

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

项学敏, 杨洪涛, 周集体, 杨凤林, 王中华

(大连理工大学环境与生命学院, 工业生态与环境工程教育部重点实验室, 大连 116024)

摘要: 采用改进的三级串联垂直流人工湿地对大连2个典型城市污水处理厂的二级出水进行深度净化处理, 在大连户外自然条件下常年连续运行, 对该人工湿地在夏季、冬季和初春气候条件的运行效果进行对比, 重点考察了其对COD、TN、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和TP的去除效果。其中夏季(6~8月)COD、TN、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和TP平均去除率分别达到了88.5%、76%、100%和98%, 冬季(11月~次年1月)去除率分别达到了88%、85.3%、86.4%和97%; 初春(2~4月)去除率分别达到了87.7%、76.7%、70.3%和95.5%。夏季、冬季和初春出水水质为: COD为2.8、3.8和3.9 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$; TP为0.02、0.05和0.07 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$; TN为6.8、2.9和9.2 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$; $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 为0.01、0.3和8.1 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。结果表明, 该人工湿地对大连城市生活污水深度净化效果显著, 其中COD和TP去除效果稳定, 出水水质好于《地表水环境质量标准》(GB 3838-2002) III类质量标准; 而出水中TN和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 分别达到《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918-2002) 一级A和一级B标准。各污染物在夏季、冬季和初春的脱除负荷分别达到了COD为4.9、5.1和5.0 $\text{g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d})^{-1}$; TN为3.4、3.0和5.5 $\text{g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d})^{-1}$; $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 为0.2、0.6和3.7 $\text{g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d})^{-1}$; TP为0.15、0.30和0.28 $\text{g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d})^{-1}$ 。对比不同季节人工湿地对各种污染物的去除率及脱除负荷, 各污染物的去除受季节影响并不显著, 但是 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和TN的去除受进水污染负荷影响较大。

关键词: 人工湿地; 季节; 城市生活污水; 深度净化

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2009)03-0713-07

Performance of Constructed Wetland for Municipal Wastewater Tertiary Treatment: Winter and Summer Comparison

XIANG Xue-min, YANG Hong-tao, ZHOU Ji-ti, YANG Feng-lin, WANG Zhong-hua

(Key Laboratory of Industrial Ecology and Environmental Engineering, MOE, School of Environmental and Biological Science and Technology, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: An improved three-stage vertical flow constructed wetland (CW) was used for tertiary treatment of effluent from two typical Dalian municipal wastewater treatment plants. The experiments were carried out under ambient condition in Dalian for the whole year. Performances of the CW for COD, TN, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ and TP removal in summer (Jun.-Aug.), winter (Nov.-Jan. the second year) and spring (Feb.-Apr.) were compared. In summer, the removal rates of COD, TN, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ and TP reached 88.5%, 76%, 100% and 98%, respectively. While in winter they reached 88%, 85.3%, 86.4% and 97%, respectively. In spring, the removal rates reached 87.7%, 76.7%, 70.3% and 95.5%, respectively. The effluent water quality for summer, winter and spring were: COD 2.8, 3.8 and 3.9 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, respectively; TP 0.02, 0.05, and 0.07 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, respectively; TN 6.8, 2.9, and 9.2 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, respectively; $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 0.01, 0.3, and 8.1 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, respectively. Results showed good performance of CW for Dalian municipal wastewater tertiary treatment, especially for COD and TP removal. The effluent COD and TP meet the needs of Environmental Quality Standard for Surface Water (GB 3838-2002) III, whereas the effluent TN and $\text{NH}_4^+\text{-N}$ meet the needs of Discharge Standard of Pollutants for Municipal Wastewater Treatment Plant (GB 18918-2002) class I A and B, separately. The pollutant removal loads in summer, winter and spring were as flow: COD 4.9, 5.1, and 5.0 $\text{g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d})^{-1}$; TN 3.4, 3.0, and 5.5 $\text{g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d})^{-1}$; $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 0.2, 0.6, and 3.7 $\text{g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d})^{-1}$; TP 0.15, 0.30, and 0.28 $\text{g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d})^{-1}$. It is indicated that no significant influence of seasons on pollutant removal is found by comparing the removal rates as well as pollutant removal loads in different seasons, however, the removal of $\text{NH}_4^+\text{-N}$ and TN in CW is mainly influenced by influent pollutant loads.

