

# 人工湿地在应用中存在的问题及解决措施

黄锦楼<sup>1</sup>, 陈琴<sup>1,2</sup>, 许连煌<sup>1,3</sup>

(1. 中国科学院生态环境研究中心城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085; 2. 贵州大学资源与环境工程学院, 贵阳 550025; 3. 武夷学院环境与建筑工程系, 武夷山 354300)

**摘要:** 人工湿地是近几十年发展起来的一种污水生态处理工程技术, 它将污水处理和环境生态有机地结合起来, 在有效处理污水的同时也美化了环境, 创造了生态景观, 带来了环境效益和一定的经济效益。人工湿地自发展以来, 以其独特的优势广受人们关注, 并广泛应用于处理生活污水、工业废水、矿山及石油开采废水等。但是人工湿地在实际应用过程中也暴露出了很多问题, 如易受气候条件和温度的影响, 基质易饱和和易堵塞, 易受植物种类影响, 占地面积较大, 管理不合理, 设计不规范, 生态服务功能单一等。这些问题在一定程度上影响了人工湿地对污水的处理效果, 缩短了人工湿地的使用寿命, 阻碍了人工湿地的推广应用。针对目前人工湿地在应用中存在的这些问题提出了相应的解决措施, 提高人工湿地对污水的处理效果, 期望能够为人工湿地的应用及推广提供参考。

**关键词:** 人工湿地; 应用; 主要问题; 基质堵塞; 解决措施; 管理

中图分类号: X703 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2013)01-0401-08

## Problems and Countermeasures in the Application of Constructed Wetlands

HUANG Jin-lou<sup>1</sup>, CHEN Qin<sup>1,2</sup>, XU Lian-huang<sup>1,3</sup>

(1. Key Laboratory of System Ecology Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China; 2. College of Resource and Environmental Engineering, Guizhou University, Guiyang 550025, China; 3. Academy of Environment and Architecture, Wuyi University, Wuyishan 354300, China)

**Abstract:** Constructed wetlands as a wastewater eco-treatment technology are developed in recent decades. It combines sewage treatment with the eco-environment in an efficient way. It treats the sewage effectively, and meanwhile beautifies the environment, creates ecological landscape, and brings benefits to the environment and economics. The unique advantages of constructed wetlands have attracted intensive attention since developed. Constructed wetlands are widely used in treatment of domestic sewage, industrial wastewater, and wastewater from mining and petroleum production. However, many problems are found in the practical application of constructed wetland, e. g. they are vulnerable to changes in climatic conditions and temperature, their substrates are easily saturated and plugged, they are readily affected by plant species, they often occupy large areas, and there are other problems including irrational management, non-standard design, and a single function of ecological service. These problems to a certain extent influence the efficiency of constructed wetlands in wastewater treatment, shorten the life of the artificial wetland, and hinder the application of artificial wetland. The review presents correlation analysis and countermeasures for these problems, in order to improve the efficiency of constructed wetland in wastewater treatment, and provide reference for the application and promotion of artificial wetland.

**Key words:** constructed wetlands; application; main problem; substrate plugging; countermeasures; management

人工湿地是由天然湿地发展而来, 通过模拟天然湿地的结构与功能, 选择一定的地理位置与地形, 根据人们的需要人为设计与建造的湿地生态系统<sup>[1]</sup>。作为一种污水生态处理工程新技术, 人工湿地利用自然生态系统中的物理、化学和生物的三重协同作用来实现对污水的净化作用, 使水质得到改善, 实现对废水的生态化处理<sup>[2]</sup>。

与传统的污水处理技术相比, 人工湿地污水处理系统具有出水水质稳定、投资低、耗能低、抗冲击力强、操作简单、运行费用低等特点<sup>[3]</sup>。同时, 它将污水处理和环境生态有机地结合起来, 在有效处理污水的同时也美化了环境, 创造了生态景观, 带来了环境效益和一定的经济效益。人工湿地以其独特

的优势越来越受人们的关注和重视, 并被广泛应用于生活污水<sup>[4~6]</sup>、工业废水<sup>[7,8]</sup>、农业非点源污染<sup>[9~12]</sup>、矿山及石油开采废水<sup>[13~15]</sup>等处理中。但是在应用过程中也暴露了一些缺点, 存在一定的问题, 本研究针对人工湿地在应用过程中存在的问题进行分析并提出相应的解决措施。

### 1 人工湿地在应用中存在的问题

人工湿地因其独特的优势得到了广泛应用, 但是在应用过程中也暴露了很多问题, 包括易受气候

收稿日期: 2012-04-14; 修订日期: 2012-08-27

基金项目: 国家自然科学基金项目(71033005)

作者简介: 黄锦楼(1978~), 男, 博士, 副研究员, 主要研究方向为城市生态学, E-mail: jlhuan@rcees.ac.cn

温度影响、占地面积大、基质易堵塞等问题(见表1),这些问题都在一定程度上影响了人工湿地对污水的净化效果,甚至限制了湿地的发展。

1.1 受气候温度影响较大

人工湿地受气候温度条件影响较大,随季节的变化,人工湿地对污染物的去除效果也随之变化。人工湿地中的植物和微生物对温度尤为敏感,如果植物和微生物在湿地中的生长受到影响,将直接影响人工湿地的处理效果。大量研究表明,水温低于10℃时,人工湿地的处理效率会明显下降,且有学者认为<sup>[16]</sup>,在4℃以下时湿地中的硝化作用趋于停止。同时,在较低温度和氧含量的情况下,微生物活性也会降低,使微生物对有机物的分解能力下降。聂志刚等<sup>[17]</sup>研究了季节变化对人工湿地处理效果的影响,结果发现,各人工湿地随季节的变化去除率排序为夏季>秋季>春季>冬季, $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 、高锰酸盐指数变化较大,冬季去除率下降尤为明显。在冬季低温条件下,不仅对人工湿地的去除效果产生影响,同时还存在人工湿地处理工艺脱氮效率低、基质易堵塞、床体缺氧等问题<sup>[18]</sup>。由于人工湿地受气候温度条件影响较大,这也是限制人工湿地在寒冷地区推广应用的原因之一。

