

# 中国质量检验协会文件

中检办发〔2026〕22号

## 中国质量检验协会关于《河湖人工湿地基质 筛选技术规范》等2项团体标准 征求意见的通知

各有关单位和相关专家：

中国质量检验协会（以下简称本协会）批准立项的《河湖人工湿地基质筛选技术规范》《人工湿地-微生物电解池构建及运行维护技术规范》2项团体标准经过有关专家、参编单位的讨论和修改，据此形成上述团体标准征求意见稿。

按照《中国质量检验协会团体标准管理办法》的相关规定和要求，本协会现对上述团体标准公开征求意见，请各有关单位和相关专家对上述团体标准制定的修改意见和建议于2026年2月16日前反馈至本协会；如逾期未作反馈，则视为无意见和建议。

谨此感谢有关专家和参编单位与社会各界对本协会团体标准制修订工作的大力支持！

本批团体标准编制工作组 联系人：朱巧莲

手机：19941717753

邮箱：zhuqiaolian@njuyi.cn

中国质量检验协会 联系人：尹宜娟

电话：(010)59196529

手机：15210291261

邮箱：pxb@c315.cn

- 附件：1.《河湖人工湿地基质筛选技术规范》（征求意见稿）  
2.《人工湿地-微生物电解池构建及运行维护技术规范》  
（征求意见稿）  
3.团体标准征求意见表



附件 1

ICS 13.020.01  
CCS Z 06

# 团 体 标 准

T/CAQI XXX—2026

---

## 河湖人工湿地基质筛选技术规范

Technical guidelines for the selection of filter media in  
constructed wetland for river and lake

(征求意见稿)

2026-XX-XX 发布

2026-XX-XX 实施

---

中国质量检验协会 发布

- 3 -

## 前 言

本文件按照GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

请注意本文件的某些内容有可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由南京大学宜兴环保研究院提出。

本文件由中国质量检验协会归口。

本文件起草单位：河海大学等

本文件主要起草人：

# 河湖人工湿地基质筛选技术规范

## 1 范围

本文件规定了河湖人工湿地基质的筛选方法、评价指标与流程，给出了基质物理性质、化学性质及经济性的综合评价标准。

本文件适用于采用人工湿地工艺处理各类低污染水（包括污水厂尾水、水产养殖尾水、农村农田退水及农村生活污水等）的基质筛选工作，旨在为人工湿地系统的基质筛选、评价与配置提供技术依据。

## 2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

- GB 5085.3 危险废物鉴别标准浸出毒性鉴别
- GB/T 22571 表面化学分析X射线光电子能谱仪能量标尺的校准
- GB/T 34533 页岩孔隙度、渗透率和饱和度测定
- GB 50021 岩土工程勘察规范
- HJ 2005 人工湿地污水处理工程技术规范
- DB11/T 1376 农村生活污水人工湿地处理工程技术规范

## 3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

### 3.1

**人工湿地** *constructed wetland*

通过模拟天然湿地的结构和功能，选择一定的地理位置与地形，根据需要，人为设计与建造的湿地。本文件中定义的人工湿地为人工湿地水质净化系统，主要通过基质、植物、微生物的协同作用对水体进行净化。

[来源：DB13/T 5184—2020，3.1，有修改]

### 3.2

**基质** *substrate*

提供人工湿地植物与微生物生长并对污染物起过滤、吸附作用的填充材料，包括土壤、砂、砾石、沸石、石灰石、页岩、火山岩、塑料、生物质炭、生物陶粒和其它可去除特定污染物的新型环保材料等。

[来源：HJ 2005—2010，3.7，有修改]

### 3.3

**渗透系数** *permeability coefficient*

水在人工湿地基质或防渗层中，单位水力坡度下的渗流流速，单位为米/秒（m/s）。

[来源：DB37/T 3394—2018，3.8，有修改]

### 3.4

**比表面积** *BET specific surface area*

材料单位质量或单位体积的表面积。

[来源：GB/T 19587—2017，3.11，有修改]

### 3.5

**级配** *concrete gradation*

基质各级粒径颗粒的分配情况。

### 3.6

**表面官能团** *surface functional groups*

材料表面原子或原子团与外界元素结合形成的、具有特定化学性质的基团。

### 3.7

#### 堵塞系数 clogging factor

通过测量系统在运行过程中饱和水力传导系数的下降率,并依据既定分级标准进行量化赋分,从而表征人工湿地基质层发生堵塞的风险与程度的无量纲指标。

## 4 基质物理性质筛选

### 4.1 总则

对人工湿地系统基质筛选进行物理性质量化分析,通过人工湿地基质的渗透系数 $P_C$ 、不均匀系数 $C_u$ 、曲率系数 $C_c$ 、比表面积 $S_s$ 和堵塞系数 $C_f$ 评价不同基质的性能,以这些指标为核心,通过定量指标分析基质性能,筛选适合的湿地基质。人工湿地基质宜选用机械强度高、易于就地取材的材料,且不得对环境造成二次污染,若基质的物理指标超出实验室检测能力,应委托第三方检测机构进行测定。

### 4.2 物理性质指标筛选

#### 4.2.1 渗透系数 $P_C$

渗透系数是衡量其允许水分通过自身孔隙流动能力的关键物理参数,是指在恒定水力梯度作用下,人工湿地基质层允许水通过其孔隙结构流动的能力,数值上等于单位水力梯度下的渗透流速。渗透系数的计算见公式(1)。基质渗透系数测定可参考GB/T 34533的方法测定。

$$P_C = \frac{Q}{AJ} = vJ \dots\dots\dots (1)$$

式中:

- $P_C$  ——渗透系数, cm/s;
- $Q$  ——渗流流量,  $\text{cm}^3/\text{s}$ ;
- $A$  ——断面面积,  $\text{cm}^2$ ;
- $J$  ——水力梯度;
- $v$  ——断面平均流速, cm/s。

#### 4.2.2 不均匀系数 $C_u$

不均匀系数是描述基质颗粒粒径分布均匀程度的关键参数,用于量化基质中不同粒径颗粒的比例差异。其核心是通过筛分试验获得的特征粒径比值,反映基质级配的离散性。具体是指基质中限制粒径( $d_{60}$ )与有效粒径( $d_{10}$ )的比值。不均匀系数的计算见公式(2)。不均匀系数解释参考GB 50021的具体说明。

$$C_u = d_{60}/d_{10} \dots\dots\dots (2)$$

式中:

- $C_u$  ——不均匀系数;
- $d_{60}$  ——限定粒径,指在颗粒级配曲线上,对应累计质量为60%的粒径, mm;
- $d_{10}$  ——有效粒径,指在颗粒级配曲线上,对应累计质量为10%的粒径, mm。

#### 4.2.3 曲率系数 $C_c$

曲率系数是描述基质颗粒级配曲线形态的关键参数,用于量化级配分布的连续性,基于颗粒级配曲线的三个特征粒径( $d_{10}$ 、 $d_{30}$ 、 $d_{60}$ )计算。曲率系数的计算见公式(3)。曲率系数解释参考GB50021内具体说明。

$$C_c = d_{30}^2/(d_{60} * d_{10}) \dots\dots\dots (3)$$

式中:

- $C_c$  ——曲率系数,基质的颗粒级配累计曲线的斜率是否连续;
- $d_{30}$  ——中值粒径,指在颗粒级配曲线上,对应累计质量为30%的粒径, mm;
- $d_{60}$  ——限定粒径,指在颗粒级配曲线上,对应累计质量为60%的粒径, mm;
- $d_{10}$  ——有效粒径,指在颗粒级配曲线上,对应累计质量为10%的粒径, mm。

#### 4.2.4 比表面积 $S_s$

比表面积是指单位质量（或单位体积）基质所具有的总表面积，包括颗粒外表面的几何表面积和内部孔隙、裂隙等所有微小空间的表面积之和。比表面积的计算见公式（4）。

$$S_s = \frac{3(C_u+7)}{4\rho_w G_s d_{50}} \dots\dots\dots (4)$$

式中：

- $S_s$  ——比表面积， $m^2/kg$ ；
- $\rho_w$  ——水密度，取 $1000 kg/m^3$ ；
- $G_s$  ——相对密度，基质的密度与同体积纯蒸馏水在 $4\text{ }^\circ C$ 时密度的比值；
- $d_{50}$  ——平均粒径，小于某粒径的基质的质量占总质量的50%， $mm$ 。

#### 4.2.5 堵塞系数 $C_f$

堵塞系数 $C_f$ 反映堵塞动态变化，通过对比湿地初始运行期（未堵塞） $K_{sat0}$ 与当前 $K_{sat}$ ，量化堵塞程度，堵塞系数的计算见公式（5）。 $K_{sat}$ 表示饱和基质中水流的渗透能力，堵塞会导致 $K_{sat}$ 显著下降（通常 $K_{sat} < 10^{-5} m/s$ 时认为堵塞严重）。常用测定方法分为常量水头法（适用于透水性较好的基质，如砾石、粗砂）和变量水头法（适用于透水性差的基质，如细砂、土壤），常量水头法和变量水头法计算分别见公式（6）和公式（7）。

$$C_f = \frac{K_{sat0} - K_{sat}}{K_{sat0}} \times 100\% \dots\dots\dots (5)$$

式中：

- $C_f$  ——堵塞系数， $\%$ ；
- $K_{sat0}$  ——初始饱和水力传导系数， $m/s$ ；
- $K_{sat}$  ——饱和水力传导系数， $m/s$ 。

$$K_{sat} = \frac{L \times Q \times t}{A \times h \times \Delta t} \dots\dots\dots (6)$$

式中：

- $K_{sat}$  ——饱和水力传导系数， $m/s$ ；
- $L$  ——基质柱长度（饱和区高度）， $m$ ；
- $Q$  ——单位时间渗流量， $m^3$ ；
- $t$  ——总测定时间， $s$ ；
- $A$  ——基质柱横截面积， $m^2$ ；
- $h$  ——基质柱两端水头差， $m$ ；
- $\Delta t$  ——单次流量测定时间间隔， $s$ 。

$$K_{sat} = \frac{2.3 \times L \times a}{A \times t} \times \log\left(\frac{h_1}{h_2}\right) \dots\dots\dots (7)$$

式中：

- $a$  ——供水容器横截面积， $m^2$ ；
- $h_1$  ——初始水头高度（ $t=0$ 时）， $m$ ；
- $h_2$  ——终止水头高度（ $t$ 时刻）， $m$ 。

### 4.3 计算方法

#### 4.3.1 筛选指标推荐值

人工湿地基质水力学特征评估指标推荐值见表1。人工湿地基质理化性质基础信息记录表参见表A.1。

表1 人工湿地基质水力学特征评估指标

指标名称	单位	最佳范围
渗透系数 $P_c$	cm/s	0.1-0.6
不均匀系数 $C_u$	/	1.5-3.5
曲率系数 $C_c$	/	1.5-3.0
比表面积 $S_s$	$m^2/g$	沸石类（50-300） 活性炭（800-2500） 树脂类（300-800）
堵塞系数 $C_f$	/	$\leq 20\%$

#### 4.3.2 渗透系数 $P_c$ 得分计算公式

渗透系数是衡量流体通过多孔介质难易程度的关键参数，其值越高，代表透水性越好，过滤过程中水流阻力越小，能耗越低。评分旨在鼓励选用高透水性的基质，以保证过滤系统的运行效率。计算公式见公式（8）。

$$S_{P_c} = \begin{cases} 0 & (P_c \leq 0.01, \text{ 或 } P_c > 1.2) \\ 100 * \left(\frac{P_c - 0.01}{0.09}\right) & (0.01 < P_c < 0.1) \dots\dots\dots (8) \\ 100 & (0.1 \leq P_c \leq 0.6) \\ 100 * \left(\frac{1.2 - P_c}{0.6}\right) & (0.6 < P_c < 1.2) \end{cases}$$

式中：

$S_{P_c}$  —— 实测基质样品的渗透系数得分；

$P_c$  —— 被测基质样品的实测渗透系数值，cm/s。

#### 4.3.3 不均匀系数 $C_u$ 得分计算公式

不均匀系数是评价基质颗粒粒径分布均匀程度的指标。 $C_u$  值越小，表明基质粒径越均匀，有助于形成稳定的孔隙结构，提高过滤精度和反冲洗效率。评分旨在优先选择粒径均匀的基质，计算公式见公式（9）。

$$S_{C_u} = \begin{cases} 100 & (2.5 \leq C_u \leq 3.5) \dots\dots\dots (9) \\ 100 * \left(1 - \frac{|C_u - 2.5|}{2.5}\right) & (C_u < 2.5 \text{ 或 } C_u > 3.5) \end{cases}$$