Key words: constructed wetland; seasons; municipal wastewater; tertiary treatment

大连是一个水资源短缺的城市, 人均水资源仅为全国的 $1/4$ ^[1]. 尤其是在大连周边的岛屿, 居民生活和生产用水紧张, 迫切需要对现有的水资源进行合理利用并大力推广回用^[2]. 尹怀宁等^[3]提出的建立以地表水、地下水、海冰水、海水、中水综合利用

为内容的循环利用系统设想对水资源开发利用提供

收稿日期: 2008-03-24; 修订日期: 2008-05-22

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863)项目(2003AA601050)

作者简介: 项学敏(1968~), 女, 博士, 副教授, 主要研究方向为人工湿地污水处理机制研究及反应器开发, E-mail: hjjjs@dlut.edu.cn

了新的途径,但是运行成本高,相关高端技术尚未成熟,海冰水、海水淡化技术及应用没有得到广泛推广.开发具有投资少、运行费用低的中水回用技术成为解决问题的关键,将对缓解水资源紧张起到积极的促进作用.

人工湿地作为一种新兴的生态处理技术起源于德国^[4],应用到城市生活污水的脱氮除磷领域中具有:投资少、建设运营成本低;净化效果好、去除 N、P 能力强;工艺设备简单、组合多样化、易于维护;系统配置可塑性强、对负荷变化适应性强;生态环境效益显著、废水资源化程度高等特点^[5-8].对于解决缺水城市的水资源循环利用、中水回用等有重要意义.

目前,国内外对人工湿地污水处理技术的研究主要针对以下 3 方面:①人工湿地污水处理技术数据库的建立;②人工湿地在低温环境下的运行;③人工湿地对氮、磷的高效脱除.国际上对人工湿地污水处理工艺开展了广泛而深入的研究,针对寒冷地区人工湿地污水处理技术的应用在北欧及北美等地区受到广泛关注^[9].人工湿地生态污水处理技术更加适合中国等许多发展中国家的基本国情^[10],目前国内已有多所高校及科研单位对人工湿地污水处理技术开发和应用的各个领域进行研究,如对填料品种和性质的改良、对处理效果的研究、对处理机制的研究、对高效植物的研究、对工艺的优化研究等^[11-15].

虽然我国已经建造了许多人工湿地用于污、废水处理的工程实例,但是这些人工湿地大多位于南方,由于受季节和气候等的影响,所取得的经验和数据难以在北方直接应用.

本研究的主要目的是考察人工湿地在我国北方(大连)地区的应用可行性,重点考察其对城市生活污水中 COD、TN、NH₄⁺-N、TP 的深度处理去除效果,并着重探讨季节变化对处理效果的影响,以期为人造湿地在北方地区广泛应用提供参考依据.

1 材料与方 法

1.1 系统设计与流程

采用处理富营养化污水效果较好的垂直流型人工湿地^[16],并优化为三级串联结构.

人工湿地结构:人工湿地各级均为长 1 m、宽 0.7 m,底部为集水区(布水区),其上铺放钢网,防止填料下漏.人工湿地深度第 1 级为 1.5 m,第 2、3 级均为 1.2 m,大于一般的表面流人工湿地.这样在人工湿地下部形成厌氧区间,具有人工湿地前处理系统中的稳定塘或厌氧塘作用,节省了系统占地面积.

人工湿地填料:采用轻质陶粒滤料代替传统的土壤或者砂石作为基质.下层为大粒径陶粒,粒径为 7~8 mm,填装高度第 1 级为 80 cm,第 2、3 级均为 60 cm;上层为小粒径陶粒,粒径为 2.5~3.5 mm,填装高度第 1 级 40 cm,第 2、3 级 30 cm.用陶粒基质可以避免土壤系统表面的短流现象,同时多孔的陶粒大大增加了表面积,比砂石更有利于微生物代谢活动.

人工湿地植物:选取大连当地常见的芦苇作为人工湿地植物.2004 年 3 月选取已生新芽芦苇根部,均匀地植入人工湿地中进行培植,植株密度为 10 株/m²,8~10 棵/株.

1.2 运行与管理

1.2.1 芦苇的收割和生长情况

芦苇在 11 月收割,收割后芦苇的根部进入冬季休眠状态,进行微弱的呼吸作用和缓慢的新陈代谢.收割后芦苇宿根在 3 月中旬开始出芽,到 4 月中旬平均生长高度达到 60 cm.此时第 1 级人工湿地芦苇长势和植株密度最好,第 2、3 级则较差,随后第 2、3 级人工湿地植物长势逐渐转好.

1.2.2 人工湿地的运行与维护

实验采用连续进水的运行方式,运行时间为 2006 年 7 月~2007 年 4 月,其中,夏季为 2006 年 7~8 月,冬季为 2006 年 11 月~2007 年 1 月,初春为 2007 年 2~4 月.每个运行区段首先进行预运行并稳定 1~2 个月,之后进行采样分析,并作为有效数据.全程采样频率为:预运行阶段每 3 d 进行 1 次,稳定运行阶段则每 2 d 进行 1 次.对于进出水的水质分析数据采用取平均值及标准偏差等方法进行统计.