表1 湿地存在的问题及其影响

Table 1 Problems found with wetlands and their consequences

| 湿地存在的问题     | 造成的影响               |
|-------------|---------------------|
| 受气候影响较大     | 直接影响湿地的处理效果         |
| 占地面积大       | 尤其在用地紧张的地区,限制湿地的发展  |
| 基质易堵塞       | 影响湿地的寿命及稳定性         |
| 易受植物、基质等的影响 | 影响湿地对污水的净化效果        |
| 管理不合理       | 影响湿地的处理效果,造成堵塞,缩短寿命 |
| 设计缺乏规范化     | 设计不合理,限制其推广         |
| 生态服务功能单一    | 不能完全发挥湿地的生态服务功能     |

1.2 占地面积大

表2列举了国内外部分人工湿地的占地情况。从中可以看出人工湿地占地面积较大,一般认为人工湿地占地面积大约是传统污水处理工艺的2~3倍左右<sup>[19]</sup>。人工湿地净化的机制与特点决定了其需要较大的占地面积,而对于水平流型人工湿地,由于水力负荷小,使得人工湿地需要占用更多的土地,这就制约了人工湿地的发展,尤其是在用地紧张的地区。此外,由于人工湿地中填料和植物的纳污能力有限,基质易达到饱和,因此,还需要有平行湿地交替运行,使得湿地停床休整时有平行湿地轮流运转,保证湿地的运行效果,这就使得利用人工湿地进行污水处理时需要占用更大的土地面积。

表2 国内外人工湿地占地情况

Table 2 Land area of artificial wetlands in different countries and regions

| 国别  | 湿地类型  | 废水类型   | 占地面积/m <sup>2</sup> | 文献   |
|-----|-------|--------|---------------------|------|
| 美国  | 自由表面流 | 市政污水   | 90 000              | [20] |
| 美国  | 地下潜流  | 市政污水   | 18 468              | [21] |
| 美国  | 地下潜流  | 氧化沟出水  | 8 910               | [21] |
| 美国  | 地下潜流  | 市政污水   | 61 560              | [21] |
| 巴西  | 复合垂直流 | 生活污水   | 882                 | [22] |
| 新西兰 | 地下潜流  | 肉类加工废水 | 54                  | [23] |
| 英国  | 地下潜流  | 牛奶加工废水 | 250                 | [24] |
| 加拿大 | 自由表面流 | 牛奶加工废水 | 57.6                | [25] |
| 泰国  | 垂直流   | 化粪池废水  | 75                  | [26] |
| 中国  | 水平潜流  | 生活污水   | 8 400               | [27] |
| 中国  | 自由表面流 | 农田径流废水 | 1 146.6             | [28] |
| 中国  | 复合垂直流 | 城市污水   | 2 000               | [29] |

1.3 基质易堵塞

基质在人工湿地中发挥着重要的作用,但是随着污水处理过程的不断运行,湿地中的微生物也相应繁殖,再加上植物的腐败以及基质的吸附能力逐渐趋于饱和,若维护不当,很容易产生淤积、阻塞现象。最早关于人工湿地出现堵塞现象的报道是由Seidel等<sup>[30]</sup>建成的Krefeld湿地存在的堵塞和积水现象。在我国的白泥坑、雁田等人工湿地也出现了

不同程度的堵塞现象<sup>[27]</sup>。当堵塞现象发生时,它不仅影响到湿地系统的水力负荷,也会影响湿地系统的寿命以及湿地长期运行的稳定性,甚至使湿地系统丧失功能。

1.4 易受植物、基质、水力负荷、运行方式等的影响

植物是人工湿地中重要的组成部分,湿地中的植物不仅可以与基质一起过滤、截流水中悬浮物,还可以吸收水中部分污染物质从而将其去除。另

外,由于植物的存在,可以在湿地系统中形成好氧区域和厌氧区域<sup>[31]</sup>,有了这些好氧区域和厌氧区域,使其具有良好的脱氮除磷效果。但是人工湿地中植物过度单一或是搭配不合理将对人工湿地的正常发挥产生影响。植物种类单一,其净化污水的能力有限,同时受季节的影响更明显;搭配不合理,植物之间因光、水、营养等环境的竞争,影响植物的生长,同时,有些植物之间通过释放化学物质,影响周围植物的生长,进一步影响对污水的净化效果。

基质是人工湿地的重要组成部分,基质是湿地中的填料骨架,为微生物提供附着表面,同时具有吸附和离子交换等净化作用。湿地基质种类很多,有土壤、砂、砾石、沸石、石灰石、煤渣、陶粒等,不同的基质对污染物的处理效果差异很大,并且不同粒径的基质以及不同的级配方式对污染物的处理效果也不相同。不同基质为植物和微生物提供的生存环境不同,从而影响水处理的效果<sup>[32]</sup>。

