

人工湿地在我国北方地区冬季应用的研究

刘学燕¹, 代明利², 刘培斌³

(1. 中国农业大学环境工程系, 北京 100094; 2. 北京师范大学环境科学研究所, 环境模拟与污染控制国家重点联合实验室, 北京 100875; 3. 北京市水利科学研究所, 北京 100044)

摘要: 为确定利用人工湿地在北方地区冬季运行所需的设计参数, 利用在官厅水库岸边建立的人工湿地, 开展了潜流人工湿地系统处理官厅水库水的冬季试验研究。结果表明, 在寒冷的冬季, 潜流人工湿地系统在隔离层保护下可以正常运行, 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, 在水力负荷率为 $0.25 \sim 0.45 \text{ m} \cdot \text{d}^{-1}$ 时, 冬季 COD_{Mn} 和 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的去除率分别为 15% 和 50%, BOD_5 、TN 和 TP 的去除率分别为 65%、25% 和 35%。去除率随水力负荷率的提高而降低, 当水力负荷超过 $0.4 \text{ m} \cdot \text{d}^{-1}$ 时, 去除率明显降低。潜流人工湿地系统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。

关键词: 低温寒冷; 人工湿地; 水质改善

中图分类号: X703.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2043(2004)06-1077-05

Application of Subsurface Flow Constructed Wetland in North Area of China in Winter

LIU Xue-yan¹, DAI Ming-li², LIU Pei-bin³

(1. Environmental Engineering Department, China Agricultural University, Beijing 100094, China; 2. State Key Joint Laboratory of Environmental Simulation and Pollution Control, Institute of Environmental Sciences, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 3. Beijing Hydraulic Research Institute, Beijing 100044, China)

Abstract: To determine the designing parameters and the laws necessary for constructed wetland running in north area of China in winter, We studied experimentally the removal effect of BOD_5 , COD_{Mn} , P and N by subsurface flow wetland system in the reservoir in winter under the different conditions of hydraulic loading rate, using the artificial wetland built at the edge of Guanting Reservoir which reconstructed on the foundation of constructed wetland beginning to running in spring. The results indicated that the subsurface flow wetland system covered with heat-insulation stuff could operate normally in cold winter. The treatment capability of the system varied with heat-insulation stuff, and when the hydraulic loading rate was $0.25 \sim 0.45 \text{ m} \cdot \text{d}^{-1}$ on average, the removal rates of COD_{Mn} , $\text{NH}_4^+ - \text{N}$, BOD_5 , TN and TP were 15%, 50%, 65%, 25% and 35%, respectively. The removal rates decreased with the increase of hydraulic loading rate and decreased remarkably when the hydraulic loading rate exceeded $0.4 \text{ m} \cdot \text{d}^{-1}$. These results demonstrated that the subsurface flow constructed wetland system could well purify the micro-polluted surface water at low temperature in winter.

Keywords: low temperature; constructed wetland; water quality improvement

将人工湿地用于污水处理具有许多优势,但由于人工湿地是一个人工的自然系统,受气候影响比较大,特别是在冬季,存在防冻和植被枯死、表面冻结造成床体缺氧等许多问题。潜流式人工湿地最早是在德国建造的,其主要优势是污水在处理过程中被覆盖起来,使污水因蒸发和流动造成的能量损失最小。这种人工湿地更适宜在冬天运行。在寒冷地区使用人工湿地技术,因为冬季严寒,能使人工湿地系统冻结,甚至

发生管道破裂等问题,所以在冬季要求对其进行隔离保护。为了更有效地隔离,必须在设计的时候就将均衡地布置覆盖物作为人工湿地系统的一个主要部分。将覆盖物用作隔离物,在解决系统冰冻问题方面具有很高的效率。被隔离的人工湿地系统的计算机模型显示,即使在 -20°C 的低温,适当的隔离也可有效地解决人工湿地系统的冰冻问题^[1]。

在我国北方利用人工湿地系统改善地表水水质的研究,特别是在冬季低温下应用性研究很少。为了探索人工湿地应用于我国北方地区处理微污染地表水的可行性,为在我国北方推广此污水处理技术系统