进水流量为 380 L/d,水力负荷为 180 mm/d,水力停留时间为 7.2 d.污水经泵打入第 1 级人工湿地底部的布水区进入人工湿地,后经自流进入第 2、3 级人工湿地.

实验期间各运行区段的平均气温:冬季为 -0.1℃,初春为 9.3℃,夏季为 23.5℃.

寒冷气候条件下人工湿地的运行与管理一直是人工湿地在我国北方地区广泛应用的主要制约因素之一^[9,17-19].

整个实验期间,夏季人工湿地运行顺利,但是由于人工湿地全部安装在户外地面上,冬季运行困难较大.

冬季运行遇到的问题如下:①储罐及人工湿地容易冻结、堵塞;②输水管路和出水口处结冰,排水不畅;③植物收割后人工湿地上部裸露,保温性能

差, 局部结冰, 阻碍水流流动。

冬季运行问题的解决方法: ①冬季运行期间在人工湿地及储罐四周包裹岩棉, 模拟地下运行环境, 增强保温系数; ②输水管外包一层保温泡沫, 输水管与保温泡沫之间夹电热丝微热进水, 模拟污水厂出

水水温(出水水温 $> 5^{\circ}\text{C}$, 人工湿地水温 $> 10^{\circ}\text{C}$), 出水管增加保温措施, 防止出水结冰堵塞出口; ③在人工湿地上部铺设地膜, 模拟冬季人工湿地上覆盖冰雪或枯草等物质, 保持系统内部温度, 维持微生物活性。

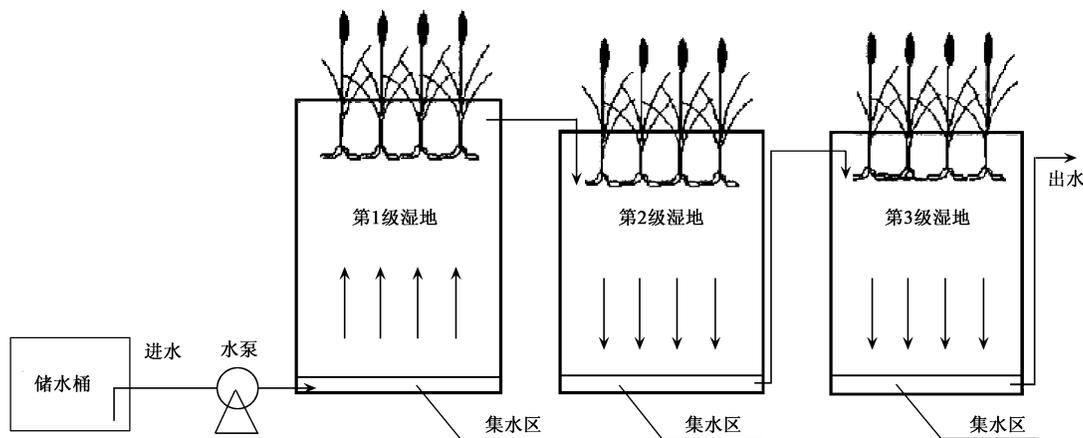


图1 人工湿地工作流程

Fig. 1 Flow of the constructed wetland

1.3 进水水质

为了更全面考察该人工湿地反应器对城市生活污水的深度处理效果, 特采用大连市2个典型城市污水处理厂(大连市春柳河污水处理厂和马栏河污水处理厂)二级生化处理单元出水为实验用原水。由于2个污水处理厂的设计标准不同, 出水水质有差别。大连市马栏河污水处理厂的设计出水水质为《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918-2002)一级A标准(具备脱氮除磷工艺), 而春柳河污水处理厂设计出水水质为上述标准的二级标准(不具备脱氮除磷工艺)。夏季与冬季所用原水为马栏河污水处理厂二级生化出水(进水水质1), 初春所用污水为春柳河污水处理厂二级生化出水(进水水质2)。实验进水水质如表1所示。

表1 人工湿地进水水质/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$

Table 1 Influent quality of the constructed wetland/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$

进水水质指标	进水水质1		进水水质2	
	浓度范围	平均浓度	浓度范围	平均浓度
COD	20~50	32.6 ± 10.1	20~45	31 ± 8.1
TN	10~30	21 ± 5.8	30~50	39 ± 4.8
TP	1.2~2.5	1.7 ± 0.22	1.2~2.0	1.6 ± 0.12
NH_4^+-N	0.5~7	3.6 ± 2.0	20~35	31 ± 5.5