水力负荷、运行方式等对人工湿地的净化效果也有一定的影响,水力负荷过大,污染负荷过重会缩短水力停留时间,降低湿地对污水的净化效果,严重的还会造成湿地堵塞现象。湿地的运行方式对系统的影响也是不容忽视的,宋铁红等<sup>[33]</sup>研究了人工湿地在间歇流、连续流进水方式下处理生活污水的效率,结果表明,间歇流进水能够提高床体内的含氧量,缓解植物根系放氧不足,提高了污染物去除率。

因此,建立人工湿地水处理单元时应充分考虑各个影响因素,争取有效地降低这些因素的影响,充分发挥人工湿地对污水的净化功能。

### 1.5 管理不合理

人工湿地工程在运行过程中还存在着管理上的问题,随着人工湿地的运行,很多枯枝落叶就会落到人工湿地表面,若不及时清理掉这些枯枝落叶,会影响人工湿地的处理效果,甚至会造成人工湿地的堵塞。某些植物的枯枝落叶经水淋或微生物的作用释放出克生物质,抑制植物自身的生长,如宽叶香蒲枯枝烂叶腐烂后阻碍其自身新芽的萌发和新苗的生长<sup>[34]</sup>;同时植物还可能通过释放化学物质,促进或抑制周边植物的生长,Szczepański<sup>[35]</sup>报道了宽叶香蒲、水葱、木贼、苔草等植物体腐烂产生的化感物质对芦苇生长、繁殖具有抑制作用。因此,要加强对湿地植物的管理。但是目前对湿地的管理力度还不够,很多地方缺乏管理理念,认为人工湿地后期的维护管理不重要,导致人工湿地在运行一段时间后污水处理能力下降,失去了人工湿地原有的应用价

值,缩短了人工湿地的使用寿命。

### 1.6 设计缺乏规范化

人工湿地是一个涉及生物学、水力学、水文学和水化学的复杂生态系统,然而,其系统的设计多建立在统计数据和经验公式的基础上,缺少关于大规模人工湿地充分详细的高质量数据,目前,对人工湿地的设计仍然是建立在一定假设条件和忽略某些影响因素的基础上,导致了参数的不确定性。目前国内只有一套《人工湿地污水处理工程技术规范》(征求意见稿),还没有一部国家正式承认的湿地设计手册,也没有与之相关的标准,更没有推导出单项的设计指标、简要的工程参数等。如在利用人工湿地处理生活污水时,人们往往选择  $BOD_5$  作为人工湿地的特征污染物进行人工湿地设计,但是在利用人工湿地处理工业废水、农田排水等其他污水时,还是选用  $BOD_5$  作为特征污染物进行人工湿地设计,导致了人工湿地的设计不合理,同时在人工湿地设计过程中也出现各种公式滥用甚至混用的现象,这些因缺乏人工湿地设计规范,很大程度上阻碍了人工湿地的推广应用。

### 1.7 生态服务功能单一

根据 Costanza 等<sup>[36]</sup>对生态系统服务的划分原则,湿地生态系统服务的内涵可分为5类:①提供产品;②防洪减灾;③调节作用;④保护生物多样性;⑤社会文化载体。人工湿地能够净化污水,还能吸收  $CO_2$  释放  $O_2$ ,调节微气候,阻滞沙尘,清新空气,降低噪声,杀灭病菌,从而为人们提供更舒适的生活环境和休闲娱乐场所,同时还具有很高的文化科研功能。但是在实际应用过程中,人工湿地并没有表现出如此丰富的生态服务功能,相对来说比较单一,在工程应用上湿地植物的种类少,且基本属于水生草本,造成湿地结构单一的问题<sup>[37]</sup>,同时植物的景观价值较低,相比于传统的污水处理技术,景观生态价值是人工湿地的优势之一,湿地具有生物栖息地的生态价值,但是景观价值的增加可能会提高湿地的成本,因此,在人工湿地的设计中,投资者就削弱了其相比于传统污水处理技术的优势。同时在冬季的时候大部分植物一般会出现地上部枯死的现象,还因为管理者的定期收割植物,都使人工湿地丧失了一定的景观价值。同时,由于植物的收割或干枯,影响微生物活性,降低了冬季人工湿地污水处理效果。

## 2 解决措施

人工湿地中在运行中存在很多问题,本研究针

对以上提出的 7 个问题,提出了相关的解决措施,以期为人工湿地的运行与推广提供参考。

## 2.1 人工湿地的保温措施

低温对人工湿地造成了不利的影响,为了保证人工湿地的运行效果,国内外学者研究了各种保温措施,通过保温,减缓了植物休眠,促进了人工湿地对污染物的去除效果。

### 2.1.1 选择合适的湿地类型

按系统布水方式,人工湿地可分为表面流和潜流两种。在低温条件下,表面流人工湿地污水在表面流动,保温能力较差,水温降低易对微生物数量和活性造成影响<sup>[38]</sup>,表面冰层使大气复氧能力下降,导致运行效果不佳。而潜流型人工湿地则具有一定的优势,潜流型湿地与大气之间有覆盖层隔断,在冬季对污水在床体中的保温效果较好<sup>[39]</sup>。同时,潜流型人工湿地在处理过程中被表层土覆盖,可减少因污水蒸发蒸腾和流动造成的能量损失<sup>[40]</sup>。刘学燕等<sup>[41]</sup>开展了潜流人工湿地系统处理官厅水库水的冬季实验研究,结果表明,潜流人工湿地系统在隔离层保护下可以正常运行,并且,潜流人工湿地在冬季寒冷低温条件下对微污染地表水有较好的净化效果。因此,相对于其他湿地而言,潜流人工湿地在冬季或北方寒冷地区使用更具有优势,而在寒冷地区人工湿地的应用研究中大多数也都采用潜流型。