式中：

$S_{C_u}$  —— 实测基质样品的不均匀系数得分；

$C_u$  —— 被测基质样品的实测不均匀系数。

#### 4.3.4 曲率系数 $C_c$ 得分计算公式

曲率系数用于描述基质颗粒级配曲线的连续性形态。一个合理的  $C_c$  值表示粒径分布连续且良好，能优化滤层的孔隙结构。评分旨在筛选级配良好的基质，计算公式见公式（10）。

$$S_{C_c} = \begin{cases} 100 & (1.5 \leq C_c \leq 3.0) \dots\dots\dots (10) \\ 100 * \left(1 - \frac{|C_c - 2.25|}{2.25}\right) & (C_c < 1.5 \text{ 或 } C_c > 3.0) \end{cases}$$

式中：

$S_{C_c}$  —— 实测基质样品的曲率系数得分；

$C_c$  —— 被测基质样品的实测曲率系数。

#### 4.3.5 比表面积 $S_s$ 得分计算公式

比表面积是单位质量基质所具有的总面积，直接关联其吸附容量和界面反应活性。评分宜结合基质类型，在一个“理想范围”内进行优化评价，沸石类、木质素类生物炭基质、其他种类生物炭和活性炭吸附类基质、电子供体类基质比表面积评分的计算分别见公式（11）~（13）。

$$S_{S_1} = \begin{cases} 100 * \frac{S_s}{50} & (S_s < 50) \\ 100 & (50 \leq S_s \leq 300) \dots\dots\dots (11) \\ 100 * \left(1 - \frac{S_s - 300}{200}\right) & (300 < S_s \leq 500) \\ 0 & (S_s > 500) \end{cases}$$

$$S_{S_2} = \begin{cases} 100 * \frac{S_s}{800} & (S_s < 800) \\ 100 & (800 \leq S_s \leq 2500) \dots\dots\dots (12) \\ 100 * \left(1 - \frac{S_s - 2500}{2500}\right) & (2500 < S_s \leq 5000) \\ 0 & (S_s > 5000) \end{cases}$$

$$S_{S_3} = \begin{cases} 100 * \frac{S_s}{50} & (S_s < 50) \\ 100 & (50 \leq S_s \leq 300) \\ 100 * \left(1 - \frac{S_s - 300}{200}\right) & (300 < S_s \leq 500) \\ 0 & (S_s > 500) \end{cases} \dots\dots\dots (13)$$

式中：  
 $S_{S_{1, 2, 3}}$  ——实测不同类型基质样品的比表面积得分；  
 $S_s$  ——被测基质样品的实测比表面积， $m^2/g$ 。

#### 4.3.6 堵塞系数 $C_f$ 得分计算公式

堵塞系数通过模拟基质在特定条件下的污物截留与附着情况，来预测其长期运行中的堵塞风险。堵塞风险低的基质能延长过滤周期，减少维护频率。评分基于堵塞系数的实测值，对照堵塞进行评定，计算见公式（14），堵塞评分见表2。

表 2 堵塞评分表

堵塞系数 $C_f$	堵塞程度	堵塞风险评分
$\leq 5\%$	基本不堵塞	$S_{C_f} = 100$
5%~20%	无明显堵塞	$50 < S_{C_f} \leq 100$
20%~50%	轻度堵塞	$20 < S_{C_f} \leq 50$
50%~80%	中度堵塞	$0 < S_{C_f} \leq 20$
$> 80\%$	重度堵塞	$S_{C_f} = 0$

$$S_{C_f} = \begin{cases} 100 & (C_f \leq 5\%) \\ 100 - 50 \times (C_f - 5\%) / 15\% & (5\% < C_f \leq 20\%) \\ 50 - 30 \times (C_f - 20\%) / 30\% & (20\% < C_f \leq 50\%) \\ 20 - 20 \times (C_f - 50\%) / 30\% & (50\% < C_f \leq 80\%) \\ 0 & (C_f > 80\%) \end{cases} \dots\dots\dots (14)$$

式中：  
 $S_{C_f}$  ——实测基质样品的堵塞得分；  
 $C_f$  ——被测基质样品的实测堵塞系数，%。

#### 4.4 筛选结果

根据渗透系数  $P_c$ 、不均匀系数  $C_u$ 、曲率系数  $C_c$ 、比表面积  $S_s$  和堵塞系数  $S_{C_f}$  得分计算得出基质物理性质综合得分  $S_{total}$ ，基质物理性质筛选的等级见表5。基质物理性质综合得分计算见公式（15），物理指标可以根据运行期限和目标要求选出3~5种进行评估，保证各部分权重之和为1。在各物理指标中，比表面积（ $S_s$ ）、渗透系数（ $P_c$ ）和堵塞系数（ $S_{C_f}$ ）是反映人工湿地基质水力性能、污染物截留能力和长期运行稳定性的核心参数，三者密切相关且共同决定了系统的基本运行效果。比表面积直接影响微生物附着与污染物吸附容量；渗透系数决定水流通过能力，影响湿地水力负荷与停留时间；堵塞系数则综合反映基质在长期运行中保持渗透性的能力，与前两者密切相关。而不均匀系数（ $C_u$ ）和曲率系数（ $C_c$ ）主要描述填料级配和颗粒分布，更侧重于初期填充结构的优化，可根据具体工程对均匀性和过滤精度的要求选择性使用。

$$S_{total} = \omega_{P_c} \times S_{P_c} + \omega_{C_u} \times S_{C_u} + \omega_{C_c} \times S_{C_c} + \omega_{S_s} \times S_{S_s} + \omega_{C_f} \times S_{C_f} \dots\dots\dots (15)$$

式中：  
 $S_{total}$  ——基质物理性质综合得分；  
 $\omega_{P_c}$ 、 $\omega_{C_u}$ 、 $\omega_{C_c}$ 、 $\omega_{S_s}$ 、 $\omega_{C_f}$  ——各指标权重值，取值范围见表3和表4。

表 3 基质物理性质短期（1-3 年）评价指标权重取值范围及场景建议

评价指标	权重范围	适用场景
------	------	------

渗透系数 $P_c$	$\omega_{P_c} = 0.3\sim 0.40$ (必选)	适用于水力负荷高或易堵塞场景；提高权重可优先保障系统的渗透性能与运行稳定性，是防堵塞设计的核心
比表面积 $S_s$	$\omega_{S_s} = 0.30\sim 0.50$ (必选)	适用于以污染物深度去除(尤其是通过生物膜作用)为主要目标的场景；提高权重可优先选择富微生物附着点的基质，提升脱氮除磷效能
堵塞系数 $S_{C_f}$	$\omega_{C_f} = 0.15\sim 0.30$ (必选)	是预测和延缓堵塞的关键，短期运行可降低其权重分配

表 4 基质物理性质长期 (3 年以上) 评价指标权重取值范围及场景建议

评价指标	5种建议权重范围	4种建议权重范围	3种建议权重范围	适用场景
渗透系数 $P_c$	$\omega_{P_c} = 0.25\sim 0.40$ (必选)	$\omega_{P_c} = 0.30\sim 0.40$ (必选)	$\omega_{P_c} = 0.25\sim 0.40$ (必选)	适用于水力负荷高或易堵塞场景；提高权重可优先保障系统的渗透性能与运行稳定性，是防堵塞设计的核心
不均匀系数 $C_u$	$\omega_{C_u} = 0.10\sim 0.20$	$\omega_{C_u} = 0.10\sim 0.20$	\	适用于对基质透水性有首要要求的场景；提高权重可筛选出透水能力更佳的基质组合，减少水流阻力
曲率系数 $C_c$	$\omega_{C_c} = 0.10\sim 0.20$	$\omega_{C_c} = 0.10\sim 0.20$	\	适用于对基质过滤精度与水质净化效果要求更高的场景；提高权重可优化基质的级配连续性，增强对悬浮物的截留能力
比表面积 $S_s$	$\omega_{S_s} = 0.25\sim 0.30$ (必选)	$\omega_{S_s} = 0.25\sim 0.40$ (必选)	$\omega_{S_s} = 0.25\sim 0.40$ (必选)	适用于以污染物深度去除(尤其是通过生物膜作用)为主要目标的场景；提高权重可优先选择富微生物附着点的基质，提升脱氮除磷效能
堵塞系数 $S_{C_f}$	$\omega_{C_f} = 0.20\sim 0.30$ (必选)	$\omega_{C_f} = 0.20\sim 0.30$ (必选)	$\omega_{C_f} = 0.30\sim 0.40$ (必选)	适用于对系统寿命和运维成本有严苛要求的场景；提高权重可直接关联长期运行可靠性，是预测和延缓堵塞的关键

表 5 人工湿地基质物理性质等级划分

基质性能综合得分范围	等级	等级描述
(70,100]	优	基质性能优秀，污染物去除效率高，负荷能力和动力学响应均表现良好，适用于人工湿地系统大规模应用
(40,70]	良	基质性能一般，需结合运行条件进行调整优化以提升处理效能，适用于特定场景的人工湿地应用
[0,40]	劣	基质性能较差，需对人工湿地的设计或运行条件进行重大调整以改善系统性能

## 5 基质化学性质筛选

### 5.1 总则

对人工湿地系统基质筛选进行化学性质量化分析，通过人工湿地基质的化学成分、矿物组成、表面官能团、水质理化分析、环境安全性分析不同基质的性能，以这些指标为核心，通过定量指标分析基质性能，筛选适合的湿地基质。若基质的化学指标超出实验室检测能力，应委托第三方检测机构进行测定。

### 5.2 化学性质指标筛选

#### 5.2.1 化学成分与矿物组成

通过X射线荧光光谱(XRF)、X射线衍射(XRD)等手段，明确基质的主要化学成分及晶体矿物组成。常见基质的典型成分与矿物特征见表6。

表 6 常见人工湿地基质化学成分与矿物组成特征

基质类型	基质名称	主要化学成分	主要矿物组成	阳离子交换容量(CEC)/(cmol/kg)	特征描述
传统基质	砾石	$SiO_2$ 、 $CaCO_3$ 等	石英、方解石等	极低(<5)	化学性质稳定，结构致密，提供主要的物理过滤和微生物附着载体作用

传统基质	沸石	SiO <sub>2</sub> 、Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 、CaO、K <sub>2</sub> O等	斜发沸石、丝光沸石等	极高(100~400)	硅铝酸盐骨架结构,具有阳离子交换能力,对铵根离子(NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> )有特异性吸附
电子供体基质	黄铁矿	FeS <sub>2</sub>	黄铁矿	低(5~10)	富含铁、硫元素,可作为自养反硝化的电子供体,并具有化学除磷潜力
电子供体基质	PHBV	(C <sub>6</sub> H <sub>10</sub> O <sub>5</sub> ) <sub>n</sub>	高分子聚合物,具有晶体和非晶区	可忽略	一种可生物降解的聚合物,作为固态碳源,通过缓慢释放有机物驱动异养反硝化过程
电子供体基质	硫自养填料	S <sup>0</sup> (单质硫)	斜方晶系硫	极低(<5)	作为硫自养反硝化的电子供体,用于低碳氮比水体的硝酸盐去除
吸附性基质	生物炭	C(固定碳),以及K、Ca、Mg等灰分元素	高度无序的无定形碳结构	中至高(10~100+)	孔隙结构发达,比表面积大,表面富含含氧官能团,具有优异的物理吸附和离子交换能力

### 5.2.2 表面官能团

通过傅里叶变换红外光谱 (FTIR) 分析基质表面官能团。官能团种类影响基质的表面电荷、亲疏水性及与污染物的结合能力。常见基质表面官能团类型见表7。基质表面官能团应按GB/T 22571的方法测定。

表7 常见基质表面官能团类型

序号	基质类型	表面官能团类型
1	砾石	C-H、C-O、C=O、-OH等
2	沸石	-OH等
3	黄铁矿	C-O等
4	PHBV	-CH <sub>2</sub> 、C-O、C=O、-OH、C-H等
5	硫自养填料	-CH <sub>2</sub> 、-SH、C=O、-OH等
6	生物炭	C=C/C=O、C-O、-OH、-CH <sub>2</sub> 、C-H等

### 5.2.3 水质理化分析

5.2.3.1 按照 HJ 2005 规定对出水氮、磷浓度有较高要求时,应选用功能性基质。宜通过量化评估污染物去除率来分析并比较不同基质对总氮 (TN)、总磷 (TP) 的去除性能。不同人工湿地污染物去除效率可参考 DB11/T 1376。

5.2.3.2 人工湿地处理效能应综合考虑湿地的处理效率及其水力学参数,相关参数应该根据人工湿地设计时的主要参数进行适当调整,推荐评估指标见表8。水质监测记录表可参见表 A.2。

表8 人工湿地水质处效能评估

目标层	指标层
处理效能	污染物去除率
	污染物去除负荷
	污染物去除速率常数

5.2.3.3 污染物去除率计算见公式 (16)。

$$RE = (C_{in} - C_{out}) / C_{in} \times 100\% \quad (16)$$

式中:

RE —— 污染物去除率的数值, %;

C<sub>in</sub> —— 进水污染物浓度的数值, mg/L;

C<sub>out</sub> —— 出水污染物浓度的数值, mg/L。

### 5.2.4 环境安全性

基质不应向水体中释放有毒有害物质。在使用前，应按照GB 5085.3等相关标准对基质进行浸出毒性试验，确保其重金属（如Pb、Cd、Cr、As、Hg等）及其他有害物质的浸出浓度低于限值。