1.4 分析方法

主要监测以下4种水质指标: COD(重铬酸钾法) TP(总磷, 过硫酸钾消解钼锑抗分光光度法)。

TN(总氮, 碱性过硫酸钾氧化-紫外分光光度法)、 NH_4^+-N (氨氮, 纳氏试剂法)。水质监测均参照文献[20]的方法。

2 结果与讨论

2.1 人工湿地系统对污水中有机物(COD)的脱除效果

COD主要通过人工湿地的截流、过滤以及微生物的新陈代谢过程得到去除, 在以往的研究中, 人工湿地对COD的脱除普遍较高^[21, 22]。本研究结果为: 夏季、冬季和初春COD平均去除率分别达到了88.5%、88%和87.7%; 脱除负荷分别为4.9、5.1和5.0 $\text{g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d})^{-1}$; 出水COD分别为2.8、3.8和3.9 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。各个阶段COD的平均去除率稳定在88%左右, 脱除负荷在5 $\text{g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d})^{-1}$ 左右, 其中第1级人工湿地对COD的脱除贡献最大, 去除率接近50%, 第2、3级人工湿地单元的去除率均接近20%。比较不同季节的去除率、脱除负荷和出水水质可见, 季节对COD去除影响不大, 只是夏季由于受雨水的影响, 出水水质波动较冬季大^[23]。

如图2所示, 稳定运行后, 人工湿地出水COD浓度保持在4 mg/L 以下, 好于《地表水环境质量标准》(GB 3838-2002) I类水质标准的15 mg/L 和《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918-2002)一级A类水质标准的60 mg/L 。

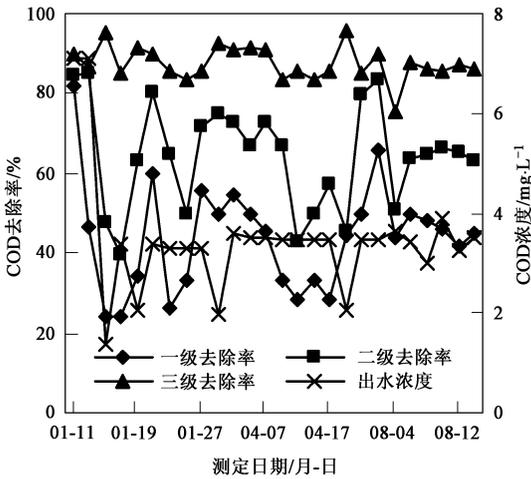


图 2 COD 去除率及出水浓度

Fig. 2 Removal rates and effluent concentration of COD

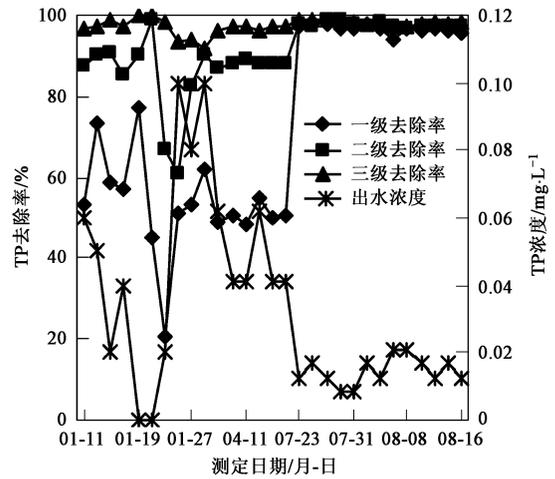


图 3 TP 的去除率及出水浓度

Fig. 3 Removal rates and effluent concentration of TP

2.2 人工湿地系统对污水中总磷(TP)的脱除效果

人工湿地对 TP 的去除主要通过微生物的积累、填料床的化学沉淀反应和植物的吸收等几方面的共同协调作用,其中介质之间的非生物作用^[24]是主要作用。

不同季节 TP 的去除结果见图 3. 比较第 1 级人工湿地在不同季节对 TP 的脱除效果可以看出,冬季和初春第 1 级人工湿地对 TP 脱除率有大幅度下降,夏季第 1 级人工湿地对 TP 去除率达到了 96%,而在冬季却只有 40%~60%,去除率几乎下降了一半.但其脱除负荷在夏季和冬季分别为 0.148 g·(m²·d)⁻¹和 0.180 g·(m²·d)⁻¹,冬季较夏季高 18%,主要原因是冬季进水 TP 浓度高,同时也说明季节对 TP 的去除影响并不显著。