### 2.1.2 设计覆盖层

覆盖物在整个湿地保温中起到隔离作用,有效的隔离可以提高湿地的污水处理效率。华莱士等<sup>[42]</sup>认为,好的覆盖材料应具有以下特性:能完全分解而不影响系统正常运行;pH 为中性;结构蓬松;纤维含量高;隔热性好;易使种子在覆盖物上生长;有较好的湿气涵养能力。非理想的覆盖材料不利于植物的生长,导致植物根渗水困难,另外,非理想的覆盖物还会降低处理效果。目前对于覆盖层有植物覆盖、地膜覆盖等,各种覆盖方法都有它们的优缺点(见表 3),但是在应用过程中要综合考虑各方面因素,选择合适的覆盖方法以预防低温对湿地造成不利影响。

#### (1) 植物覆盖

目前的植物覆盖材料包括直接将实地表面枯萎

植物收割进行实地均匀覆盖,也可以选择其他的植物,如稻草、麦秆、炭化后的芦苇屑等。李亚峰等<sup>[43]</sup>采用炭化后的芦苇屑对沈阳某人工湿地进行保温后,湿地可以正常运行,出水效果良好。张显龙等<sup>[39]</sup>在沈阳冬季将湿地植物芦苇、美人蕉、灯心草等收割铺在湿地表面,再在上面覆盖一层薄膜,填料床内被处理的污水水温可以保持在 15~18℃。当塑料薄膜上有比较厚的积雪时,更能使湿地内水温有所提高。此方法对表面流、潜流湿地都有很好的保温效果。植物覆盖操作较为简单,但植物腐烂会释放出一定量的污染物,有可能造成二次污染,因此必须在第二年开春前将覆盖植物清除。此外植物的枯叶会随风飘扬,可能会影响周围的卫生环境。

#### (2) 地膜覆盖

地膜覆盖是根据农业种植中的地膜技术发展来的,将其用作湿地的保温措施。张建等<sup>[44]</sup>在湿地表面覆盖塑料地膜,发现覆盖地膜后能有效地提高系统对污染物的去除效果,氨氮平均去除率由 29.4% 上升到 67.6%,COD 的平均去除率由 29.0% 提高到 46.6%,同时,覆盖地膜后系统温度的升高能提高系统中微生物的活性。维维国等<sup>[45]</sup>通过在人工湿地的植物表面覆盖多层 PVC 透气薄膜,有效提高湿地内温度,防止了结冰并减缓了植物休眠,提高了湿地的脱氮效果。地膜覆盖法其覆盖膜易破、铺设操作较为复杂、投资较高,且来年必须清理并妥善处理,否则会造成白色污染,难以在野外大面积应用。

#### (3) 其他覆盖方法

除了以上的覆盖方法,许多学者还研究将两种方法或几种方法结合使用,既提高了污水的温度,也提高了人工湿地对污水的净化能力。刘学燕等<sup>[41]</sup>采取 5 cm 空气 + 10 cm 冰层和 5 cm 缝隙 + 15 cm 秸秆对人工湿地进行隔离保护,冬季低温条件下能正常运行,但使用不同的覆盖物进行隔离保温,对系统的处理性能有很大的影响,使用空气层加秸秆等隔离物保护的效果优于空气层加冰层保护的效果。该方法是未来保温措施发展的方向,将几种措施结合起来,可以达到扬长避短,但是在实际应用中也要具体情况具体分析,尽量选择适宜的方法对湿地进行保温,减少气候温度条件对人工湿地的影响。

表 3 各设计覆盖层保温方法优缺点

Table 3 Advantages and disadvantages of different designs of covering layers for holding temperature

| 设计覆盖层  | 优点         | 缺点                  |
|--------|------------|---------------------|
| 植物覆盖   | 操作简单       | 可能造成二次污染,影响周边环境卫生,  |
| 地膜覆盖   | 提高了湿地的脱氮效果 | 投资高,操作复杂,难以在野外大面积应用 |
| 其它覆盖方法 | 扬长避短       | 具体情况具体分析            |

## 2.2 减少占地面积

人工湿地存在占地面积大的问题。据了解,白泥坑人工湿地污水处理场占地 12.6 亩,雁田人工湿地共占地 10 亩,由于自身处理的特殊性,使得人工湿地技术在占地上的问题很难解决。但是可以采取一些适当的措施减少湿地占用土地资源。首先在选址时要综合考虑规模、环境和经济效益,为了不占用市区宝贵的土地资源,可将工程选在市郊区域,这样做还能减轻风沙等对市区的影响和破坏<sup>[8]</sup>。另外,可采取组合工艺,如水平流型湿地占用面积大,可以采取将水平流型湿地和其他构型的人工湿地或是其他的污水处理工艺组合,这样既可以减少湿地的占用面积,还可以提高对污水的处理效果。如雷俊山等<sup>[46]</sup>研究示范工程中垂直-水平流人工湿地系统对生活污水的净化效果。结果表明,在人工湿地水力停留 3 d 的情况下,垂直-水平流人工湿地系统对 COD、SS、TP 和 TN 均具有明显去除效果。

## 2.3 湿地堵塞的防治措施

随着人工湿地的日益推广和应用,越来越多的人开始研究堵塞问题,目前常用的预防措施有:对进水进行预处理,选择合适的基质粒径和级配、选择合适的植物和污染负荷、合理的运行方式,以及一些强化措施等。

