核心处理层深度和运行方式的影响,同时,合理配置基质粒径和设置足够的填料深度能够提升单位面积的污染负荷,提升潜流人工湿地的处理效果,缩小湿地的面积需求,以提升污

水的处理量。随着人工湿地工程在我国的发展,已有大量工程可以参考,早期发布的标准可以根据实际工程数据和地域对于水环境质量的要求进行调整优化,如北京规范和上海规程的指标,与环保部规范相比水力负荷较低,选取不同的污染负荷,在垂直流湿地的指标上与其他标准相比选用的粒径更小。

建议统计全国范围内典型潜流人工湿地工程的实际运行数据,建立潜流式人工湿地数据平台,对华北、华东、华中、华南、东北、西北、西南7大地理区域内的人工湿地分别进行统计分析,对设计参数和净水效果进行比较,整理核算得出每个地区最适宜的参数,并且总结运维的相关要点,以便建立更加长期有效运行的潜流人工湿地污水处理工程和水质净化工程。

#### 参考文献:

- [1] Zhang T, Xu D, He F, *et al.* Application of constructed wetland for water pollution control in China during 1990 – 2010[J]. *Ecol Eng*, 2012, 47: 189 – 197.
- [2] 李小艳,丁爱中,郑蕾,等. 1990 – 2015 年人工湿地在我国污水治理中的应用分析[J]. *环境工程*, 2018, 36(4): 11 – 17.
- Li Xiaoyan, Ding Aizhong, Zheng Lei, *et al.* Application of constructed wetlands for water pollution treatment in China during 1990 – 2015 [J]. *Environmental Engineering*, 2018, 36(4): 11 – 17 (in Chinese).
- [3] 苏锦明. 人工湿地设计相关规范的研究与探讨[J]. *给水排水*, 2011, 47(增刊): 174 – 176.
- Su Jinming. Research and discussion on related specifications of constructed wetland design[J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2011, 47 (S1): 174 – 176 (in Chinese).
- [4] 常雅婷,卫婷,嵇斌,等. 国内各地区人工湿地相关规范/规程对比分析[J]. *中国给水排水*, 2019, 35(8): 27 – 33.
- Chang Yating, Wei Ting, Ji Bin, *et al.* Comparative analysis of design standards/regulations of constructed wetlands in different regions of China[J]. *China Water & Wastewater*, 2019, 35(8): 27 – 33 (in Chinese).
- [5] 宋丽丽,罗勇,高庆先,等. 生活污水中  $BOD_5$  与  $COD_{Cr}$  关系的区域性差异分析[J]. *环境科学研究*, 2011, 24(10): 1154 – 1160.
- Song Lili, Luo Yong, Gao Qingxian, *et al.* Regional difference analysis of the correlation between  $BOD_5$  and  $COD_{Cr}$  in domestic wastewater [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2011, 24(10): 1154 – 1160 (in Chinese).
- [6] Li X Y, Ding A Z, Zheng L, *et al.* Relationship between design parameters and removal efficiency for constructed wetlands in China[J]. *Ecol Eng*, 2018, 123: 135 – 140.
- [7] 崔志华,卢少勇. 污水处理的人工湿地构建技术[M]. 北京:化学工业出版社,2009.
- Cui Lihua, Lu Shaoyong. *Constructed Wetland Construction Technology for Sewage Treatment* [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2009 (in Chinese).
- [8] 宋志鑫,丁彦礼,解庆林,等. 潜流人工湿地流场分布与基质堵塞关系研究进展[J]. *湿地科学*, 2014, 12(5): 677 – 682.
- Song Zhixin, Ding Yanli, Xie Qinglin, *et al.* Research progress in relationship between flow field distribution and clogging in subsurface flow constructed wetlands [J]. *Wetland Science*, 2014, 12(5): 677 – 682 (in Chinese).
- [9] Brix H, Arias C A. The use of vertical flow constructed wetlands for on-site treatment of domestic wastewater: New Danish guidelines [J]. *Ecol Eng*, 2005, 25(5): 491 – 500.



作者简介:张翔(1995 – ),男,江苏苏州人,硕士研究生,研究方向为人工湿地污水处理。

E-mail: 821310843@qq.com

收稿日期: 2019 – 08 – 19