考察 3 级人工湿地对 TP 总的脱除效果,夏季、冬季和初春去除率分别达到了 98%、97% 和 95.5%;出水水质分别为: 0.02、0.05 和 0.07 mg·L⁻¹;脱除负荷分别为: 0.15、0.30 和 0.28 g·(m²·d)⁻¹.可见,经过多级处理后,由于高进水负荷带来的去除率和出水水质差别逐渐缩小,最终基本一致.冬季脱除负荷依旧高于夏季近 1 倍。

夏季,人工湿地出水中 TP 的浓度好于《地表水环境质量标准》(GB 3838-2002) I 类标准的 0.02 mg/L;冬季和初春人工湿地出水中 TP 平均浓度好于《地表水环境质量标准》(GB 3838-2002)的 III 类标准的 0.2 mg/L.相对单级人工湿地,这种多级串联的组合型人工湿地在冬季 TP 的去除中具有较强的抗冲击能力和适应温度变化的能力,有利于北方冬季污水去除效果的稳定及水体富营养化的控制。

2.3 人工湿地对污水中总氮(TN)的脱除效果

人工湿地系统对 TN 的去除依次需经氨化作用、硝化作用及反硝化作用,使污水中各种价态的氮转变为气态氮(N₂),从而达到脱氮的目的^[25].其中氨化和硝化作用为反硝化作用创造条件,反硝化作用才彻底将氮从污水中去除。

夏季、冬季和初春 TN 平均去除率分别达到了 76%、85.3% 和 76.7%;出水水质分别为: 6.8、2.9 和 9.2 mg·L⁻¹;平均脱除负荷分别为: 3.4、3.0 和 5.5 g·(m²·d)⁻¹.就去除率而言,冬季比夏季和初春高 10% 左右,而冬季的脱除负荷却稍有下降,原因是冬季进水负荷低.初春季节 TN 脱除负荷明显高于其他 2 个季节,是由于温度和进水负荷同时增加,人工湿地对 TN 的脱除效果同时改善所致。

比较冬季、初春和夏季的出水浓度可以看出(图 4),冬季出水水质最好,初春和夏季次之,说明潜流人工湿地总氮的出水浓度与进水负荷有明显的正相关性^[26].全年出水 TN 浓度均好于《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918-2002)一级 A 类标准的 15 mg/L,但尚未达到《地表水环境质量标准》(GB 3838-2002)。

虽然从 TN 的脱除负荷、去除率、出水水质等方面均看出冬季运行效果较好,但不能断言低温时该系统对 TN 的脱除有利.除了环境温度外,植物吸收、雨水淋溶、植物腐败再释放等因素对系统中 TN 的脱除影响也较大.一般而言,植物吸收氮的量非常有限,不到去除量的 20%,其吸收作用主要在生长期旺盛期(春季-初夏),盛夏以后植物吸收作用并不明显^[27].本研究中夏季人工湿地进、出水 TN 浓

度出现较大幅度波动,这是由于夏季雨水多,同时人工湿地上层枯萎的植物开始加速腐烂分解,释放一定量含氮化合物进入水体,特别是本研究所用植物芦苇在浸泡后 N 类物质的释放量较大,从而导致夏季处理效果较差^[28].而冬季对人工湿地的保温措施比较有效,受雨雪及植物分解的影响较小,使冬季人工湿地的运行比较稳定,基本上没有出现出水 TN 浓度大幅度变化的情况.