### 2.3.1 加强对污水的预处理

预处理可以降低湿地进水中的悬浮物和有机负荷,有效预防人工湿地堵塞的发生。常见的预处理工艺有格栅、厌氧沉淀、混凝沉淀等。加强污水的预处理,主要是为了去除污水中的悬浮物质,以减少悬浮物对系统造成堵塞。对污水进行预处理虽可有效推迟基质堵塞发生的时间,却不能杜绝基质堵塞的发生,并会增大系统的投资、运行成本以及维护管理难度。因此要对投资、运行成本及由此产生的效果进行权衡。

### 2.3.2 人工湿地的设计

选择合适的湿地植物、基质、水力负荷对于预防基质的堵塞是非常重要的,同时在湿地系统中安装清淤装置或反冲洗装置都有助于改善湿地的堵塞情况。对于人工湿地的基质,在满足出水水质的情况下,应选择粒径大、空隙率高的填料,同时,不同粒径填料之间的配比选择和级配对防止堵塞也十分重要;在选择植物时可考虑选用根际复氧能力强、分泌难降解物质较少的植物作为湿地植物<sup>[47]</sup>,并根据湿地系统的运行方式适当调整负荷。定期启动湿地内部的清淤系统,及时将有机质沉淀物排出,保

证湿地基质间的空隙,使污水在基质间流态稳定并定期进行反冲洗也可改善人工湿地的堵塞。

### 2.3.3 合适的运行方式

人工湿地的间歇运行和适当的湿地干化期,会使基质得到休息,保证基质一定的好氧状态,避免胞外聚合物的过度积累,从而防止基质堵塞<sup>[48]</sup>。Watson 等<sup>[49]</sup>也认为,采用间歇投配污水(即落干和投配交替运行)会使土壤得到“休息”,保证土壤一定的好氧状态,避免胞外聚合物的过度积累,防止土壤堵塞。目前间歇运行方式在我国的许多工程和实验中,得到了重视和应用,同时也取得了一定的效果。

### 2.3.4 更换基质

大量的研究表明人工湿地中有机物的积累主要发生在表层,而人工湿地的堵塞也主要发生在湿地表层 0~15 cm 处<sup>[50]</sup>。因此对于堵塞严重的人工湿地更换湿地表层填料可以改善湿地表层的堵塞,保持人工湿地的稳定运行,但是该方法对大规模的湿地而言工程量较大、更换困难,更换的时候人工湿地需要停床并且更换所花时间长,湿地系统及植物也需要很长时间才能适应,因此在采用该方法时要综合考虑以上有可能带来的问题。

### 2.3.5 停床休整与轮作

通过停床休整与轮作,一方面可以使大气中的氧进入湿地内部,促进好养微生物的活性,加快降解基质中沉积的有机物;另一方面由于系统停止进水,微生物新陈代谢需要的各种营养物得不到持续的补充,从而抑制微生物的生长。这类措施需要建造多个平行湿地,Cooper<sup>[51]</sup>认为在设计湿地时应采用 4 个或更多的平行湿地,轮流运转,因此,在采用这类措施时要考虑系统的投资费用。

### 2.3.6 投加蚯蚓

通过向已经堵塞的人工湿地中投加合适的蚯蚓可以改善湿地堵塞情况,延长其使用寿命,同时在冬季植物收割后,土壤动物可以起到清扫植物碎屑的作用。采用投加蚯蚓的方法费用低廉,施工维护简单;符合农村社会经济条件,符合生态化处理特点,但这种方法还处于初步研究阶段,实际工程效果还有待进一步验证。

## 2.4 建立完整的数据库

由于人工湿地受植物和基质种类、污染负荷和运行方式的影响较大,应加强不同种类植物和基质对各类污水中污染物的去除机制研究;目前大型人工湿地工程的运行参数也没有真正的设计、运行和维护规范,基于以上情况,可考虑将正在运行的湿地

系统的处理数据集中起来,建立专门的数据库,在数据库的基础上,利用技术及建模开发更多更实用的人工湿地模拟模型软件,降低各种因素对人工湿地的影响。同时,对已获得模型及参数的人工湿地系统各类要素进行更为系统、全面地描述及科学分类,提高已有模型及其参数的可用性,并结合不同地区的具体情况深入开展人工湿地处理特殊废水的研究工作,取得适合于不同地区、不同环境、不同气候条件及不同特性废水的实用数据库。建立人工湿地数据库,减小建设低效湿地的风险,将模型理论应用到实际中,为人工湿地的广泛应用提供科学的指导。

## 2.5 加强人工湿地的维护管理

定期对植物进行收割可以减少植物之间因化感作用相互影响或是因植物的枯枝落叶经水淋或微生物的作用释放出克生物质,抑制自身的生长;同时,从审美的角度来看,在每年秋天收割植物后会使得来年春天植物生长更旺盛和美观。

人工湿地植物病虫害也是湿地管理中需要注意的问题。人工湿地作为一个人工生态系统,也会发生病虫害,病虫害的发生对人工湿地的运行效果特别是对植物的产量将会造成较大影响,进而影响湿地对污水的净化效果。但是在使用杀虫剂控制植物病虫害时,所用的杀虫剂不能对人工湿地系统产生影响,否则不仅会降低湿地的处理效果,同时还会造成二次污染。