### 5.3 计算方法

#### 5.3.1 化学成分与矿物组成得分计算方法

##### 5.3.1.1 阳离子交换容量得分计算公式

阳离子交换容量是衡量基质通过离子交换作用去除铵根离子（ $\text{NH}_4^+$ ）和重金属离子能力的关键指标，评分方法见公式（17）。

$$S_{\text{CEC}} = \begin{cases} 100 & (\text{CEC} \geq 100) \\ 20 + 0.8 \times \text{CEC} & (20 \leq \text{CEC} < 100) \\ 20 & (\text{CEC} < 20) \end{cases} \dots\dots\dots (17)$$

式中：

$S_{\text{CEC}}$  ——实测基质阳离子交换容量得分；

$\text{CEC}$  ——阳离子交换容量， $\text{cmol/kg}$ 。

##### 5.3.1.2 钙/铁/铝含量（针对脱氮除磷功能）得分计算公式

基质中钙、铁、铝元素氧化物的总含量是其化学脱氮除磷能力的核心指标，得分计算公式（18）。

$$S_G = \begin{cases} 100 & (\text{CaO} + \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{Al}_2\text{O}_3) \geq 20\% \\ 10 + 4.5 \times 100 \times (\text{CaO} + \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{Al}_2\text{O}_3) & 5\% \leq (\text{CaO} + \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{Al}_2\text{O}_3) < 20\% \\ 10 & (\text{CaO} + \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{Al}_2\text{O}_3) < 5\% \end{cases} \dots\dots\dots (18)$$

式中：

$S_G$  ——钙/铁/铝氧化物含量得分。

##### 5.3.1.3 化学成分与矿物组成总得分

基质化学成分与矿物组成总得分计算见公式（19）。

$$S_h = S_{\text{CEC}} \times 0.5 + S_G \times 0.5 \dots\dots\dots (19)$$

式中：

$S_h$  ——化学成分与矿物组成总得分。

#### 5.3.2 表面官能团得分计算方法

表面官能团得分计算公式（20）。

$$S_{\text{FG}} = \begin{cases} 100 & \text{识别出的特征官能团种类} \geq 4 \text{类} \\ 70 & \text{识别出的特征官能团种类} = 3 \text{类} \\ 40 & \text{识别出的特征官能团种类} = 2 \text{类} \\ 10 & \text{识别出的特征官能团种类} < 2 \text{类} \end{cases} \dots\dots\dots (20)$$

式中：

$S_{\text{FG}}$  ——表面官能团得分。

#### 5.3.3 水质理化性质得分计算方法

水质理化性质得分计算见公式（21）。

$$S_q = \begin{cases} 100 & \text{TN、TP 去除率} > 75\% \\ 60 & 60\% < \text{TN、TP 去除率} \leq 75\% \\ 30 & 20\% < \text{TN、TP 去除率} \leq 60\% \\ 0 & \text{TN、TP 去除率} \leq 20\% \end{cases} \dots\dots\dots (21)$$

式中：

$S_q$  ——水质理化性质得分；

#### 5.3.4 环境安全性得分计算方法

环境安全性得分方法见公式（22）、（23）。

$$P = C_1/L_1 + C_2/L_2 + \dots + C_n/L_n \dots\dots\dots (22)$$

式中：

- P ——环境风险等级（风险极低、风险低、风险可控、风险不可控）；
- C ——污染物实测浓度；
- L ——GB 5085.3标准限值；
- 1, 2, …n ——污染物种类序号。

$$S_{safe} = \begin{cases} 100 & P \leq 0.5 \\ 150 - P & 0.5 < P \leq 0.8 \\ 120 - 50 \times P & 0.8 < P \leq 1.0 \\ 0 & P > 1.0 \end{cases} \dots\dots\dots (23)$$

式中：

- P ——环境风险等级（风险极低、风险低、风险可控、风险不可控）；
- S<sub>safe</sub> ——环境安全性得分。

#### 5.4 筛选结果

根据基质的化学成分、表面官能团、水质理化性质及环境安全性进行综合评估，基质成分综合得分为上述各项指标得分的加权求和，化学指标可以根据运行期限和目标要求选出3~4种进行评估，保证各部分权重之和为1。计算公式见公式（24），基质化学性质等级划分见表9。

$$S_{Composition} = w_1 \times S_h + w_2 \times S_{FG} + w_3 \times S_q + w_4 \times S_{safe} \dots\dots\dots (24)$$

式中：

- S<sub>Composition</sub> ——基质化学性质综合得分；
- w<sub>1</sub>、w<sub>2</sub>、w<sub>3</sub>、w<sub>4</sub> ——各指标权重值，取值范围见表9和10。

表9 化学性质短期（1-3年）评价指标权重配置

评价指标	脱氮优先	除磷优先	综合处理
化学成分(w <sub>1</sub> )	0.35~0.50	0.20~0.30	0.30~0.45
表面官能团(w <sub>2</sub> )	0.20~0.30	0.35~0.50	0.30~0.45
水质理化性质(w <sub>3</sub> )	0.20~0.30	0.20~0.30	0.15~0.25
环境安全性(w <sub>4</sub> )	0.10~0.20	0.10~0.20	0.15~0.25

表10 化学性质长期（3年以上）评价指标权重配置

评价指标	脱氮优先	除磷优先	综合处理
化学成分(w <sub>1</sub> )	0.35~0.45	0.15~0.25	0.25~0.35
表面官能团(w <sub>2</sub> )	0.15~0.25	0.35~0.45	0.25~0.35
水质理化性质(w <sub>3</sub> )	0.15~0.25	0.15~0.25	0.15~0.25
环境安全性(w <sub>4</sub> )	0.15~0.25	0.15~0.25	0.20~0.30

表11 人工湿地基质化学性质等级划分

基质化学性质综合评分范围	等级	等级描述
(80,100]	优	基质化学成分优异，目标污染物去除潜力大，表面性质活跃，环境安全性高
(60,80]	良	基质化学成分良好，能满足处理需求，环境风险低，适合实际应用
(40,60]	中	基质化学成分一般，需与其他基质组合使用或适用于特定场景，环境风险可控
(20,40]	差	基质化学成分功能性较差，环境风险较高，不建议优先使用
[0,20]	劣	基质化学成分不适宜，或环境风险不可接受，禁止使用

## 6 基质经济指标筛选

### 6.1 总则

对人工湿地系统基质的筛选进行经济量化分析，通过所需基质的净现值、成本效益、全生命周期成本、专家评分等方面综合分析不同基质的经济性，以这些指标为核心，筛选经济适合的基质。

## 6.2 经济指标筛选

### 6.2.1 成本效益

成本效益用于分析基质的投入与产出比。计算公式见公式（25）。

$$BCR = \frac{Bt}{C_0 + t \times C_1} \dots\dots\dots (25)$$

式中：

BCR——成本效益比，当BCR>1时，表明项目总效益大于总成本，经济性良好；比值越高，经济性越优；

B ——基质使用过程中每年产生的经济效益；C ——基质的综合成本，包括初始投资C<sub>0</sub>和运维成本C<sub>1</sub>。

t ——年份序号（从1到T）；

### 6.2.2 全生命周期成本

全生命周期成本分析涵盖基质从采购到废弃的全流程成本，包括：生产与运输成本、使用期间的运维成本。计算公式见公式（26）。

$$LCC_{PV} = C_{in} + (C_{op} + C_{ma}) \times t \dots\dots\dots (26)$$

式中：

LCC<sub>PV</sub> ——全生命周期总成本，元；

C<sub>in</sub> ——初始投资成本，包括基质采购运输成本（C<sub>p</sub>）与安装成本（C<sub>i</sub>），按表A.3中方法计算，元；

C<sub>op</sub> ——每年的平均运营成本，主要为系统运行每年的平均能耗费用（C<sub>e</sub>），按表A.3中方法计算，元；

C<sub>ma</sub> ——每年的平均的维护成本，包括定期维护费用（C<sub>m</sub>）和基质更换费用（C<sub>r</sub>），按本表A.3中方法计算，元；

t ——运行年份；

### 6.2.3 专家评分

在数据不足或定量分析受限时，可组织专家采用打分或模糊综合评价方法，结合实际情况对基质的经济性进行综合打分。专家评分方法如下。

——组建专家组：专家组应由至少5名在水处理、环境工程或材料经济领域具有高级职称或十年以上经验的专家组成。

——定性评估：专家依据表A.3中的定性指标（如“可再生/循环利用性”、“废弃基质市场价值”），结合自身经验，对基质的经济性进行“优、良、中、差”四级评价。

——成本合理性评估：专家对供应商提供的报价与市场同类产品进行比对，评估其初始投资成本的合理性。

——形成结论：采用记名或匿名投票方式。当超过三分之二（含）的专家给出“良”及以上评价，且无“差”评时，可认定该基质“原则上通过经济性评估”。专家评估报告应作为项目文件存档备查。

## 6.3 计算方法

### 6.3.1 成本效益得分计算方法

成本效益得分计算方法见公式（27）。

$$S_{BCR} = \begin{cases} 0 & BCR \leq 0.2 \\ 100 \times \frac{BCR-0.2}{1.3} & 0.2 < BCR < 1.5 \\ 100 & BCR \geq 1.5 \end{cases} \dots\dots\dots (27)$$

式中：

BCR——成本效益比；  
 $S_{BCR}$ ——基质成本效益得分。

### 6.3.2 全生命周期成本得分计算方法

全生命周期成本分析评分计算公式见公示（28）。

$$S_{LCC} = \max\{0, 100 \times K \times (1 - \frac{LCC_{PV}}{LCC_{bench}})\} \quad (28)$$

式中：

$S_{LCC}$ ——基质全生命周期成本效益得分；  
 $LCC_{bench}$ ——基准方案的生命周期成本，1000元；  
 $LCC_{PV}$ ——按净现值计算的全生命周期总成本，元。  
 $K$ ——调节系数， $K$ 取0.8。

### 6.3.3 专家评估法得分计算方法

未采用经济型计算方法时，可用专家评分法进行打分评价，确保经济的合理性。  
 专家评分法计算公式见公示（29）。

$$S_{Exp} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N E_i \quad (29)$$

式中：

$S_{Exp}$ ——专家打分算数平均值；  
 $N$ ——专家人数；  
 $E_i$ ——第*i*位专家的打分（百分制）。

### 6.4 筛选结果

使用成本效益分析和全生命周期成本分析法两种经济型计算方法或使用专家评估法代替经济型计算分析对湿地基质进行综合筛选，基质经济指标可以根据运行期限和目标进行权重分配，综合得分为上述各项指标得分的加权求和，计算见公式（30），基质经济性等级划分见表11。

$$S_{CES} = (S_{BCR} \times W_B) + (S_{LCC} \times W_L) \quad (30)$$

式中：

$S_{CES}$ ——基质经济筛选综合得分；  
 $W_B$ 、 $W_L$ ——各参数权重值，取值范围见表12。

表 12 基质经济指标权重取值范围及场景建议

评价指标	运行时间1-2年(人工湿地基质运行期)	运行时间3-8年(人工湿地基质稳定期)	运行时间9-15年(人工湿地基质老化期)
	成本效益比权重 ( $W_B$ )	0.6	0.4
全生命周期成本权重 ( $W_L$ )	0.4	0.6	0.7

注：不同时期权重设置依据：  
 ——在运行期，策略核心在于投资优化，追求最高的成本效益比，以确保初始资本配置的效率；  
 ——进入稳定期，管理重心应转移至对运维成本结构的精细化控制，以实现稳定的经济运行；  
 ——进入老化期，策略着眼于长远战略规划，将决策的根本出发点置于全生命周期总成本的最小化之上，为更新或退出决策提供财务依据。

表 13 基质经济性等级划分

基质经济性综合评分范围	等级	等级描述
(80,100]	优	基质经济性非常突出，强烈推荐实施
(60,80]	良	基质经济性良好，建议采纳
(40,60]	中	基质经济性一般，建议优化方案或谨慎采纳
(20,40]	差	基质经济性刚达底线，存在风险，需充分论证
[0,20]	劣	基质经济性差，不建议采纳