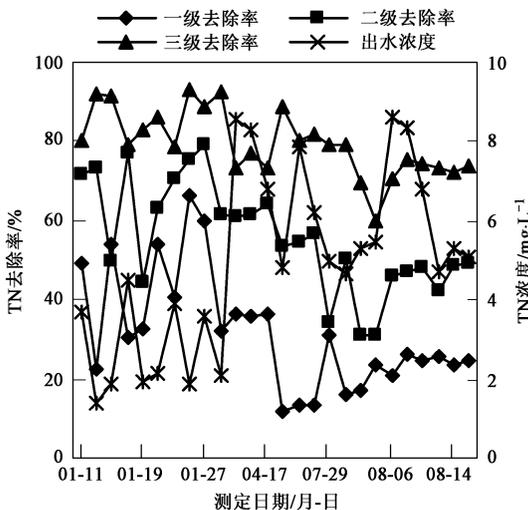


图 4 TN 的去除率及出水浓度

Fig.4 Removal rates and effluent concentration of TN

2.4 人工湿地对污水中氨氮(NH₄⁺-N)的脱除效果

人工湿地对污水中 NH₄⁺-N 的去除效果由氨化作用和硝化作用共同决定,其影响因素较复杂,是人工湿地研究领域中的热点^[29-32].夏季、冬季和初春 NH₄⁺-N 均去除率分别达到了 100%、86.4% 和 70.3%;出水水质分别为: 0.01、0.3 和 8.1 mg·L⁻¹ (图 5);脱除负荷分别达到了 0.2、0.6 和 3.7 g·(m²·d)⁻¹.全年 NH₄⁺-N 进水负荷变化较大,夏季原水 NH₄⁺-N 浓度最低,人工湿地对 NH₄⁺-N 的去除率也最高,冬季人工湿地 NH₄⁺-N 进水负荷略高于夏季,去除率下降了 12.5%,而脱除负荷是夏季的 3 倍,初春人工湿地 NH₄⁺-N 进水负荷是冬季时期的 5 倍左右,去除率较冬季时期下降了 16%,而脱除负荷是冬季时期的 7 倍.从以上分析可以看出,影响该系统对 NH₄⁺-N 脱除效果的主要因素是进水负荷,而受季节的影响并不大.NH₄⁺-N 进水负荷较低时人工湿地出水中 NH₄⁺-N 浓度好于《地表水环境质量标准》(GB 3838-2002) 第 IV 类标准的 1.5 mg/L;进水 NH₄⁺-N 浓度较高时,人工湿地出水中 NH₄⁺-N 浓度

接近《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918-2002) 一级 B 类标准.人工湿地作为水资源循环利用和防止水体富营养化的深度净化污水处理技术,尚不能完全代替生化脱氮工艺,高浓度负荷下人工湿地的脱氮技术有待进一步研究.

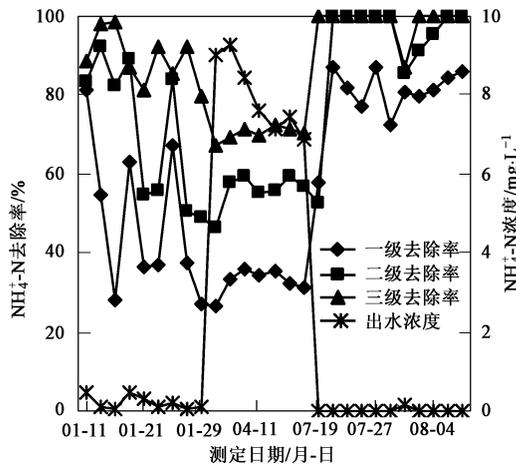


图 5 NH₄⁺-N 的去除率及出水浓度

Fig.5 Removal rates and effluent concentration of NH₄⁺-N

2.5 与国内外相关研究的比较

国内外关于人工湿地对生活污水中有机物、氮和磷的处理效果的研究较多,普遍的研究结果表明,各种类型人工湿地对污水中 COD 和 TP 都具有较好的处理效果,去除率达到 80%~100%^[11,17,33];而对于 N 的脱除则受到湿地规模、水力负荷、停留时间和环境温度等因素影响,处理效果差别较大^[34,35].一些中试规模的人工湿地去除率可达 90%,大部分湿地的去除率波动范围在 20%~70% 之间^[4],低于本试验中的脱氮效果.在全年气温较高地区,湿地水力负荷大、污染负荷大,面积、停留时间和湿地深度相对本实验湿地系统小的情况下,对各污染物的脱除率仍然达到了较高水平.例如,丁晔等^[36]利用水力负荷为 75 mm/d, HRT 为 4 d,面积 0.25 m²,深 0.7 m 的黑麦草垂直流人工湿地系统处理杭州地区经酸化水解的养猪场废水,各污染物的平均去除率分别达到 COD 80%, NH₄⁺-N 50%, TN 20%~40%, TP 由 80% 逐渐下降到 20%. Sohsalam 等^[37]利用面积为 1 m²,深 0.6 m 的自由表面流人工湿地处理热带地区(泰国)海产品加工废水,在停留时间为 5 d 时各污染物的去除率分别达到 BOD₅ 91%~99%, TN 72%~92%, TP 72%~77%.

近年来对寒冷气候条件系人工湿地的运行效果研究逐渐增多^[38-41].刘学燕等^[41]利用总面积为 200

m^2 的人工湿地处理河北省官厅水库微污染水, 在水力负荷率为 0.15~0.45 m^3/d 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, 但其去除率和脱除负荷均低于本实验结果. 周健等^[40] 采用序批式人工湿地处理校园生活污水, 在冬季低温条件下, 取得了 COD、 NH_4^+-N 和 TN 分别为 81.12%、85.56% 和 48.44% 的脱除效果, 其脱除负荷明显高于本实验研究, 与当地温度(高于本实验环境)和运行方式有关. 序批式反应器在污染物浓度较高时, 可充分发挥其硝化-反硝化及反应器内自动再充氧优势.