收稿日期: 2004-03-30

基金项目: 国家重点科技攻关计划项目(96-920-40-04)

作者简介: 刘学燕(1979—),男,江西泰和人,硕士研究生,主要从事流域污染控制研究。E-mail: liuxyzx@eyou.com

提供设计参数和运行规律, 作者在原有的官厅水库人工湿地春季开始运行的基础上, 对其进行改造, 开展了潜流人工湿地系统在不同水力负荷率条件下对官厅水库水中有有机物和氮、磷的去除效果研究。

1 材料与方法

1.1 人工湿地系统

原人工湿地系统位于河北省怀来县黑土洼村官厅水库旁, 设 5 个面积相等的湿地单元, 总面积为 200 m², 湿地进、出区水位差为 0.16 m。湿地采用水平潜流结构, 底部的平均坡度为 0.8%, 0.5 mm 厚的塑料薄膜防渗, 基质分为 3 层, 厚度均为 20 cm, 下边是粒径为 2.0 cm 左右的砾石层, 中间是粒径为 0.5 cm 左右的砂砾层, 上边是当地的沙质土壤, 最上面设 25 cm 厚的保护高度, 进水区和出水区由砾石构成, 出水管的位置可调控, 芦苇和蒲草混合种植。在人工湿地之前设有沉淀池, 以保证湿地进水中较低的悬浮物含量。本实验人工湿地系统在 11 月份对原有系统进行保温改造后连续运行, 进水为官厅水库水。整个人工湿地系统分两个保温系统: 进出水管道及进水泵房的保温系统和人工湿地床的保温系统。

(1) 进出水管道及进水泵房的保温系统: 由于冬季气温低, 最低可达到 -20℃ ~ -30℃, 为防止进出水管道受冻甚至破裂, 进出水管道采用暗沟形式和埋地形式。泵房及出水井均用厚墙 (0.4 m) 保护, 并加厚顶覆盖。

(2) 人工湿地床的保温系统: 为防止人工湿地系统冻结, 对其采用隔离保护。在实验人工湿地中采用两种方法进行对比实验: 5 cm 空气 + 10 cm 冰层保护 (3 号湿地) 和 5 cm 缝隙 + 15 cm 秸秆隔离保护 (1、2、4、5 号湿地)。

1.2 实验方法与分析指标

实验运行期为 2002 年 11 月至 2003 年 3 月。为保证隔离层与人工湿地间保持 5 cm 的空气层, 实验采用低水位运行。监测指标为: BOD₅、COD_{Mn}、NH₄⁺ - N、TN 和 TP, 均采用国家标准方法测定。

2 结果与分析

2.1 污水处理效果分析

人工湿地在整个运行期间, 除 11 月和 3 月份水温偏高基本在 2℃ ~ 9℃ 内变化外, 12 月—2 月水温都在 0℃ ~ 1℃ 间。水力负荷以常温运行状态为依据扩大变化范围设定。

2.1.1 有机物的去除效果分析

图 1 给出了潜流人工湿地 BOD₅ 的去除效果。可以看出, 系统对 BOD₅ 有较高的去除率, 但是去除率的波动比较明显, 但总体趋势比较平稳, 随着湿地运行时间增加稍有上升。当水中的 BOD₅ 浓度在 7.0 ~ 14.0 mg · L⁻¹ 之间波动时, 潜流人工湿地对它的平均去除率为 65% 左右。