## 7 综合筛选

7.1 根据物理性质指标筛选、化学性质指标筛选及经济指标筛选三部分性能指标进行综合得分分析，明确最佳基质，技术流程图和技术路线图分别见图 1 和图 2。

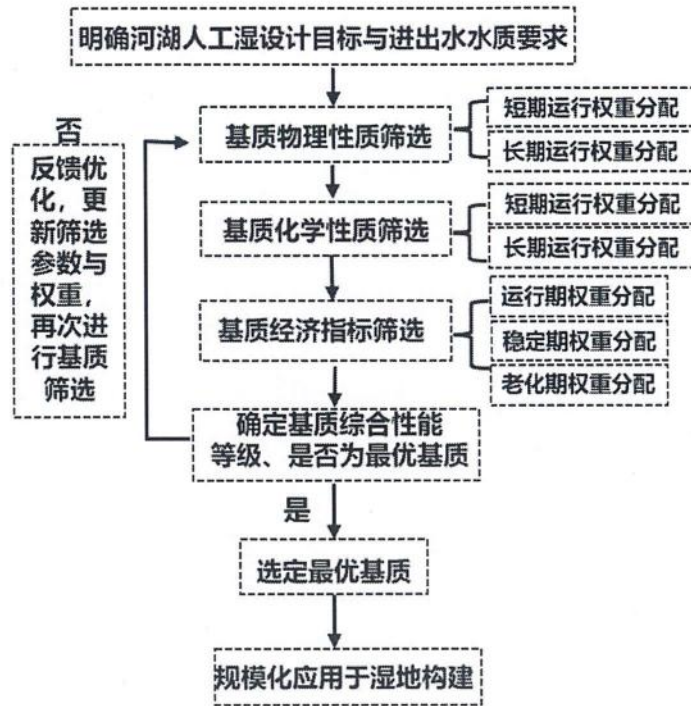


图 1 河湖人工湿地基质筛选技术规范技术流程图

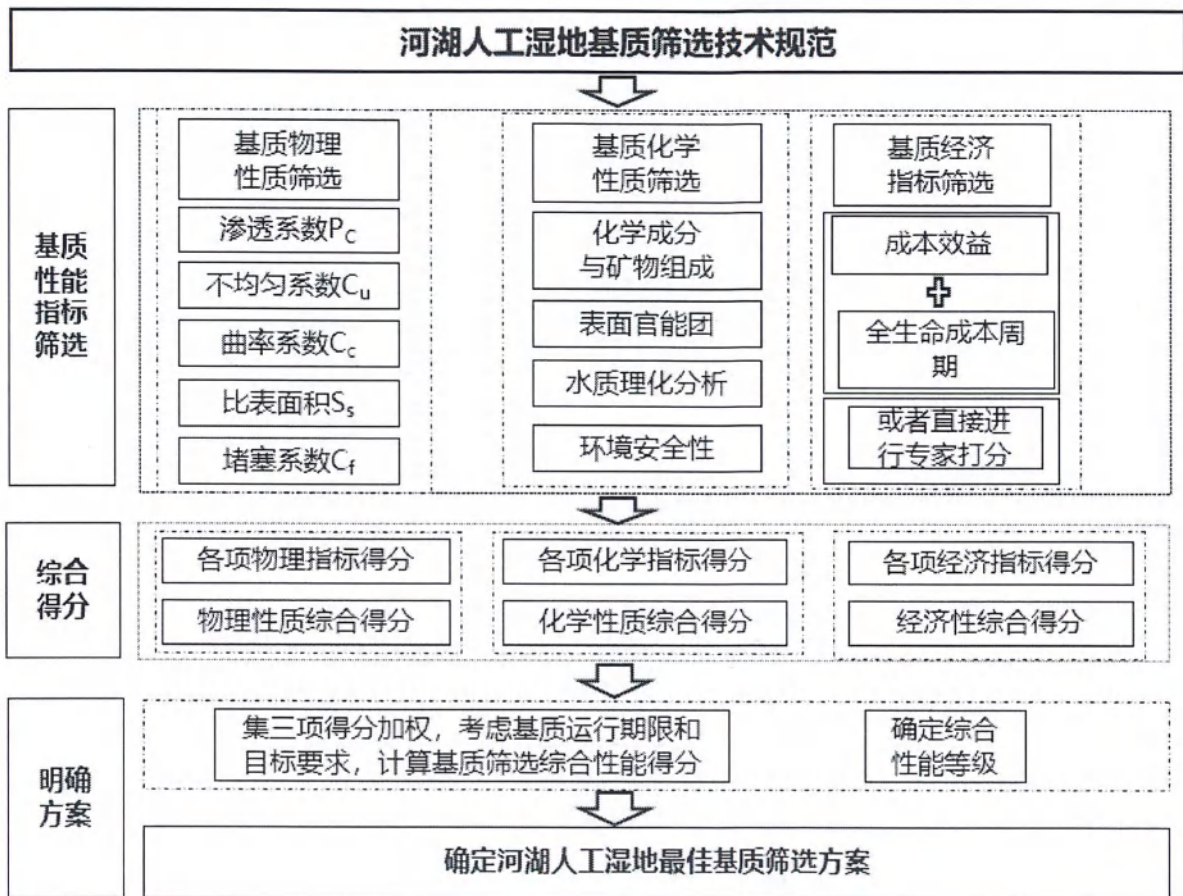


图 2 河湖人工湿地基质筛选技术规范技术路线图

7.2 根据物理性质指标筛选、化学性质指标筛选及经济指标筛选三部分得分进行加权平均, 得到处理效能综合得分, 计算见公式 (31), 得分结果可参考表 15。

$$S_{\text{总}} = W_t \times S_t + W_c \times S_c + W_j \times S_{CES} \quad (31)$$

式中:

$S_{\text{总}}$  ——基质综合性能得分;

$S_t$  ——物理性质筛选得分;

$S_c$  ——化学性质筛选得分;

$S_{CES}$  ——经济筛选得分;

$W_t, W_c, W_j$  ——物理性质、化学性质和经济指标的权重值,  $W_t + W_c + W_j = 1$ 。

对于出水的水质要求目标较为严格时, 化学性质权重建议取值0.40、物理性质权重建议取值0.40、经济性权重建议取值0.20; 考虑综合处理效果时, 化学性质权重建议取值0.35、物理性质权重建议取值0.35、经济性权重建议取值0.3; 考虑经济成本时, 经济性权重建议取值0.45、物理性质权重建议取值0.3、化学性质权重建议取值0.25; 取值范围见表14。

表 14 基质综合性能权重取值范围及场景建议

权重指标	建议取值范围	权重依据	适用场景
物理性质权重 ( $W_t$ )	0.2~0.4	当进水悬浮物高, 基质极易导致堵塞时取高值0.4; 低负荷、以景观或生态功能为主的系统, 对水力效率要求不高取低值0.2; 大多数综合性、多目标取中值0.33。	适用于对系统长期稳定运行和防堵塞能力要求极高的场景; 例如, 高负荷污水处理、地下潜流湿地等, 将物理稳定性和水力传导性作为首要考量
化学性质权重 ( $W_c$ )	0.2~0.4	以有机污染和生化过程为主取低值0.2; 出水总磷、总氮或重金属指标极其严格取高值0.4; 多污染物协同去除取中值0.3。	适用于以特定污染物深度净化为核心目标的场景; 例如, 旨在高效脱氮除磷、或需要基质具备强吸附/反应活性的工程, 应优先保障

			其化学功能
经济性权重 ( $W_j$ )	0.2~0.4	成本是项目启动和推广的首要决定因素，取值高值0.4；更注重长期生态效益和形象价值时取低值0.2；在效果与成本间寻求最佳性价比时取中值0.3。	适用于项目预算严格、对运行成本敏感的场景；例如，大型项目或偏远地区的推广项目，需要在保证基本性能的前提下，优先考虑基质的可获得性与全生命周期成本

表 15 人工湿地基质综合效能等级划分

处理效能综合评分范围	等级	等级描述
(70,100]	优	基质性能优秀，适宜用于人工湿地系统大规模应用
(40,70]	良	基质性能一般，适用于特定场景的人工湿地应用
[0,40]	劣	基质性能较差，需对人工湿地的设计或运行条件进行重大调整以改善系统性能

附录 A  
(资料性)  
人工湿地基质筛选信息表

表A.1~A.2给出了人工湿地基质理化性质基础信息记录表、水质监测记录表的格式，表A.3给出了人工湿地经济评价指标。

表 A. 1 人工湿地基质理化性质基础信息记录表

检测方式	基质	BET比表面积 /m <sup>2</sup> ·g <sup>-1</sup>	参考值	平均孔径 /nm	参考值
BET表征	砾石		4.1268		1.9780
	生物炭		460.6248		2.0340
	基质	官能团		参考值	
FTIR表征	硫自养填料			-SH和-OH	
	黄铁矿			C-O和Fe-O	
	生物炭			C=C/C=O、C-O、-OH、-CH <sub>2</sub> 、 C-H等	
	PHBV			C-H、C=O、C-O、C=C和quinone C=O	
	砾石			C-O和-OH	
	基质	衍射峰位置		参考值	
XRD表征	硫自养填料			15.36°、23.09°、25.80°和 51.19°	
	黄铁矿			28.52°、33.03°、37.01°、 40.75°、47.46°、56.29°和 64.27°	
	生物炭			16.89°、23.17°和25.30°	
	PHBV			17.65°、20.62°、29.37°和 45.85°	
	砾石			13.66°、23.68°、27.76°、 20.80°和41.58°	
	基质	表征结果		参考值	
SEM-EDS表征	硫自养填料			表面规整、光滑，孔径较大 附着生物膜较为密集 S元素含量高	
	砾石			Ca、Si元素含量高，其主要组 分为SiO <sub>2</sub> 、CaCO <sub>3</sub>	
	生物炭			表面更粗糙，内部空隙发达， 呈不规则状形状 附着生物膜较为密集 C元素含量较高	

记录：

校核：

表 A.2 水质监测记录表

工程名称:		记录日期:		
指标	基质	去除率记录值	去除率参考值	备注
TN	砾石		67.0±5.2%	参考值为HRT=3d, TN浓度20.82±0.50 mg/L的进水条件下的去除率
	沸石		55.0±5.2%	
	黄铁矿		88.4±2.3%	
	PHBV		85.7±3.5%	
	硫自养填料		80±2.2%	
	生物炭		94.0±2.2%	
NH <sub>3</sub> -N	砾石		88.6±3.5%	参考值为HRT=3d, NH <sub>3</sub> -N浓度15.23±0.25 mg/L的进水条件下的去除率
	沸石		90.0±5.2%	
	黄铁矿		92.6±4.5%	
	PHBV		85.7±3.5%	
	硫自养填料		55.5±4.5%	
	生物炭		87.6±5.3%	
TP	砾石		61.4±15.5%	参考值为HRT=3d, TP浓度1.01±0.02 mg/L的进水条件下的去除率
	沸石		40.0±5.2%	
	黄铁矿		91.36±2.5%	
	PHBV		62.4±12.5%	
	硫自养填料		30.3±5.1%	
	生物炭		81.9±3.5%	
COD	砾石		63.63±2.3%	参考值为HRT=3d, COD浓度60.81±0.55 mg/L的进水条件下的去除率
	沸石		75.0±5.2%	
	黄铁矿		39.5±2.5%	
	PHBV		-63.1±15.5%	
	硫自养填料		53.5±2.5%	
	生物炭		74.2±3.4%	

记录:

校核:

表 A.3 人工湿地经济评价指标

评价指标类型	评价指标名称	指标性质	计算方法
初始投资成本	基质采购成本	定量	$C_p = P \times V$ 式中： $C_p$ ——基质采购总成本，元； $P$ ——基质单位体积（或质量）价格，元/ $m^3$ （或元/t）； $V$ ——基质需求总体积（或质量）， $m^3$ （或t）。
	基质安装成本	定量	$C_i = C_k + C_a + C_o$ 式中： $C_i$ ——基质安装总成本，元； $C_k$ ——运输费用，元； $C_a$ ——人工铺设费用，元； $C_o$ ——其他相关费用（如机械台班费），元。
运维成本	定期维护费用	定量	$C_m = \sum_{i=1}^n C_{mi}$ 式中： $C_m$ ——年定期维护总费用，元/年； $C_{mi}$ ——各项维护活动（如冲洗、清理）的 单次费用，元。
	更换费用	定量	$C_r = (C_p + C_i)/L$ 式中： $C_r$ ——年均基质更换费用，元/年； $L$ ——基质使用寿命，年。 注：此公式为简化计算，未考虑贴现率。
	能耗费用	定量	$C_e = P_{eq} \times T \times E_p$ 式中： $C_e$ ——年能耗费用，元/年； $P_{eq}$ ——系统运行功率，kW； $T$ ——年运行时间，h/年； $E_p$ ——电价，元/(kW·h)。
基质使用寿命	物理寿命	定量	$L_p = M_0/M_1$ 式中： $L_p$ ——基于磨损的物理寿命，年； $M_0$ ——基质初始质量，kg； $M_1$ ——年均磨损损失质量，kg/年。
	化学寿命	定量	$L_c = (Q_s \times V \times \rho)/L_r$ 式中： $L_c$ ——基于污染物饱和的化学寿命，年； $Q_s$ ——基质对目标污染物的饱和吸附容量，mg/g； $\rho$ ——基质堆积密度， $kg/m^3$ ； $L_r$ ——系统对目标污染物的年负荷，kg/年。
资源回收利用	基质是否可再生利用或循环利用。	定性	分级标准： 高：基质可通过简单反冲洗、曝气等原位再