人工湿地在低温运行时对湿地的管理非常重要,低温对人工湿地造成了不利的影响,采取一定的保温措施,可以减缓植物的休眠,促进人工湿地对污

染物的去除效果。

对人工湿地采取一定预防堵塞的措施和应对措施,对进水进行预处理和定期对湿地进行清淤都可以减少湿地堵塞情况的发生。从现有人工湿地工程的考察发现,清淤不及时导致了大量淤泥沉积,影响湿地的净化效果。

因进水中污染物类型、浓度等的差异会使人工湿地对氮磷的去除率造成较大的影响,保持人工湿地进水水质的稳定是非常重要的。同时,实时监测出水水质,可以保证出水水质达标排放。

定期对人工湿地处理系统进行详细检查,包括进水管是否堵塞,护堤及闸阀是否损坏,湿地是否有渗漏情况等,若出现这些情况,要及时采取相应的应对措施,因为这些情况会造成人工湿地中水位及水量的变化,水位的改变会影响人工湿地处理系统的水力停留时间,同时对大气中的氧向水相扩散造成影响,进而影响人工湿地对污染物的去除效果。

表面流人工湿地易滋生蚊蝇以及因负荷过高形成厌氧而释放出难闻的气体,因此,对于表面流型人工湿地要采取相关措施控制蚊蝇及气味。

在湿地边壁设 15 ~ 20 cm 超高,可以防止外来水进入湿地,通过水位控制装置进行快速排水,可以防止因夏季暴雨而使湿地长期处于水淹状态<sup>[52]</sup>。

图 1 为人工湿地管理的内容,其中管理的范围涉及湿地植物、水质的管理还有其他的相关部分的管理。科学的运行管理可以保持人工湿地处理系统对污染物稳定、高效地去除效果,同时适当的管理维护,还可以解决人工湿地可能带来的负面生态问题,充分发挥其美化景观、丰富物种的生态效应。

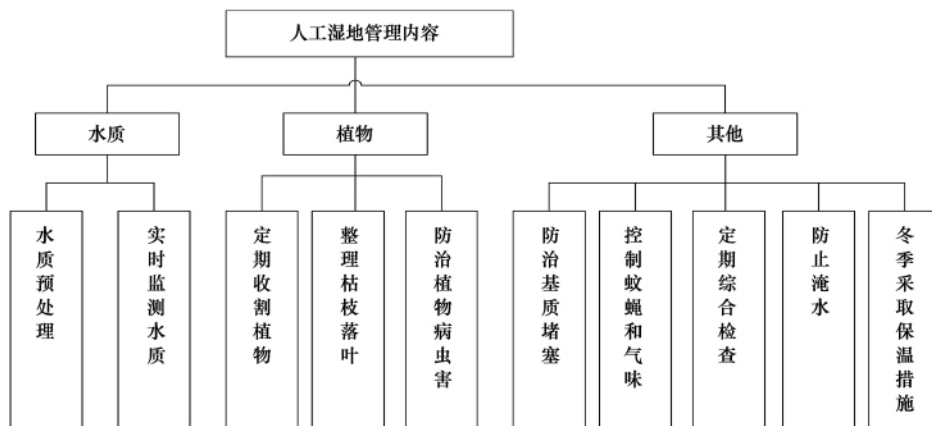


图 1 人工湿地管理内容

Fig. 1 Content of constructed wetland management

## 2.6 形成一套完整的人工湿地设计方法

人工湿地作为一种生态处理工艺,还没有形成

一套合理的人工湿地设计方法,设计缺乏规范化,想要形成一套合理的人工湿地设计方法,首先必须要

了解其净化机理,确定湿地中基质、植物和微生物的作用,明确其转化过程,综合考虑植物、基质、厂址、进出水装置、防渗层和保温层等各种影响因素,同时将现行人工湿地系统的处理数据集中起来,建立完整的数据库,确定具体的物料平衡方程、反应公式和相关动力学参数,运用软件对模型、参数及方程进行反复的修正和验证,使人工湿地工艺系统的设计方法更为系统和全面。同时,在相关部门的统一领导下,在科研、设计和施工单位共同参与下,编制出一套完整的湿地设计手册,并制定相应的设计规范和标准,推导出单项的设计指标,有利于人工湿地的推广应用。

## 2.7 湿地生态系统恢复与重建

针对目前人工湿地生态服务功能单一的现状,要采取一定的措施恢复和重建人工湿地生态服务功能。对湿地的恢复和重建方面,美国政府及有关部门引起了足够的重视,给予了极大的支持,做出了巨大的努力,取得了明显的成效。欧洲一些国家也开展了大量水域生态系统回复工作,并取得明显成效。总的看来,发达国家政府和科学家们关注的焦点已迅速从内陆水体生物生产力的开发转移到水环境保护上来。恢复和重建受损湿地已越来越被人们所认识并逐步形成研究的热点。余国营<sup>[53]</sup>以湖泊湿地、沼泽和沼泽化湿地为研究对象,提出了湿地生态系统恢复和重建的研究内容为:① 湿地恢复与重建生态学研究方法和技术;② 湿地功能划分及其相应指标体系研究;③ 湿地净化功能与环境容量研究;④ 水产养殖与水环境质量变化的相互关系及优化模式研究;⑤ 湿地营养负荷、循环途径及其与水体富营养化的关系研究;⑥ 湿地生态系统恢复重建生态工程技术开发;⑦ 湿地生态系统恢复重建综合评价体系(指标、方法与规范)。