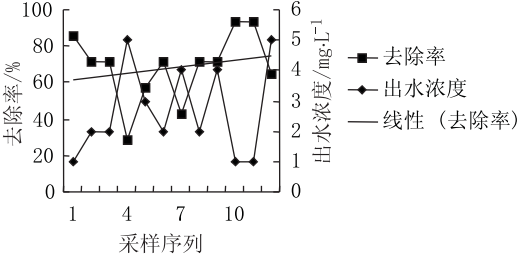


图 1 BOD₅ 的去除效果
Figure 1 Removal effect of BOD₅

官厅水库水冬季进水污染物 COD_{Mn} 浓度基本在 4.7 ~ 8.0 mg · L⁻¹ 之间。

COD_{Mn} 的去除效果如图 2, COD_{Mn} 的去除率在冬季呈现比较稳定趋势, 但在秋冬和冬春交替阶段表现出较大的差异。11 月, 随着我国北方气温的急剧下降, 微生物活性受到很大抑制, 去除率迅速降低, 其中 2 号和 5 号单元甚至表现为负值。由于 5 号湿地单元设计时并没有种植植物, 其中野生植物有限, 而且多为浅根植物, 微生物不能得到根系的保护, 所受到温度急剧降低的冲击更为明显, 几乎失去处理的能力, 在植物残渣等的影响下, 导致去除率达到最大负值 -21.6%。但在随后随着耐低温微生物的逐渐增加, 去除率又逐步回升到较高水平。在 12 月后, 气温继续降低, 最低时达到 -20℃ ~ -30℃, 系统对有机物的氧化分解能力降低, 但最终可以稳定在 15% 左右的去除率水平, 并且趋于平稳。整个冬季 2 ~ 5 号湿地单元的 COD_{Mn} 去除率平均分别为 16.9%、7.9%、14.6% 和 23.8%。3 月气温开始回升, 微生物迅速繁殖, 总量增加, 活性增强, 同时, 冬季积累的有机物的释放, 导致进水浓度比 2 月增大, 因此对 COD_{Mn} 的净化效率又很快提升, 平均达到约 30% 的水平。

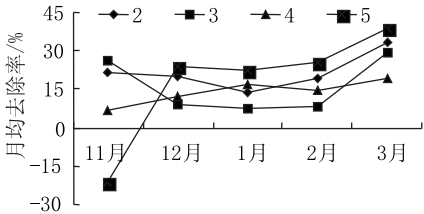


图 2 COD_{Mn} 去除率变化
Figure 2 Changes of the removal rates of COD_{Mn}

2.1.2 氮磷去除效果分析

氨氮 ($\text{NH}_4^+ - \text{N}$) 由于冬季污染源减少, 污染物 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 在整个冬季保持在较低水平。在 3 月份, 因温度回升冬季降水积累的有机物及水体中植物残渣碎屑的分解加快, 导致进水浓度稍有增加。

$\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的去除效果如图 3。 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的去除率在整个冬季运行期间各个湿地均仍然保持在较高水平, 但总体上 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 在冬季比其他季节的去除率水平还是有所下降, 2—5 号各湿地单元 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的平均去除率分别为 49.4%、42.9%、46.4% 和 49.4%。在由秋至冬和由冬至春的气温变化下, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的去除率和 COD_{Mn} 的冬季去除率变化趋势基本一致, 即在 11 月急剧降温后微生物活性降低, 大量高温微生物死去, 去除率下降, 同样 5 号单元因根系缺乏对低温的抵抗力下降, 去除率降为最低的 -66.9%; 在 12 月至 2 月间各湿地单元去除率较为稳定; 到 3 月, 随着温度回升去除率也呈上升趋势, 基本都达到 80% 左右的水平。

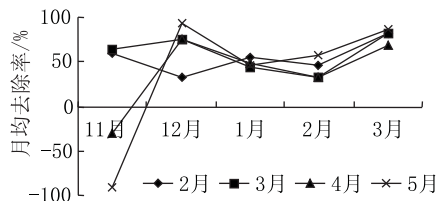


图 3 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 去除率变化

Figure 3 Changes of the removal rates of $\text{NH}_4^+ - \text{N}$

图 4 给出了潜流人工湿地对 TN 的去除效果。可以看出, 系统对 TN 的去除效果明显, 去除率的波动也比较明显, 但总体趋势比较平稳, 随着湿地运行时间稍有上升。当水中的 TN 浓度在 $2.1 \sim 2.6 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间波动时, 潜流人工湿地对它的平均去除率为 25% 左右。