价值			生, 且吸附/处理性能恢复率 $\geq 85\%$ 。 中: 基质需通过化学浸泡、高温焚烧等复杂工艺再生, 且性能恢复率在50%~85%之间。 低: 再生成本过高或再生后性能恢复率 $< 50\%$ , 基本不可再生。
	废弃基质是否具备市场价值, 例如用作建筑材料或土壤改良剂。	定性	分级标准: 高: 废弃基质无需或经简单处理后即可作为建筑材料、土壤改良剂等直接销售, 产生净收益。 中: 废弃基质需支付一定成本进行处理, 但处理后可作为填料等低价值材料利用, 基本实现收支平衡。 低: 废弃基质被认定为危险废物或处理成本高昂, 需支付额外费用进行安全处置。
综合效益分析	单位污染物去除成本	定量	$C_{unit} = C_{total} / M_{remove}$ 式中: $C_{unit}$ ——单位污染物去除成本, 元/kg; $C_{total}$ ——年总成本(包括投资折旧、运维、能耗等), 元/年; $M_{remove}$ ——年污染物去除总量, kg/年。
	长期成本效益比	定量	$BCR = PV(B) / PV(C)$ 式中: BCR ——成本效益比; $PV(B)$ ——项目生命周期内总效益的现值(包括直接经济效益和间接环境效益折算), 元; $PV(C)$ ——项目生命周期内总成本的现值, 元。

## 附录 B

(资料性)

### 河湖人工湿地基质筛选技术研究案例

#### B.1 概述

本案例研究人工湿地短期运行内生物炭和硫自养2种不同基质在污水厂尾水和黑臭河道河水的进水条件下,人工湿地基质对TN的去除效果,对硫自养填料和生物炭两种人工湿地基质进行了系统性综合评估,筛选出处理效果好、经济型效果较好的基质。

#### B.2 基质物理性质筛选

##### B.2.1 筛选指标确定

本案例分别对基质渗透系数  $P_c$ 、不均匀系数  $C_u$ 、比表面积  $S_s$  三个物理方面的性质进行综合分析,权重因子按照表 3 分别取  $\omega_{P_c} = 0.4$ 、 $\omega_{C_u} = 0.3$ 、 $\omega_{S_s} = 0.3$ 。

##### B.2.2 渗透系数得分

硫自养填料和生物炭基质的渗透系数及得分见表B.1。

表 A.4 各基质渗透系数及得分

基质类型	基质名称	基质样品的实测渗透系数值 $P_c$	渗透系数得分 $S_{Pc}$
电子供体基质	硫自养填料	0.05	$100 \times (0.05-0.01) / 0.09=44.44$
吸附性基质	生物炭	0.5	100

##### B.2.3 不均匀系数得分

硫自养填料和生物炭基质的不均匀系数及得分见表B.2。

表 A.5 各基质不均匀系数及得分

基质类型	基质名称	基质样品的实测不均匀系数 $C_u$	不均匀系数得分 $S_{Cu}$
电子供体基质	硫自养填料	2.0	$100 \times (1-0.5/2.5) =80$
吸附性基质	生物炭	2.5	100

##### B.2.4 比表面积得分

硫自养填料和生物炭基质的比表面积及得分见表B.3。

表 A.6 各基质比表面积及得分

基质类型	基质名称	基质样品比表面积 $S_s$	比表面积得分 $S_{Ss}$
电子供体基质	硫自养填料	23.61	$100 \cdot 23.61/50=47.22$
吸附性基质	生物炭	35.78	$100 \cdot 35.78/50=71.56$

##### B.2.5 基质物理性质筛选总得分

硫自养填料和生物炭基质的物理性质筛选总得分分别见公式 (B.1) 和公式 (B.2)。

$$S_{totals} = 44.44 \times 0.4 + 80 \times 0.3 + 47.22 \times 0.3 = 55.942 \dots\dots\dots (B.1)$$

$$S_{totalc} = 100 \times 0.4 + 100 \times 0.3 + 71.56 \times 0.3 = 91.468 \dots\dots\dots (B.2)$$

式中:

$S_{totals}$ ——硫自养填料基质物理性质综合得分;

$S_{totalc}$ ——生物炭基质物理性质综合得分。

### B.3 基质化学性质筛选

#### B.3.1 筛选指标确定

本案例分别对基质化学成分与矿物组成 $S_h$ 、表面官能团 $S_{FG}$ 、水质理化性质 $S_q$ 环境安全 $S_{safe}$  4个物理方面的性质进行综合计算得分, 权重因子按照表9分别取 $w_1=0.45$ ,  $w_2=0.2$ ,  $w_3=0.2$ ,  $w_4=0.15$ 。

#### B.3.2 化学成分与矿物组成得分

硫自养填料和生物炭基质的化学成分与矿物组成得分见表B.4。

表 A. 7 各基质化学成分与矿物组成得分

基质类型	基质名称	主要化学成分	CaO + Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	主要矿物组成	阳离子交换容量 (CEC)/ (cmol/kg)	化学成分与矿物组成得分 $S_h$
电子供体基质	硫自养填料	S <sup>0</sup> (单质硫)	0	斜方晶系硫	极低(<5)	$S_{CEC} \times 0.5 + S_G \times 0.5 = 20 \times 0.5 + 10 \times 0.5 = 15$
吸附性基质	生物炭	C (固定碳), 以及 K、Ca、Mg 等灰分元素	10%	高度无序的无定形碳结构	>100	$S_{CEC} \times 0.5 + S_G \times 0.5 = 100 \times 0.5 + (10 + 4.5 \times 10) \times 0.5 = 82.5$

#### B.3.3 表面官能团得分

硫自养填料和生物炭基质的表面官能团见图B.1, 得分见表B.5。

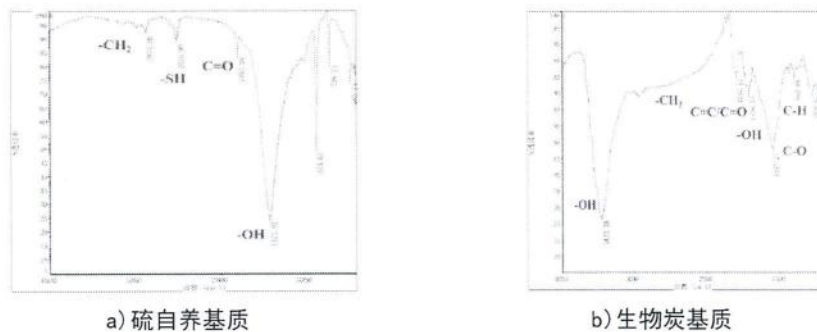


图 A. 1 硫自养基质和生物炭基质表面官能团

表 A. 8 各基质表面官能团数量及得分

基质类型	基质名称	表面官能团数量	表面官能团得分 $S_{FG}$
电子供体基质	硫自养填料	4	100

吸附性基质	生物炭	6	100
-------	-----	---	-----

### B.3.4 水质理化性质得分

硫自养填料和生物炭基质的水质理化性质得分见表B.6。

表 A.9 不同基质 TN、TP 去除率及水质理化性质得分

应用场景	基质名称	TN 去除率	TP 的去除率	水质理化性质得分 $S_q$
污水厂尾水	CW-硫自养填料	61.66±3.08%	61.35±3.07%	60
吸附性基质	CW-生物炭	78.17±3.91%	74.62±3.73%	100

### B.3.5 环境安全性得分

生物炭基质长期运行出水水质稳定达标，间接证明了在实验周期内未发生显著的二次污染，故  $S_{safec}=100$ 。

硫自养基质的环境风险较高且复杂，主要表现为出水硫酸盐积累、系统酸化、产生有毒  $H_2S$  气体以及 DNRA 导致氨氮升高，故  $S_{safes}=60$ 。

### B.3.6 基质化学性质筛选总得分

硫自养填料和生物炭基质的化学性质筛选总得分分别见公式 (B.3) 和公式 (B.4)。

$$S_{Compositions} = 0.45 \times 15 + 0.2 \times 100 + 0.2 \times 60 + 0.15 \times 60 = 47.75 \dots \dots \dots (B.3)$$

$$S_{Compositionc} = 0.45 \times 82.5 + 0.2 \times 100 + 0.2 \times 100 + 0.15 \times 100 = 92.125 \dots \dots \dots (B.4)$$

式中：

$S_{Compositions}$  ——硫自养填料基质化学性质综合得分；

$S_{Compositionc}$  ——生物炭基质化学性质综合得分。

## B.4 基质经济性筛选

### B.4.1 筛选指标确定

本案例分别对基质的成本效益比 ( $S_{BCR}$ )、全生命周期成本 ( $S_{LCC}$ ) 两个方面的性质进行综合分析，权重因子按照表12分别取  $W_B=0.6$ ， $W_L=0.4$ 。

### B.4.2 基质成本效益得分

硫自养填料和生物炭基质的成本效益得分见表B.7。

表 A.10 各基质成本效益得分

基质类型	基质名称	基质平均每年经济效益 $B_t$	初始成本 $C_0$	运维成本 $C_1$	运行 1 年成本效益 BCR	成本效益得分 $S_{BCR}$
电子供体基质	硫自养填料	10000	50000	2000	$10000/(50000+2000)=0.19$	0
吸附性基质	生物炭	15000	40000	1000	$15000/(40000+1000)=0.37$	13.07

### B.4.3 基质全生命周期成本得分

硫自养填料和生物炭基质的全生命周期成本得分见表B.8。

表 A. 11 各基质全生命周期成本得分

基质类型	基质名称	初始成本 C <sub>in</sub>	运行 1 年运 维成本 C <sub>op</sub>	运行 1 年运 维成本 C <sub>ma</sub>	运行 1 年成本 LCC <sub>PV</sub>	全生命周期成本得分 S <sub>LCC</sub>
电子供体基 质	硫自养填 料	50000	1000	1000	52000	100 × 0.8 × (1-52000/56000)=5.71
吸附性基质	生物炭	40000	500	500	41000	100 × 0.8 × (1-41000/56000)=21.42

#### B. 4. 4 基质经济筛选总得分

B. 4. 4. 1 硫自养填料和生物炭基质的经济筛选总得分分别见公式 (B.5) 和公式 (B.6)。

$$S_{CESS}=(0.6 \times 0)+(0.4 \times 5.71)=2.284 \cdots \cdots \cdots (B.5)$$

$$S_{CESC}=(0.6 \times 13.07)+(0.4 \times 21.42)=16.41 \cdots \cdots \cdots (B.6)$$

式中:

S<sub>CESS</sub> ——硫自养填料基质经济筛选总得分;

S<sub>CESC</sub> ——生物炭基质经济筛选总得分。

B. 4. 4. 2 从全生命周期的经济性进行综合量化分析, 生物炭基质排名第一, 其主要优势在于优异的成本效益比和良好的净现值, 这表明虽然其初始投资较高, 但带来的长期效益和价值回报最为显著。硫自养填料由于在多项核心经济指标上得分极低, 综合经济性远逊于生物炭基质。

#### B. 5 基质综合筛选得分

本案例分别对基质的物理性质、化学性质和经济性质进行综合分析, 权重因子按照表14分别取W<sub>t</sub>=0.40, W<sub>c</sub>=0.40, W<sub>j</sub>=0.2。

按照综合处理效果筛选: 硫自养填料和生物炭基质的综合筛选总得分, 分别见公式 (B.7) 和公式 (B.8)。

$$S_{\text{总}s} = 0.40 \times 55.942 + 0.40 \times 47.75 + 0.2 \times 2.284 \approx 41.93 \cdots \cdots \cdots (B.7)$$

$$S_{\text{总}c} = 0.40 \times 91.468 + 0.40 \times 92.125 + 0.2 \times 16.41 \approx 76.72 \cdots \cdots \cdots (B.8)$$

式中:

S<sub>总s</sub> ——硫自养填料基质综合性能得分;

S<sub>总c</sub> ——生物炭基质综合性能得分。

#### B. 6 筛选结果分析

基于物理、化学及经济性的综合分析及计算得分, 生物炭因其卓越的污染物去除效能、良好的环境安全性及最优的长期经济回报, 被推荐为本研究河湖人工湿地的首选基质; 硫自养填料则因透水性差、存在二次污染风险且经济性不佳, 暂不推荐在本项目场景中应用。

## 参 考 文 献

- [1] GB/T 19587 气体吸附BET法测定固态物质比表面积
  - [2] DB37/T 3394 人工湿地水质净化工程技术指南
  - [3] DB13/T 5184 人工湿地水质净化工程技术规范
-

附件 2

ICS 13.020.01

CCS Z 06

# 团 体 标 准

T/CAQI XXX—2026

---

## 人工湿地-微生物电解池构建及 运行维护技术规范

Technical specification for the construction operation and  
maintenance of constructed wetland-microbial electrolysis cell  
system

(征求意见稿)

2026-XX-XX 发布

2026-XX-XX 实施

---

中国质量检验协会 发布

## 前 言

本文件按照GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

请注意本文件的某些内容有可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由南京大学宜兴环保研究院提出。