## 3 结论

(1) 人工湿地堵塞是目前人工湿地在运行中的一个比较棘手也是亟待解决的重要问题,应着重进行人工湿地堵塞机理的研究,寻找能有效解决人工湿地堵塞的方法,同时在人工湿地设计时要充分考虑各种预防堵塞的辅助性措施,延长人工湿地的使用寿命,提高其应用价值。

(2) 我国具有丰富的人工湿地资源,应加强我国人工湿地污水处理工程的科学化、规范化管理,充分发挥人工湿地丰富的生态服务功能,使人工湿地在有效处理污水,改善环境的同时,也带来一定的

景观价值和经济价值。

(3) 鉴于人工湿地设计的不规范,编制一套适合我国国情、切实可行的人工湿地污水处理工程技术规范,用于指导人工湿地污水处理工程的技术应用和运行管理。同时人工湿地与其它设施的结合也是今后重点解决的问题,只有解决了这些问题,人工湿地的推广应用才能规范健康发展。

(4) 人工湿地与传统的污水处理技术相比,的确表现出了很多优越性,但是目前对人工湿地的去除机理还处于“黑箱效应”,还有很多问题没有解决。因此,在推广应用时应慎重,特别是在大面积使用时应充分考虑该技术有可能带来的一系列影响,避免盲目推广。同时也要加强对人工湿地的研究,为人工湿地的应用提供理论参考和技术指导。

### 参考文献:

- [1] 张虎成,田卫,俞穆清,等. 人工湿地生态系统污水净化研究进展[J]. 环境污染治理技术与设备,2004,5(2): 11-15.
- [2] 刘强,李亚峰,程琳. 人工湿地对污染物的净化功能及存在问题[J]. 辽宁化工,2008,37(4): 255-257.
- [3] 宋志文,毕学军,曹军. 人工湿地及其在我国小城市污水处理中的应用[J]. 生态学杂志,2003,22(3): 74-78.
- [4] 刘超翔,胡洪营,张建,等. 不同深度人工复合生态床处理农村生活污水的比较[J]. 环境科学,2003,24(5): 92-96.
- [5] 项学敏,杨洪涛,周集体,等. 人工湿地对城市生活污水的深度净化效果研究: 冬季和夏季对比[J]. 环境科学,2009,30(3): 713-719.
- [6] Huang J, Reneau R B, Hagedorn C. Nitrogen removal in constructed wetlands employed to treat domestic wastewater[J]. Water Research,2000,34(9): 2582-2588.
- [7] 籍国东,孙铁珩,李顺. 人工湿地及其在工业废水处理中的应用[J]. 应用生态学报,2002,13(2): 224-228.
- [8] Comin F A. Nitrogen removal and cycling in restored wetlands used as filters of nutrients for agricultural runoff[J]. Water Science and Technology,1997,35(5): 255-261.
- [9] Raisin G W, Mitchell D S. The use of wetlands for the control of non-point source pollution[J]. Water Science and Technology,1995,32(3): 177-186.
- [10] Braskerud B C. Factors affecting phosphorus retention in small constructed wetlands treating agricultural non-point source pollution[J]. Ecological Engineering,2002,19(1): 41-61.
- [11] Braskerud B C. Factors affecting nitrogen retention in small constructed wetlands treating agricultural non-point source pollution[J]. Ecological Engineering,2002,18(3): 351-370.
- [12] Díaz F J, O'Geen A T, Dahlgren R A. Agricultural pollutant removal by constructed wetlands: Implications for water management and design[J]. Agricultural Water Management,2012,104: 171-183.
- [13] Mays P A, Edwards G S. Comparison of heavy metal accumulation in a natural wetland and constructed wetlands receiving acid mine drainage[J]. Ecological Engineering,2001,