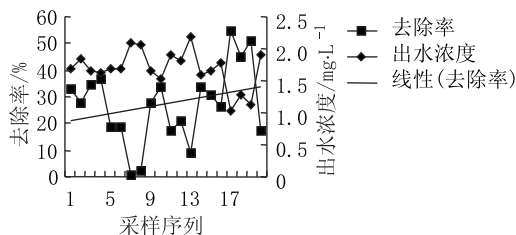


图 4 TN 去除效果

Figure 4 Removal effect of TN

图 5 给出了潜流人工湿地对 TP 的去除效果。可以看出, 系统对 TP 的去除效果明显, 且总体趋势比较平稳。当水中的 TP 浓度在 $0.065 \sim 0.080 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间波动时, 潜流人工湿地对它的平均去除率为 35%

左右。

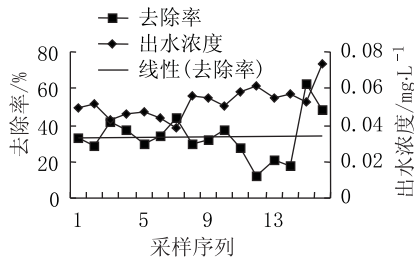


图 5 TP 去除效果

Figure 5 Removal effect of TP

2.2 水力负荷对人工湿地净化效果的影响

试验期间 (2002 年 1 月—3 月), 1—2 月份水温都在 $0^\circ\text{C} \sim 1^\circ\text{C}$ 间; 3 月份, 水温开始回升, 上中旬在 $1^\circ\text{C} \sim 4^\circ\text{C}$ 间, 下旬水温回升很快, 在 $4^\circ\text{C} \sim 9^\circ\text{C}$ 间。整个实验期间平均温度为 2.3°C (标准差为 2.6)。进水 COD_{Mn} 和 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 变化幅度不大, 分别在 $4.7 \sim 6.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $0.10 \sim 0.20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间波动; 3 月份, COD_{Mn} 和 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度较高, 最高分别达到 $8.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $0.8 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 可能与气温回升导致冬季污染积累的释放有关。

图 6 给出了 COD_{Mn} 和 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的平均去除率, 图 7 给出了水力负荷率与 COD_{Mn} 和 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 去除率之间的关系。从图中可以看出, 人工湿地系统对 COD_{Mn} 和 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的去除率受水力负荷率升高影响都有降低的趋势, 其中, COD_{Mn} 在水力负荷超过 $0.4 \text{ m} \cdot \text{d}^{-1}$ 时去除率很低, 甚至出现负值; 而 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 去除率在水力负荷超过 $0.4 \text{ m} \cdot \text{d}^{-1}$ 去除率也明显降低。由两条趋势线的斜率可以看出水力负荷与去除率的关系稳定, 在其他参数如温度等稳定时为一常量。其关系可以近似表示为:

$$y = -80x + a$$

式中, y 为去除率, %; x 为水力负荷, $\text{m} \cdot \text{d}^{-1}$; a 为人工湿地设计参数及进水水质等其他参数所决定的去除率效果常量。

2.3 温度对人工湿地净化效果的影响

在冬季实验期间, 12—2 月份温度基本在 $0^\circ\text{C} \sim 1^\circ\text{C}$, 但在 11 月和 3 月份温度具有较大的变幅。在平均

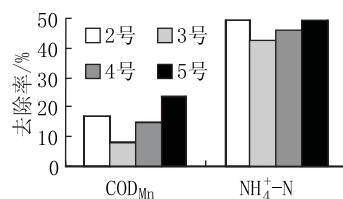


图 6 COD_{Mn} 和 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 平均去除率

Figure 6 Removal rates of COD_{Mn} and $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ on average