本文件由中国质量检验协会归口。

本文件起草单位：河海大学、南京大学宜兴环保研究院等

本文件主要起草人：。

# 人工湿地-微生物电解池构建及运行维护技术规范

## 1 范围

本文件规定了人工湿地-微生物电解池构建工程的设计、施工与验收、维护及运行管理等的要求。

本文件适用于以处理低污染水为主要功能的污水处理工程，可作为人工湿地-微生物电解池（以下简称“电解湿地”）净化技术设计、施工、验收及其建成后运行维护的技术依据。

## 2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

- GB 50014 室外排水设计规范
- GB 50093 自动化仪表工程施工及质量验收规范
- GB 50141 给水排水构筑物工程施工及验收规范
- GB 50203 砌体结构工程施工质量验收规范
- GB 50204 混凝土结构工程施工质量验收规范
- GB 50231 机械设备安装工程施工及验收通用规范
- GB 50254 电气装置安装工程 低压电器施工及验收规范
- GB 50268 给水排水管道工程施工及验收规范
- GB 50334 城镇污水处理厂工程质量验收规范
- GB 50797 光伏电站设计规范
- CJJ/T 54 污水自然处理工程技术规范
- HJ 2005 人工湿地污水处理工程技术规范
- RISN-TG 006 人工湿地污水处理技术导则

## 3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

### 3.1

**人工湿地** constructed wetland

通过模拟天然湿地的结构和功能，选择一定的地理位置与地形，根据需要，人为设计与建造的湿地。本文件中定义的人工湿地为人工湿地水质净化系统，主要通过基质、植物、微生物的协同作用对水体进行净化。

[来源：DB13/T 5184—2020，3.1，有修改]

### 3.2

**人工湿地-微生物电解池** constructed wetland-microbial electrolysis cell system

在人工湿地基质层内，通过合理布置碳毡等类型电极并搭建外部电路系统，利用湿地内部天然氧化还原梯度，结合外加电压强化电活性微生物污染物降解功能所构建的复合型水处理装置。

### 3.3

**基质** substrate

提供人工湿地植物与微生物生长并对污染物起过滤、吸附作用的填充材料，包括土壤、砂、砾石、沸石、石灰石、页岩、火山岩、塑料、生物炭、生物陶粒和其它可去除特定污染物的新型环保材料等。

[来源：HJ 2005—2010，3.7，有修改]

### 3.4

**湿地植物** wetland plants

人工湿地中用于吸收、降解污水中污染物所种植的植物，电解湿地中主要种植挺水植物。

[来源: T/CSF 007-2022, 3.9, 有修改]

### 3.5

#### 电极材料 electrode material

用于电解湿地系统, 具备导电性、特定电极活性, 满足良好生物相容性、较高比表面积与孔隙率要求, 可实现电子传递并为电活性微生物提供附着载体, 以保障系统电化学反应高效开展的功能性材料, 常见类型包括碳毡、活性炭、石墨等。

### 3.6

#### 碳毡 carbon felt

一种由碳纤维制成的毡状材料, 具有高度发达的微孔结构, 导电性好, 用作电解湿地的电极材料。

### 3.7

#### 电极间距 electrode spacing

在电解湿地系统基质层内, 按预设设计方案布置的不同功能电极(如阳极与阴极)之间的最短直线距离, 是决定系统电场特性与电子传递基础条件的核心结构参数。本文件中的电极间距通常在100 mm~350 mm。

### 3.8

#### 阳极 anodic electrode

电解湿地中, 发生氧化反应并失去电子的电极, 将有机物氧化为二氧化碳, 同时向溶液/污水中释放质子。

### 3.9

#### 阴极 negative electrode

电解湿地中, 电子通过外电路在电源提供的电势差作用下到达阴极, 发生还原反应, 并驱动污染物去除。

### 3.10

#### 电路系统 electrical circuit system

电解湿地中各种电子元件包括电源、电阻、电线等按照一定规则或要求连接起来构成的整体, 用于湿地中电流的流通, 电子通过外电路系统从阳极流向阴极, 在合适的(生物)催化剂作用下与可溶性电子受体结合, 生成目标产物。

### 3.11

#### 孔隙率 porosity

人工湿地基质层中, 存在于基质间的孔隙体积占总体积的百分比。

[来源: DB13/T 5184—2020, 3.14, 有修改]

## 4 工程设计

### 4.1 一般规定

#### 4.1.1 电解湿地设计应具备下列资料。

##### a) 基础资料:

- 1) 场地总体规划、地形地貌、水文地质、土壤性质、气象条件等相关资料;
- 2) 场地建设条件, 包括地下管线分布、周边建筑物及生态敏感区位置等;
- 3) 种植植物的耐污性、根系特性等适配性参数;
- 4) 电极材料(含碳毡、不锈钢网等)的导电性能、生物相容性、机械强度等性能指标;
- 5) 泵、阀门、电源等设备的型号规格及运行参数。

b) 水质与处理资料: 明确进水水质指标(包括 COD、总氮、氨氮、总磷、悬浮物等)及排放或再生利用的水质标准。

##### c) 工程约束条件资料:

- 1) 工期要求、投资预算、用地规模限制等;
- 2) 与邻近污水处理、污泥处置设施的衔接方案, 以及符合 GB 50014 中排水系统与周边给水、洪水排除系统协调要求的相关说明。

##### d) 调试与运行基础资料:

- 1) 调试运行手册, 包括池体水深、水力停留时间、进出水流量等控制参数;
  - 2) 配水管道、阀门的布置原则与说明, 确保满足均匀配水要求;
  - 3) 电路系统(电源、电阻、导线)的安全运行参数及防护要求。
- 4.1.2 电解湿地面积应按氮、磷和有机污染物等进水负荷和去除效率进行确定, 应取其设计计算结果中的最大值, 同时应满足水力负荷的要求。
- 4.1.3 电解湿地应具备 10%~20%的超负荷运行能力; 同时应设置暴雨、洪水等极端情况下的应急直排通道, 避免造成极端水力负荷对人工湿地的冲击。
- 4.1.4 电解湿地主要设计参数应通过试验或按相似条件下人工湿地的运行经验确定, 应符合 CJJ/T 54、HJ 2005 和 RISN-TG 006 中的有关规定。
- 4.1.5 电解湿地涉及的主要设计参数, 宜根据试验资料确定; 无试验资料时, 可参考经验数据进行酌情取值。
- 4.1.6 电解湿地污水处理系统适用于低碳氮比污水, 尤其针对因有机碳源不足而导致传统生物脱氮效率受限的污水类型。该系统可适用于农村生活污水、雨水径流、低污染河湖水体及污水处理厂尾水等场景, 具有强化脱氮性能, 适用于需实现深度脱氮要求的工程项目。

## 4.2 工艺设计

4.2.1 电解湿地工艺构建流程见图 1, 电解湿地工艺设计参数表详见附录 A。

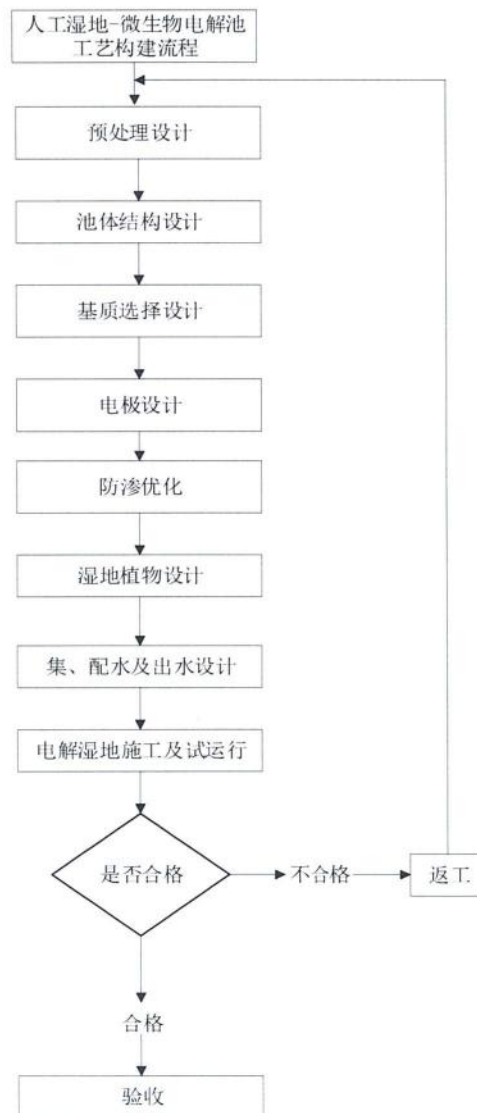


图 1 工艺设计流程图

### 4.3 预处理设计

4.3.1 预处理系统应根据进水水质特性及电解湿地主体工艺的保护要求进行设计，主要功能应包括去除大尺寸悬浮物、调节水质水量，并宜考虑去除过量油脂或抑制性物质。

4.3.2 预处理工艺单元的选择与组合应通过技术经济比较确定。常见单元可包括但不限于格栅、沉砂池、初沉池、调节池或水解酸化池。

4.3.3 预处理单元的关键设计参数，如格栅间隙、沉砂池表面负荷、调节池停留时间等，应通过计算或试验确定，以确保其出水悬浮物浓度、粒径及水质波动范围满足主体工艺的进水要求。

### 4.4 池体结构设计

4.4.1 电解湿地池体结构的基质布置层设计如下，主视图、左视图和俯视图分别见图 2、图 3 和图 4：

- a) 承托层厚度 200 mm~300 mm；
- b) 过渡层厚度 100 mm~200 mm；
- c) 阳极层厚度 200 mm~300 mm；
- d) 中间层的电极间距厚度 200 mm~350 mm；
- e) 阴极层厚度 200 mm~300 mm；
- f) 上层厚度 100 mm~200 mm。

设计的各基质层可根据工况进行调整，实际工程宜根据处理水质要求、现场条件等情况确定。

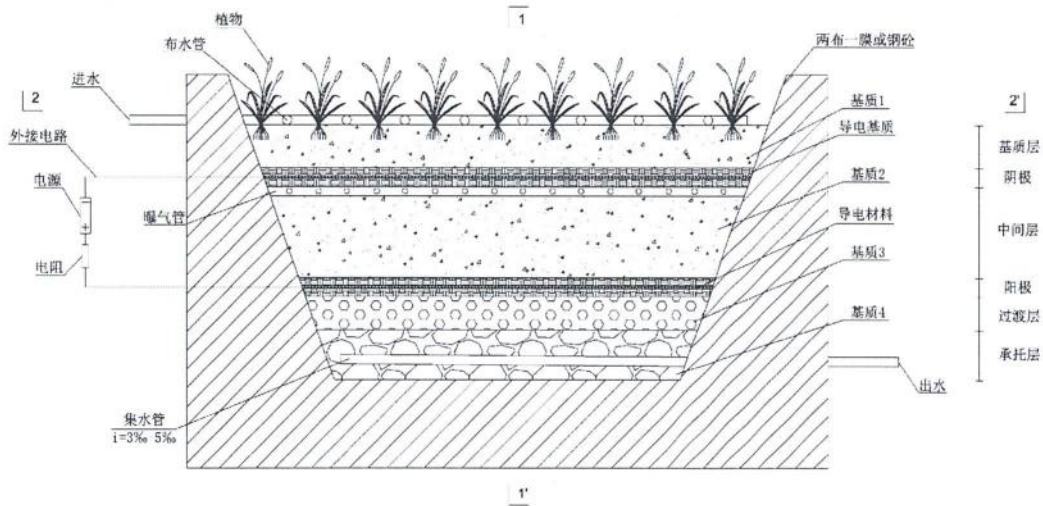


图 2 主视图

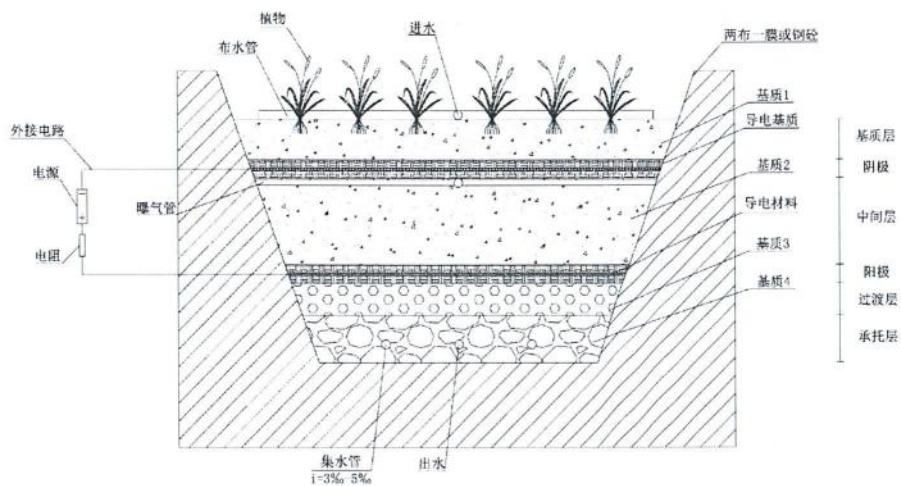


图3 左视图 (1-1')