冬季人工湿地对生活污水的处理效果, 取决于 2 个方面, 第一, 人工湿地能否在冰点以下正常运行; 第二, 在低温环境条件下人工湿地中各组分对污染物的去处效果. 本实验中主要采取一定措施保证冬季管路和主体设施畅通, 设备正常运行, 同时使水温保持在 5~10 $^{\circ}\text{C}$, 有利于维持微生物对有机物正常的脱除效果.

3 结论

(1) 多级串联垂直流人工湿地在大连地区城市生活污水深度净化中效果显著, 其中 COD、TP 去除效果稳定, 出水浓度好于《地表水环境质量标准》(GB 3838-2002) III 类质量标准.

(2) 人工湿地对 NH_4^+-N , TN 的去除受冬季低温影响并不显著, 受进水污染负荷影响较大. 作为城市污水脱氮除磷处理后的深度处理单元, 其出水浓度基本达到《地表水环境质量标准》(GB 3838-2002) III 类质量标准. 但若作为唯一城市生活污水脱氮除磷单元, NH_4^+-N 的处理效果只能达到《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918-2002) 一级 B 类标准, 可选择增加预处理和后处理单元, 增加人工湿地串联级数提高脱氮效率.

(3) 适当的冬季保温措施对人工湿地的稳定运行及各类污染物的高效去除是必要的. 采取表面覆盖、加深主体处理单元的深度、对裸露地面的输水管网进行保温等措施, 能够收到良好效果.

(4) 多级式人工湿地对北方冬、夏季污水处理厂排放的低浓度生活污水有较好的深度净化效果, 能够有效地预防地表水体富营养化的发生, 有利于城市水环境质量的改善和水资源的循环利用, 从而有效缓解各大缺水城市的水资源匮乏问题.

参考文献:

[1] 盖美, 田成诗. 大连市水资源现状及成因分析[J]. 辽宁师范

大学学报: 自然科学版, 2006, 29(3): 359-362.

- [2] 朱显成, 刘则渊. 基于 IPAT 方程的大连水资源效率研究[J]. 大连理工大学学报: 社会科学版, 2006, 27(3): 39-42.
- [3] 尹怀宁, 刘婧. 长兴岛临港工业区建设水资源综合利用循环系统的设想[J]. 国土与自然资源研究, 2007, 4(1): 66-67.
- [4] International Water Association. Constructed Wetlands for Pollution Control, Processes, Design, and Operation [M]. IWA publishing, London, UK, 2000.
- [5] 胡康萍, 许振成, 朱彤, 等. 人工湿地污水处理系统初步研究[J]. 上海环境科技, 1991, 10(9): 44-46.
- [6] 贺锋, 吴振斌, 陶菁, 等. 复合垂直流人工湿地污水处理系统硝化与反硝化作用[J]. 环境科学, 2005, 26(1): 47-50.
- [7] Haber R. Constructed wetlands: A chance to solve wastewater problems in developing countries [J]. Water Science and Technology, 1999, 40(3): 11-17.
- [8] 项学敏, 唐皓. 人工湿地在我国城市生态建设中的应用[J]. 环境科学与技术, 2005, 28(6): 91-92.
- [9] Werker A G, Dougherty J M, McHenry J L, et al. Treatment variability for wetland wastewater treatment design in cold climates [J]. Ecological Engineering, 2002, 19(1): 1-11.
- [10] Kivaisi Amelia. The potential for constructed wetlands for wastewater treatment and reuse in developing countries: a review [J]. Ecological Engineering, 2001, 16: 545-560.
- [11] 袁东海, 景丽洁, 高士祥, 等. 几种人工湿地基质净化磷素污染性能的分析[J]. 环境科学, 2005, 26(1): 51-55.
- [12] 刘春常, 夏汉平, 简曙光, 等. 人工湿地处理生活污水研究——以深圳石岩河人工湿地为例[J]. 生态环境, 2005, 14(4): 536-539.
- [13] Rousseau D P L, Lesage E, Story A, et al. Constructed wetlands for water reclamation [J]. Desalination, 2008, 218: 181-189.
- [14] Thullen J S, Sartoris J J, Nelson S M, et al. Managing vegetation in surface-flow wastewater-treatment wetlands for optimal treatment performance [J]. Ecological Engineering, 2005, 25: 583-593.
- [15] Wlman A, Kroni's V. Effect of pond shape and vegetation heterogeneity on flow and treatment performance of constructed wetlands [J]. Journal of Hydrology, 2005, 301: 123-138.
- [16] 聂志丹, 年跃刚, 金相灿, 等. 3 种类型人工湿地处理富营养化水体中试比较研究 [J]. 环境科学, 2007, 28(8): 1675-1680.
- [17] 宋晨, 项学敏, 周集体, 等. 人工湿地对北方城市污水深度处理效果的研究[J]. 环境污染与防治, 2007, 29(6): 433-436.
- [18] Cookson W R, Comforth I S, Rowarth J S, et al. Winter soil temperature (2-15 $^{\circ}\text{C}$) 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.
- [19] Reddy K R, Patrick W H, Lindau C W, et al. Nitrogen transformations and loss in flooded soils and sediments [J]. CRC Crit Rev Environ Control, 1984, 13: 273-309.
- [20] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法 [M]. (第四版). 北京: 中国环境科学出版社, 2002. 244-246.
- [21] 司马卫平, 何强, 夏安林, 等. 人工湿地处理城市污水效能的