- 16(4): 487-500.
- [14] Nyquist J, Greger M. A field study of constructed wetlands for preventing and treating acid mine drainage [J]. *Ecological Engineering*, 2009, **35**(5): 630-642.
- [15] 夏汉平, 柯宏华, 邓钊平, 等. 人工湿地处理炼油废水的生态效益研究[J]. *生态学报*, 2003, **23**(7): 1344-1355.
- [16] Cookson W R, Cornforth I S, Rowarth J S. Winter soil temperature (2-15°C) effects on nitrogen transformations in clover green manure amended or unamended soils: a laboratory and field study [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2002, **34**(10): 1401-1415.
- [17] 聂志丹, 年跃刚, 李林峰, 等. 水力负荷及季节变化对人工湿地处理效率的影响[J]. *给水排水*, 2006, **32**(11): 28-31.
- [18] 汪映萍, 张平. 低温污水强化处理工艺研究[A]. 见: 全国建筑给排水委员会给水分会、热水分会、青年工程师协会联合年会论文集[C]. 2008. 169-175.
- [19] USEPA. Compendium method TO-11A: determination of formaldehyde in ambient air using adsorbent cartridge followed by high performance liquid chromatography (HPLC) [R]. 1999.
- [20] Gerke R Baker L A, Xu Y. Nitrogen transformations in a wetland receiving lagoon effluent: sequential model and implications for water reuse [J]. *Water Research*, 2001, **35**(16): 3857-3866.
- [21] Office of Water, US. EPA. Subsurface flow constructed wetlands for wastewater treatment-a technology assessment[R]. EPA 832-R-93-008(4204). United States: Office of Water, 1993.
- [22] Farahbakhshazad N, Morrison G M, Filho E S. Nutrient removal in a vertical upflow wetland in Piracicab, Brazil [J]. *AMBIO: A Journal of the Human Environment*, 2000, **29**(2): 74-77.
- [23] 李科德, 胡正嘉. 芦苇床系统净化污水的机理[J]. *中国环境科学*, 1995, **15**(2): 140-144.
- [24] 成水平, 夏宜琤. 香蒲、灯芯草人工湿地的研究——II. 净化污水的空间[J]. *湖泊科学*, 1998, **10**(1): 62-66.
- [25] Sérodes J B, Normand D. Phosphorus removal in agricultural wastewater by a recently constructed wetland [J]. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 1999, **26**(3): 305-311.
- [26] Koottatep T, Polprasert C, Oanh N T K, *et al.* Septage dewatering in vertical-flow constructed wetlands located in the tropics [J]. *Water Science and Technology*, 2001, **44**(2-3): 181-188.
- [27] 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, **12**(1): 47-51.
- [28] 刘文样. 人工湿地在农业面源污染控制中的应用研究[J]. *环境科学研究*, 1997, **10**(4): 15-19.
- [29] 刘全中. 人工湿地系统水质净化技术的工艺技术[J]. *给水排水*, 2001, **27**(8): 35-36.
- [30] Kadlec R H, Knight R L. Treatment wetlands: Allelopathy as a Means of Biological Control of Water Weeds [R]. New York: Lewis Publishers, 1996.
- [31] 王庆安, 黄时达, 孙铁钊. 湿地植物光合作用向水体供氧能力的试验研究[J]. *生态学杂志*, 2000, **19**(5): 45-51.
- [32] 高拯民, 李宪法. 城市污水土地处理利用设计手册[M]. 北京: 中国标准出版社, 1990.
- [33] 宋铁红, 尹军, 崔玉波. 不同进水方式人工湿地除污效率对比分析[J]. *安全与环境工程*, 2005, **12**(3): 46-48, 51.
- [34] 邵丽, 林志祥, 张洪海, 等. 人工湿地存在的问题及解决措施[J]. *云南农业大学学报*, 2009, **24**(4): 603-606, 613.
- [35] Szczepański A J. Allelopathy as a means of biological control of water weeds [J]. *Aquatic Botany*, 1977, **3**: 193-197.
- [36] Costanza R, D'Aege R, Groot R D, *et al.* The value of the world's ecosystem services and natural capital [J]. *Nature*, 1997, **387**(6630): 253-260.
- [37] 陈永华, 吴晓芙, 郝君, 等. 人工湿地植物应用现状与问题分析[J]. *中国农学通报*, 2011, **27**(31): 88-92.
- [38] Bachand P A M, Horne A J. Denitrification in constructed free-water surface wetlands: II. Effects of vegetation and temperature [J]. *Ecological Engineering*, 1999, **14**(1-2): 17-32.
- [39] 张显龙, 周力. 人工湿地处理城市污水在北方的应用[J]. *环境工程*, 2005, **23**(4): 23-24.
- [40] Wallace S, Parkin G, Cross C. Cold climate wetlands: design & performance [A]. In: Presented at the 7th International Conference on Wetland Systems for Water Pollution Control [C]. Florida: Lake Buena Vista, 2000. 11-16.
- [41] 刘学燕, 代明利, 刘培斌. 人工湿地在我国北方地区冬季应用的研究[J]. *农业环境科学学报*, 2004, **23**(6): 1077-1081.
- [42] 华莱士·S, 帕金·G, 考思·C. 寒冷地区污水处理的人工湿地设计与运行[J]. *中国环保产业*, 2003, (6): 40-42.
- [43] 李亚峰, 刘佳, 王晓东, 等. 垂直流人工湿地在寒冷地区的应用[J]. *沈阳建筑大学学报(自然科学版)*, 2006, **22**(2): 281-284.
- [44] 张建, 邵文生, 何苗, 等. 潜流人工湿地处理污染河水冬季运行及升温强化处理研究[J]. *环境科学*, 2006, **27**(8): 1560-1564.
- [45] 雒维国, 王世和, 黄娟, 等. 潜流型人工湿地低温域脱氮效果研究[J]. *中国给水排水*, 2005, **21**(8): 37-40.
- [46] 雷俊山, 叶闵, 余秋梅, 等. 垂直-水平流人工湿地系统除污效果研究[J]. *人民长江*, 2008, **39**(23): 77-79.
- [47] Winter K J, Goetz D. The impact of sewage composition on the soil clogging phenomena of vertical flow constructed wetlands [J]. *Water Science and Technology*, 2003, **48**(5): 9-14.
- [48] 张帆, 陈晓东, 常文越, 等. 潜流湿地系统防堵塞设计及运行措施探讨[J]. *环境保护科学*, 2009, **35**(1): 24-26.
- [49] Waston J T, Danzing A J. Pilot-scale nitrification studies using vertical flow and shallow horizontal flow constructed wetlands cells [A]. In: Constructed Wetlands and Water Quality Improvement [C]. Boca Raton: Lewis Publishers, 1993.
- [50] Platzer C, Mauch K. Soil clogging in vertical flow reed beds—mechanisms, parameters, consequences and . . . . . solutions [J]. *Water Science and Technology*, 1997, **35**(5): 175-181.
- [51] Cooper P. A review of the design and performance of vertical-flow and hybrid reed bed treatment systems [J]. *Water Science and Technology*, 1999, **40**(3): 1-9.
- [52] 张秋贞, 王立彤, 郭淑琴. 人工湿地的工艺设计探讨[J]. *给水排水*, 2009, **35**(增刊): 161-164.
- [53] 余国营. 湿地研究进展与展望[J]. *世界科技研究与发展*, 2000, **22**(3): 61-66.