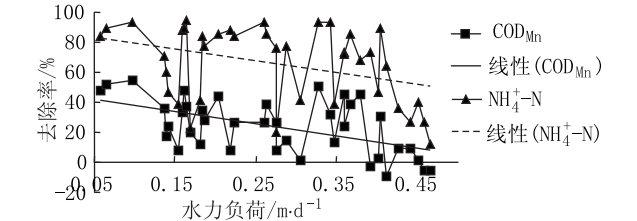


图 7 水力负荷率对 COD_{Mn} 和 NH₄⁺ - N 去除率的影响

Figure 7 Impact of hydraulic loading rate on the removal rates of COD_{Mn} and NH₄⁺ - N

水力负荷为 0.267 m · d⁻¹(标准差为 0.032) 时, 图 8 给出了温度与 COD_{Mn} 和 NH₄⁺ - N 去除率之间的关系。从图中可以看出, 人工湿地系统对 COD_{Mn} 和 NH₄⁺ - N 的去除率在温度升高时也随之升高, 温度在低于 1 ℃ 时, COD_{Mn} 和 NH₄⁺ - N 的去除率都比较稳定, 但在高于 1 ℃ 时, COD_{Mn} 和 NH₄⁺ - N 去除率随温度升高而升高, 在温度达到 6 ℃ 时去除率比低于 1 ℃ 时提高约 20 个百分点。

2.4 保温效果及使用不同覆盖物进行隔离对系统处理性能的影响分析

在官厅水库库区冬季气温最低达到 -20 ℃ ~ -30 ℃, 12 月下旬至 2 月底气温基本处于 0 ℃ 以下。单就运行情况来看, 在本人工湿地中采用的两种对比实验方法, 即 5 cm 空气 + 10 cm 冰层保护 (3 号湿地) 和 5 cm 缝隙 + 15 cm 秸秆隔离保护 (1、2、4、5 号湿地), 都能保证人工湿地持续正常运行, 效果良好。但由于 1 号湿地属于表面流型, 进入冬季后不久即被冻结, 无法运行。说明表面流型人工湿地即使加以防冻措施在冬季仍然无法运行, 而潜流型人工湿地受气候的影响相对较小, 在隔离保温条件下冬季可以持续运行。

对比在本人工湿地中采用的两种方法, 由表 1 和图 6 可以看出, 在水力负荷相当的条件, 冬季各湿地单元的 COD_{Mn} 和 NH₄⁺ - N 总平均去除率中, 3 号单元无论 COD_{Mn} 还是 NH₄⁺ - N 的去除率都比 2、4、5 号单元低, 特别是 COD_{Mn} 去除率约为其他湿地单元的一半。

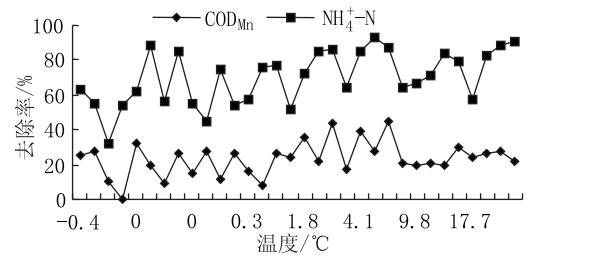


图 8 温度对 COD_{Mn} 和 NH₄⁺ - N 去除率的影响

Figure 8 Impact of temperature on the removal rates of COD_{Mn} and NH₄⁺ - N

官厅实验人工湿地进水各参数偏低, 就是在冬季严寒、湿地表面冰覆或者覆盖保温材料透气条件差的条件下, 人工湿地对微污染的地表水仍然具有较好的去除净化效果 (参见表 1 数据), 充分说明了该工艺在地表污水处理上的适应能力及其应用价值和潜力。

2.5 寒冷地区人工湿地应用面临的问题

2.5.1 植物的生长期及植物衰退

植物在人工湿地污水净化过程中的作用与其生长状况密切相关, 生长越旺盛, 根系越发达的植株, 其净化污水的能力、输氧和穿透的作用越大。但试验或工程应用的人工湿地中植物的生长也存在一些问题, 影响其作用的正常发挥。大多数湿地植物有一个春夏季萌芽、秋冬季枯死的生长周期, 在人工湿地这个半自然或人工的生境条件下, 植物生长亦存在着这种现象, 由此导致根区法污水处理系统冬季的污水净化效果下降^[2]。香蒲人工湿地和芦苇床系统也因冬季植株地面部分枯黄, 对污水中氨氮的去除率明显地低于其他季节^[3,4]。