- 影响因素分析[J]. 环境工程学报, 2008, 2(3): 319-323.
- [22] 王全金, 陈栋. 芦苇人工湿地处理技术研究进展[J]. 华东交通大学学报, 2004, 21(4): 1-5.
- [23] 吴晓磊. 人工湿地废水处理机理[J]. 环境科学, 1995, 16(3): 83-86.
- [24] 刘佳, 孙浩诚, 李亚峰, 等. 垂直流人工湿地在北方地区的应用[J]. 工业用水与废水, 2006, 37(4): 20-22.
- [25] 付融冰, 杨海真, 顾国维, 等. 潜流人工湿地对农村生活污水氮去除的研究[J]. 水处理技术, 2006, 32(1): 18-22.
- [26] 张荣社, 李广贺, 周琪, 等. 潜流人工湿地负荷变化对脱氮效果的影响研究[J]. 环境科学, 2006, 27(2): 253-256.
- [27] Stott M U, Wiener A, Kusch P, *et al.* Effects of plants and microorganisms in constructed wetlands for wastewater treatment [J]. *Biotechnology Advances*, 2003, 22: 93-117.
- [28] 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.
- [29] 黄娟, 王世和, 鄢璐, 等. 潜流型人工湿地硝化和反硝化作用强度研究[J]. 环境科学, 2007, 28(9): 1965-1969.
- [30] 张军, 周琪, 何蓉. 表面流人工湿地中氮磷的去除机理[J]. 生态环境, 2004, 13(1): 98-101.
- [31] Dierberg F E, DeBusk T A, Jackson S D, *et al.* Submerged aquatic vegetation-based treatment wetlands for removing phosphorus from agricultural run off: response to hydraulic and nutrient loading[J]. *Water Research*, 2002, 36(6): 1409-1422.
- [32] Bai X H, Wang B Z, Yu M, *et al.* Development of constructed wetland and wastewater treatment technology and its application in China [J]. *Journal of Harbin University of Civil Engineering and Architecture*, 1999, 32(6): 88-92.
- [33] 冯明雷, 张志勇, 杨林章, 等. 低负荷人工湿地对城市生活污水处理效果的研究[J]. 扬州大学学报: 农业与生命科学版, 2007, 28(3): 72-76.
- [34] Sawattayothin V, Polprasert C. Nitrogen mass balance and microbial analysis of constructed wetlands treating municipal landfill leachate [J]. *Bioresource Technology*, 2007, 98(3): 565-570.
- [35] Jeremy F, Dorin B, Kelly A R, *et al.* Nitrogen removal from domestic wastewater using the marshland upwelling system [J]. *Ecological Engineering*, 2006, 27(1): 22-36.
- [36] 丁晔, 韩志英, 吴坚阳, 等. 不同基质垂直流人工湿地对猪场污水季节性处理效果的研究[J]. 环境科学学报, 2006, 26(7): 1093-1100.
- [37] Sohsalam P, Englande A J, Sirianuntapiboon S. Seafood wastewater treatment in constructed wetland: Tropical case [J]. *Bioresource Technology*, 2008, 99: 1218-1224.
- [38] 海热提, 范立维, 谢涛, 等. 两级潜流人工湿地在中国东北高寒地区的应用研究[J]. 环境科学, 2007, 28(11): 2442-2447.
- [39] 张海, 张旭, 钟毅, 等. 潜流人工湿地去除大庆地区湖泊水体中石油类化合物的研究[J]. 环境科学, 2007, 28(7): 1449-1454.
- [40] 周健, 王继欣, 张勤, 等. 序批式人工湿地冬季低温脱氮的效能研究[J]. 环境科学学报, 2007, 27(10): 1652-1656.
- [41] 刘学燕, 代明利, 刘培斌, 等. 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.