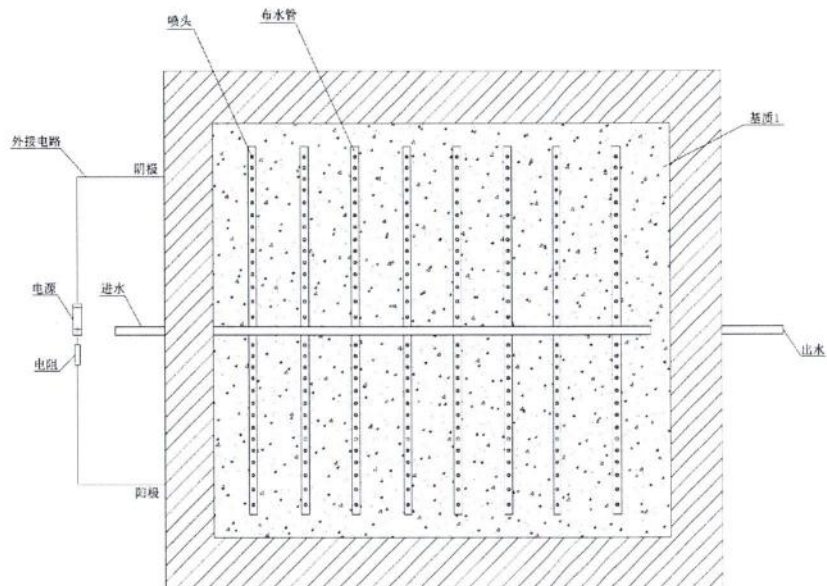


图4 俯视图 (2-2')

#### 4.5 基质选择设计

4.5.1 基质的选择宜就地取材，所选基质应达到设计要求的粒径范围；根据基质的渗透系数、级配系数等因素确定基质种类和规格。

4.5.2 基质层的初始孔隙率宜控制在 35%~50%。

4.5.3 基质的选择种类和粒径大小，以及级配比例，应兼顾尾水净化效果及防治堵塞，基质应定期进行更换或反冲洗。

4.5.4 湿地基质宜选择生物质炭、砾石、生物陶粒和沸石等，基质层内可垂直布置电解反应的阴极和阳极。

#### 4.6 电极设计

4.6.1 电极材料导线连接处应用防水材料覆盖，导线铺设线路应减少弯曲，在满足设计和安全的情况下，应保证导线路径最短。

4.6.2 电极材料覆盖密度应不小于电极层面积的 25%。

4.6.3 铺设一层电极，电极材料应平整无折叠放置，上下填料粒径宜为 4 mm~8 mm。

4.6.4 电极分层铺设，电极间距应不大于 350 mm。

- 4.6.5 电极材料宜选择碳毡，材料含碳量应不小于90%。碳毡表面应进行打孔，孔径宜为3 mm~5 mm，开孔率宜为10%~20%，孔间距宜为50 mm~100 mm，可按矩形或菱形排布。
- 4.6.6 在选择碳毡电极的厚度时，应综合考虑应用场景、性能需求以及成本等因素。对于需要承受高电流密度和长时间电解过程的电极湿地，宜选择较厚的电极以保证良好的导电性和机械强度。
- 4.6.7 碳毡表面应覆盖有导电铁丝网，铁丝网应完全包裹碳毡材料，碳毡不裸露。
- 4.6.8 电极材质和电路系统铺设质量应满足工程要求。
- 4.6.9 电解湿地的电极外加电源应为直流稳压稳流电源，其输出电压的最大工作范围应通过计算确定，计算时宜充分考虑电极材料、电极间距及湿地床体规模等因素。
- 4.6.10 在技术经济条件许可下，宜采用太阳能光伏发电系统作为供电电源。光伏系统的设计、施工与验收应符合GB 50797的规定。当采用离网光伏系统时，应配置储能设备，其容量应能确保系统在连续阴雨天条件下正常运行不少于3天。

#### 4.7 防渗设计

- 4.7.1 电解湿地应在底部和侧面进行防渗处理，防渗层的渗透系数应不大于 $10^{-8}$  m/s。
- 4.7.2 电解湿地内穿墙管、穿孔管、穿孔墙等处应作防渗局部处理。
- 4.7.3 电解湿地应根据进水水质和土壤渗透系数进行防渗处理。
- 4.7.4 在施工时应尽量保持原土层，在原土层上采取防渗措施。
- 4.7.5 防渗层完工后应进行渗透试验。

#### 4.8 湿地植物设计

- 4.8.1 电解湿地宜选用耐污能力强、根系发达、去污效果好、具有抗冻及抗病虫能力、有一定经济价值、容易管理的本土大型水生植物。
- 4.8.2 电解湿地可选择一种或多种大型水生植物作为优势种搭配栽种，增加大型挺水植物的多样性并提升景观效果。
- 4.8.3 应根据电解湿地水深和湿地处理类型合理配置植物，可选择如芦苇、菖蒲、水葱、香蒲、鸢尾、水麦冬等挺水植物。
- 4.8.4 电解湿地植物的种植包括根幼苗移植、种子繁殖、收割植物的移植及盆栽移植等，植物栽种初期应保证其成活率，应根据植物生长特性确定种植时间，宜为春季。为提高低温季节净化效果，电解湿地宜采取一定的轮作方式。
- 4.8.5 电解湿地植物种植密度可根据植物种类与工程要求进行调节，宜为9株/m<sup>2</sup>~25株/m<sup>2</sup>，苗龄为60 d~100 d的植物。
- 4.8.6 电解湿地植物种植时应保持介质湿润，生长初期池内应保持一定水深，逐步增大水力负荷使其驯化适应处理水质。

#### 4.9 集、配水及出水设计

- 4.9.1 电解湿地宜采用穿孔管、配（集）水管、配（集）水堰、配水井、配水槽等设施来实现集配水的均匀布置。
- 4.9.2 穿孔管、配（集）水管、配（集）水堰等设施应选择不易变形的材质，耐腐蚀、抗老化；穿孔管的长度应与电解湿地单元的宽度大致相等。管孔密度应均匀，管孔的尺寸和间距取决于尾水流量和进出水的水力条件，管孔间距宜不大于电解湿地单元宽度的10%。
- 4.9.3 穿孔管周围宜选用粒径较大的基质（粒径宜为10 mm~16 mm），其粒径应大于管孔孔径（孔径宜为8 mm~10 mm）。
- 4.9.4 根据地形地势、排水去向、排水规划等条件合理规划设置尾水管网收集系统，并根据收集规模、设计坡度、设计充满度等确定沟渠及管道规格，宜按重力流方式进行排水沟渠及管道规划设计。电解湿地出水可采用沟排、管排和井排等方式，并设溢流堰、可调管道及闸门等具有水位调节功能的设施。
- 4.9.5 根据地形地势、排水去向、排水规划等条件合理规划设置尾水管网收集系统，并根据收集规模、设计坡度、设计充满度等确定沟渠及管道规格，一般宜按重力流方式进行排水沟渠及管道规划设计。电解湿地出水可采用沟排、管排和井排等方式，并设溢流堰、可调管道及闸门等具有水位调节功能的设施。
- 4.9.6 电解湿地应设置排空阀等排空设施。
- 4.9.7 排水管材选取应遵循性能可靠、工程造价合理、便于施工和维护的原则，并充分考虑管道沿线

的地质条件。

4.9.8 中小型电解湿地净化系统的收集管道宜采用排水塑料管（包括UPVC管、PVC管、HDPE管和PE管等）。

4.9.9 大型电解湿地净化系统的收集管道宜采用HDPE管或钢管。

4.9.10 管道设计最大充满度、最小管径和最小设计坡度可按GB 50014取值。

4.9.11 管道坡度不能满足设计要求时，可酌情减小，但应有防淤和清淤措施。

4.9.12 电解湿地内设置通气管，应根据排水管排水能力及管道长度确定，一般宜不小于排水管管径的1/2。

## 5 施工与验收

### 5.1 一般规定

#### 5.1.1 施工准备应包括下列内容：

- a) 调查施工现场的给排水、电、道路条件、地下设施、障碍物情况和周边建筑物等；
- b) 熟悉设计文件；
- c) 分析水文和地质资料；
- d) 复核施工坐标控制点；
- e) 编制施工组织设计、施工临时用电组织设计等。

5.1.2 施工前应对施工单位进行相应施工资质审查，施工过程应符合国家及地方有关标准要求。

5.1.3 施工单位应做好文明施工，遵守有关环境保护的法律、法规，采取有效措施控制施工现场的各种粉尘、废气、废弃物以及噪声、振动等对环境造成的污染和危害。

5.1.4 管道工程、混凝土结构工程、砌体结构工程、构筑物工程的施工，应分别符合GB 50268、GB 50204、GB 50203、GB 50141等的规定。

5.1.5 施工中使用的设备、材料、器件等应有产品合格证，设备与器材在安装前应进行完好性和完整性检验。

### 5.2 工程施工

5.2.1 电解湿地电极材料制作、电路系统和基质层铺设工程施工流程图详见图5，现场施工时，宜根据场地情况、土质性质、验收指标、现场试验等情况，作适当调整。

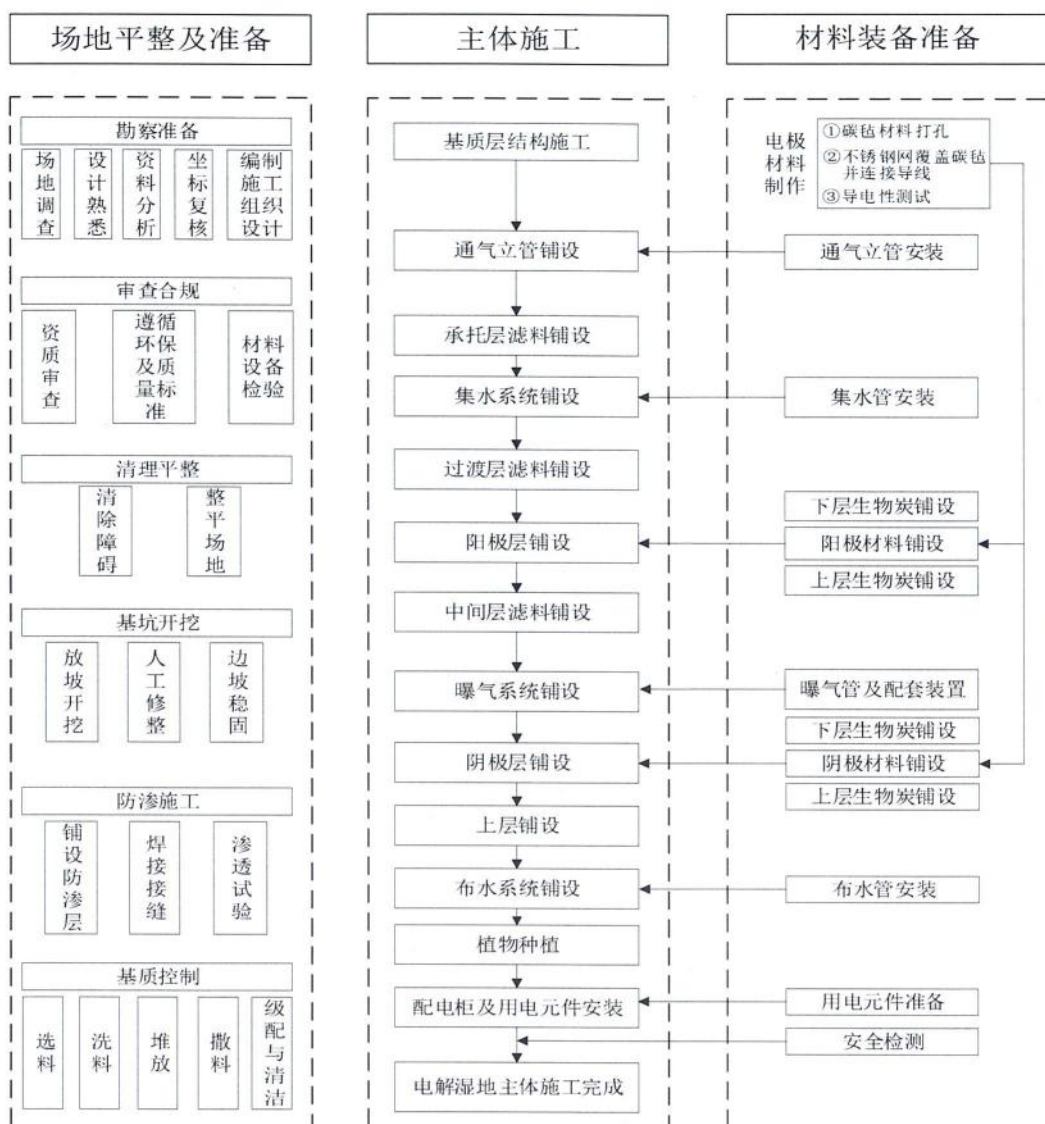


图5 电解湿地电极材料、电路系统和基质层铺设工程施工流程图

- 5.2.2 场地勘察准备：开展场地平整及准备阶段的勘察工作，完成场地调查、熟悉设计文件、分析项目资料、复核场地坐标，同步编制施工组织设计。
- 5.2.3 施工合规审查：完成施工前合规性工作，开展施工资质审查，遵循环保及相关标准要求，同步完成材料与设备的进场检验。
- 5.2.4 场地清理平整：实施场地预处理作业，清除场地内障碍设施，完成场地整平作业，为后续施工提供基础条件。
- 5.2.5 基坑开挖作业：开挖电解湿地基坑按一定的角度（1:0.8~1:1.5）放坡，采用机械开挖与人工修整相结合的施工技术方法，基坑上平面周边布设草坪稳定基坑周边土方。
- 5.2.6 防渗层施工：完成防渗体系构建，铺设防渗层材料，焊接防渗层接缝部位，开展渗透性能检测试验。
- 5.2.7 基质材料控制：落实基质预处理要求，依次开展基质选料、洗料、堆放、填料作业，同步完成基质级配调整与清洁处理。
- 5.2.8 材料装备准备：开展施工材料及装备的前置准备，完成电极材料制作（含碳材料打孔、不锈钢网裹碳毡并连接导线、导电性能测试），同步准备通气立管、集水管、布水管、用电元件（完成用电元件准备与安全检测）等安装构件。电解湿地管道宜采用UPVC管、PVC管、HDPE管和PE管等，管道安装后，应做闭水试验。
- 5.2.9 基质层及配套设施铺设：开展基质层结构施工，依次完成通气立管铺设、承托层滤料铺设、集