在寒冷地区, 这种现象尤为突出, 由于冬季时间长, 植物生长期就相对缩短, 人工湿地在运行中处于高效率的时期同时缩短。一般来说, 寒冷地区的植物生长期大约在 4 月—10 月的半年中, 不同纬度而有所不同。但是植物生长期也因种类不同而不同, 一些植物抗冻能力强, 生长周期也长。因此在选择寒冷地区的湿地植物时应把这个因素考虑进去。

衰退 (Die - back) 是湿地植物的又一问题。除直

表 1 冬季人工湿地出入水主要特征及总去除率

Table 1 Main characters and total removal rates of effluent and influent in artificial wetland in winter

参数		2 号		3 号		4 号		5 号	
		COD _{Mn}	NH ₄ ⁺ - N	COD _{Mn}	NH ₄ ⁺ - N	COD _{Mn}	NH ₄ ⁺ - N	COD _{Mn}	NH ₄ ⁺ - N
进水浓度 /mg · L ⁻¹	Mean	5. 67	0. 168	5. 67	0. 168	5. 67	0. 168	5. 67	0. 168
	SD	1. 16	0. 051	1. 16	0. 051	1. 16	0. 051	1. 16	0. 051
出水浓度 /mg · L ⁻¹	Mean	4. 71	0. 085	5. 22	0. 096	4. 84	0. 090	4. 32	0. 085
	SD	1. 02	0. 053	1. 33	0. 048	1. 05	0. 074	0. 91	0. 038
最大去除率 /%		51. 2	93. 9	47. 9	93. 0	38. 3	88. 2	54. 8	94. 7
总去除率 /%		16. 9	49. 4	7. 9	42. 9	14. 6	46. 4	23. 8	49. 4

接损伤外,水质和基质的不同组成、水位的高低及富营养状态都能引起水生植物的衰退^[5~7]。Amstrong 等认为植物体腐烂、超负荷有机污染物冲击或富营养化等产生的植物毒素(如有机酸、硫化物等)在芦苇组织中的富集是引起芦苇衰退的主要原因之一^[8]。N、P 作为营养元素是水生植物生长发育、繁殖所必需的,但高浓度的 N、P 污水又影响到植物的正常生长。当污水中凯氏氮的浓度达到 $54.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (或氨氮 $24.7 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 时,人工湿地中的香蒲叶将枯黄或致死,且短期内难以恢复^[5,6]。这种 N、P 污水对植物生长的影响,被认为是植物大量地吸收并积累了 NH_4^+ 而引起的单盐毒害作用^[9]。这个问题一般湿地都存在,如果发生在寒冷地区,其影响就更大。因为毒素的毒害作用一旦引起植物衰退,要在有限的生长季节里恢复到正常水平是很难的。所以在植物生长期,使植物快速生长就显得重要,为此对于高浓度污水应当以小负荷运行。

2.5.2 冬季人工湿地氮的去除能力

在冬季,气温普遍在 0°C 以下,即使人工湿地采取了保温隔离措施,水温一般仍然很低,约在 $0^\circ\text{C} \sim 5^\circ\text{C}$ 间。氮去除率取决于人工湿地内的温度,有一些作者提出实质上的硝化作用在 4°C 时就停止了^[1]。然而,有数据显示:低负荷的潜流式人工湿地能在温度 $2.8^\circ\text{C} \sim 4.4^\circ\text{C}$ 使氨氧化^[1]。在加拿大的一个垂流式人工湿地,硝化反应能在 $2^\circ\text{C} \sim 5^\circ\text{C}$ 的温度内进行;一个由美国田纳西州山谷当局取得专利权的、可间歇交替使用的项目,经证实总氮的去除率已超过 85%^[1]。本实验研究也同样表明在水温低于 4°C 的条件下氨氮的去除率仍然可以达到约 50%。在滤床内有较大空气运动的湿地,氮的去除率会比较好。但一般冬季运行的人工湿地几乎是在封闭的系统内进行的,进水温度低,甚至接近 0°C ,作者建议,可以通过强制在床体通风来获得能量和足够的氧气,对此有待进一步实验研究。

3 结论

(1) 在水力负荷率为 $0.15 \sim 0.45 \text{ m} \cdot \text{d}^{-1}$ 的条件下,冬季潜流人工湿地对微污染的地表水源水有较好的处理效果。系统 COD 去除率与其他季节相比有所下降,各湿地单元处理总体平均去除率约为 15%; $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 去除率在整个冬季运行期间各个湿地均仍然保持在较高水平,但总体上 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 在冬季比其他季节的去除率水平还是有所下降,各单元总体平均去除率为 43% ~ 50%。

(2) 潜流型人工湿地系统对较小和短期温度变化具有较强抗冲击能力,但在寒冷地区对秋季进入冬季的极大气候温差变化阶段净化效果差,存在一个过渡期,约 1 个月。

(3) 潜流人工湿地系统中,随着水力负荷率的增加, COD_{Mn} 和 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的去除率均呈降低的趋势,水力负荷超过 $0.4 \text{ m} \cdot \text{d}^{-1}$ 时, COD_{Mn} 和 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 去除率明显降低。

(4) 为了提高氮的去除率,需有足够的氧。在寒冷地区冬季,标准的水平式潜流人工湿地中因没有植物输氧和通风,床体中的氧不能满足氧化碳和氧化氮的要求,可选择的、具有较高氧传送能力的反应结构是去除氮所必需的。如果将人工湿地设计成具有防冻功能,在温度低于 4°C 时也能进行硝化反应。

(5) 潜流人工湿地受气候影响相对较小,对系统采取一定的保温措施,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。

(6) 冬季人工湿地对微污染的地表水仍然具有较好的净化效果,充分说明该工艺在污水处理工程上的适应能力及应用价值和潜力。人工湿地在寒冷地区的应用虽然面临许多问题,但在湿地植物选择、水力负荷设计、保温设计等方面问题得以合理解决的基础上,在我国北方完全可以更大范围地推广利用。

参考文献:

- [1] S 华莱士, G 帕金, C 考思(美国). 寒冷地区污水处理的人工湿地设计与运行[J]. 国外科技, 2003, (6): 40 ~ 42.
- [2] Brix H. Treatment of wastewater in the rhizosphere of wetland plants - The root - zone method[J]. Wat Sci Techno, 1987, 19: 107 ~ 118.
- [3] 成水平, 况琪军, 夏 宜. 香蒲、灯心草人工湿地的研究: I. 净化污水的效果[J]. 湖泊科学, 1997, 9(4): 351 ~ 358.
- [4] 李科德, 胡正嘉. 人工模拟芦苇床系统处理污水的效能[J]. 华中农业大学学报, 1994, 13(5): 511 ~ 517.
- [5] 成水平, 夏 宜. 香蒲、灯心草人工湿地的研究: II. 净化污水的空间[J]. 湖泊科学, 1997, 10(1): 62 ~ 66.
- [6] Gersberg R M, Elkins B V, Lyon S R, et al. Role of aquatic plants in wastewater treatment by artificial wetlands[J]. Wat Res, 1986, 20(3): 363 ~ 368.
- [7] Ostendorp W. "Die back" of reeds in Europe A critical review of literature[J]. Aquatic Bot, 1989, 35: 5 ~ 26.
- [8] Armstrong J, Armstrong W, Wu Z, et al. A role for phytotoxins in the phragmites die back syndrome[J]. Folia Geobot Phytotax, 1996, 31: 127 ~ 142.
- [9] 崔光辉, 何之常, 张甲耀, 等. 模拟 N、P 污水对水稻幼苗过氧化物酶和氧化物歧化酶的影响[J]. 环境科学学报, 1995, 15(4): 447 ~ 453.