水系统铺设（同步配套集水管安装）。

5.2.10 过渡层与阳极层施工：铺设过渡层滤料，同步完成阳极层铺设（含下层生物炭铺设、阳极材料铺设、上层生物炭铺设），电极材料导线连接处应用防水材料覆盖，导线铺设线路应减少弯曲，在满足设计和安全的情况下，应保证导线路径最短。

5.2.11 中间层与曝气系统施工：铺设中间层滤料，完成曝气系统铺设（同步配套曝气管及装置准备）。

5.2.12 阴极层与上层结构施工：开展阴极层铺设（含下层生物炭铺设、阴极材料铺设、上层生物炭铺设），同步落实上层结构铺设作业。

5.2.13 布水系统、植物种植与电气安装：铺设布水系统（同步配套布水管安装），种植挺水植物，安装配电箱及用电元件。电解湿地电路系统中电源、电阻及配电箱安装位置的选择，应考虑实际使用需求和场地条件，配电箱安装平正、牢固。同时配电箱内连接导线、电源进线和电阻出线与相关电气元件的连接紧密牢固，不松动，将导线正确剥皮，芯线不外露，压接紧密。

5.2.14 完成电解湿地主体施工全工序，确认各环节施工内容均落实到位。

### 5.3 工程验收

5.3.1 工程的环境保护验收应按 GB 50334 的规定进行。

5.3.2 电解湿地系统性能验收应在设计满负荷工况下连续运行，并稳定达到设计规定的各项性能指标。

5.3.3 电解湿地工程相关专业验收的程序和内容应符合 GB 50093、GB 50141、GB 50204、GB 50231、GB 50254 和 GB 50268 等的规定。

5.3.4 经竣工环境保护验收合格后，工程方可正式投入使用运行。

5.3.5 人工湿地净化工程办理单体验收手续后，建设单位应组织通水试运行，试运行期限为一年，施工单位应在试运行期间内对工程质量承担保修责任。试运行一年后，建设单位应组织竣工验收。

## 6 运行与维护

### 6.1 一般规定

6.1.1 电解湿地宜委托具有相关资质和管理经验的第三方运营公司运行管理，或由当地污水处理厂专职人员维护管理，相关管理人员均应经技术培训合格后方可上岗。

6.1.2 运行管理人员应定期对相关设备进行检查和清扫保养，预防设备发生故障，保证电解湿地出水水质达标。

6.1.3 运行管理人员应定期对电解湿地的防渗措施（包括自然防渗和人工防渗）进行检修维护，预防污水下渗对地下水产生污染。

### 6.2 湿地运行与维护

#### 6.2.1 监督管理

6.2.1.1 运营单位应加强人工湿地运营档案管理，制定岗位责任制，由专人负责人工湿地各项基础设施维护和日常运营工作。

6.2.1.2 电解湿地工程运行前应编制运行维护手册，制定设备台账、运行记录、定期巡视、交接班、安全检查等管理制度。

#### 6.2.2 植物管理

6.2.2.1 根据植物生长期进行管理，定期分苗，补种缺苗、死苗，勤除杂草、枯枝、落叶。

6.2.2.2 对电解湿地水生植物进行合理收割，注意收割季节和收割植物的留存量，不应影响水生植物的正常生长和安全越冬。收割宜在生长后期。

6.2.2.3 应加强植物的病虫害防治，及时控制病虫害，不宜大规模使用除草剂和杀虫剂，防止引入新的污染物。

6.2.2.4 夏季植物移栽期间，可加大电解湿地的水力负荷。

6.2.2.5 植物残体污染物含量不应超过有关规定，可作为肥料或饲料，也可作为生物质能源燃料，或作为编织物、造纸、调制香水等原料，宜厌氧发酵生产有机酸，制备生物质炭等。

#### 6.2.3 设施维护

- 6.2.3.1 电解湿地的服务年限一般为 10~15 年，运行所需的水泵、鼓风机、管道、阀门和闸门等设备及器材应经常维护，定期保养，保证开启正常，若发现异常情况，应及时更换或使用备用设备。
- 6.2.3.2 定期监测电极工作状态，包括极板腐蚀程度、电流电压稳定性、电解效率等指标，每季度至少开展 1 次全面检测。
- 6.2.3.3 日常维护中及时清理电极表面附着的水垢、生物膜及污染物沉淀，可采用物理刮除、酸洗钝化（需选用环保型酸液）等方式，恢复电极导电性能。
- 6.2.3.4 当电极出现明显腐蚀穿孔、极板厚度减少超过设计值 30%，或电解效率持续下降且经清理后无改善时，应及时更换电极。
- 6.2.3.5 更换电极时匹配原型号规格，确保电极间距、安装角度符合设计要求，更换后进行通电调试，验证电解系统运行参数达标后方可恢复正常运行。
- 6.2.3.6 废弃电极应按危险废物管理相关规定分类收集、妥善处置，避免污染土壤及水体。
- 6.2.3.7 定期监测基质层渗透性能、污染物截留情况，每半年开展 1 次基质孔隙率检测，当孔隙率下降超过 20%或出现明显堵塞时，及时采取反冲洗、曝气吹扫等措施疏通。
- 6.2.3.8 日常运行中定期清理基质层表面沉积的泥沙、悬浮颗粒物，避免堵塞表层孔隙，影响布水均匀性和污水渗透效果。
- 6.2.3.9 当水质监测结果判定基质吸附已饱和或系统净化效率持续下降时，应补充活性炭、沸石、石英砂等功能型基质，或局部更换老化基质，恢复湿地净化能力。
- 6.2.3.10 雷雨天气，运行管理人员不应进入湿地巡视，以防雷击。
- 6.2.3.11 暴雨、冲击负荷等极端情况后，应核查基质层是否出现冲刷流失、分层塌陷，及时补填缺失基质并平整压实，确保基质层结构稳定。
- 6.2.3.12 维护过程中宜避免损伤湿地内水生植物根系及电极组件，维护后监测出水水质及系统运行参数，确保符合设计要求。
- 6.2.3.13 运行维护期间应严格遵守用电安全规程，定期检查电源线路及设备的绝缘与接地状态，在对光伏系统或水下电极进行操作时，应采取严格的断电与隔离措施。
- 6.2.4 极端情况管护
- 6.2.4.1 宜采取强化措施，如预处理、人工曝气、添加厌氧发酵液、延长水力停留时间等，提高冬季湿地运行效果。
- 6.2.4.2 冬季低温运行时，应对进水管、出水管、布水管、通气立管采取防冻保温措施，防止管道冻结或破裂。
- 6.2.4.3 冬季宜采取植物覆盖、增加基质层厚度等方法，防止水生植物冻害。
- 6.2.4.4 应提前核查湿地进水闸阀、溢流通道及排水系统，确保畅通无堵塞，避免积水倒灌。
- 6.2.4.5 暴雨期间应实时监测进水量与水质，超设计负荷时启动分流装置，控制进水速率。
- 6.2.4.6 暴雨后应及时清理湿地表面落叶、垃圾等漂浮物，检查基质层是否冲刷流失，必要时补填修复。
- 6.2.4.7 遭遇高浓度污染物冲击时，启动应急分流系统，将部分污水导入预处理单元或储存池。
- 6.2.4.8 宜通过投加微生物菌剂、优化曝气强度、调整进水布水方式，快速恢复湿地净化功能。
- 6.3 运行监测
- 6.3.1 水质现状调查的范围应包括受建设项目影响较显著的地面水区域。
- 6.3.2 水质现状调查应收集常规和非常规水质因子，以及其他方面的因子。常规水质因子包括温度、pH 值、溶解氧、总氮、化学需氧量、氨氮、总磷等；非常规因子可能包括重金属、有机污染物、新污染物等。
- 6.3.3 应对系统各单元的进水、出水水质进行监测，建立监测制度，制定监测方案，保存原始监测记录，电解湿地运行参数记录表详见附录 B。
- 6.3.4 监测项目主要包括水位、pH 值、悬浮物、 $\text{COD}_{\text{Cr}}$ 、氨氮、总氮、总磷、硝态氮、亚硝态氮、运行电压、阴阳极电压和电导率等，监测频次宜为每周一次，有条件的可设置在线监测系统。
- 6.3.5 当接纳以工业废水为主的污水处理厂排放的尾水时，应加大 pH 和电导率等项目的监测频次。

6.3.6 在日常进、出水水质管理的检测基础上采取委托监测，可委托当地专业环境检测机构定期（以季度或月为单位）或不定期进行水样监测，并据此评估处理设施的处理效果。

附 录 A  
(资料性)  
电解湿地工艺设计参数表

项目	参数
电解湿地池长宽比	3:1 以下
处理规模	小型: 日处理能力<3000 m <sup>3</sup> /d
	中型: 日处理能力 3000 m <sup>3</sup> /d~10000 m <sup>3</sup> /d
	大型: 日处理能力≥10000 m <sup>3</sup> /d
湿地植物	本土挺水植物
植物种植密度	9~25 株/m <sup>2</sup>
进水方式	上进下出, 间歇进水
水力负荷	0.10 m <sup>3</sup> /(m <sup>2</sup> ·d)~0.30 m <sup>3</sup> /(m <sup>2</sup> ·d)
处理条件	自然条件
基质	承托层粗砾石厚度 200 mm~300 mm (粒径 10 mm~16 mm), 过渡层砾石厚度 100 mm~200 mm (粒径 5 mm~10 mm), 阳极层厚度 200 mm~300 mm, 中间层细砾石厚度 200 mm~350 mm (粒径 3 mm~5 mm), 阴极层厚度 200 mm~300 mm, 上层细砾石厚度 100 mm~200 mm (粒径 3 mm~5 mm)
电极层碳毡	长 1000 mm~1500 mm, 宽 3000 mm~4000 mm, 厚 8 mm~10 mm (一层电极左右铺设两块)
电极间距	≤35 cm
可调节电阻箱	国标电阻箱 ZX21 直流标准电阻箱
可调稳压电源	MS305D (0 V~30 V 0 A~5 A 150 W 三位数显)
不锈钢网	长 1000 mm~1500 mm, 宽 3000 mm~4000 mm, 厚 5 mm~8 mm
处理水质	污水厂尾水
监测指标	TN、NH <sub>3</sub> -N、NO <sub>3</sub> -N、NO <sub>2</sub> -N、TP、COD 等水质指标



## 参 考 文 献

- [1] HJ 1339 湿地生态质量评价技术规范
  - [2] DB13/T 5184 人工湿地水质净化工程技术规范
  - [3] DB14/T 3450 人工湿地运行维护技术规范
  - [4] DB32/T 4883 人工湿地工程技术标准
  - [5] DB32/T 4884 人工湿地污水处理技术规程
  - [6] DB34/T 4384 生活污水处理厂尾水人工湿地工程技术规范
  - [7] DB37/T 3393 人工湿地水质净化工程竣工环境保护验收技术规范
  - [8] T/CSF 007 农村生活污水人工湿地处理工程建设技术规范
  - [9] T/HEEPA11 农村生活灰水微生物燃料电池湿地处理技术规范
-

附件3

### 团体标准征求意见表

单位名称或 专家姓名		单位盖章或 专家签名	
联系人		联系方式	
标准名称			
序号	章节	修改意见	具体理由
备注：修改意见和具体理由，可另附相关说明			

本批团体标准编制工作组联系人：联系人：朱巧莲（手机：19941717753 邮箱：  
zhuqiaolian@njuyi.cn）。

---

抄送：本协会会员工作部，本协会存档（2）。

---

中国质量检验协会

2026年1月16日印发

---