

生物接触氧化法 - 人工湿地处理常低温生活污水

赵智超¹, 张为堂², 崔鹏³, 黄剑明¹, 史文燕¹, 陈永志¹

(1. 兰州交通大学 环境与市政工程学院, 甘肃 兰州 730070; 2. 北控水务(中国)投资有限公司, 北京 100124; 3. 成都市建筑设计研究院, 四川 成都 610015)

摘要: 采用生物接触氧化法(BCO) - 人工湿地组合工艺处理常低温生活污水, 当 BCO 的气水比为 7: 1、回流比为 100%、人工湿地的水力停留时间(HRT)为 9 h, 人工湿地的水力负荷(HLR)为 $3.65 \text{ m}^3/(\text{m}^2/\text{d})$ 时, 在常温下(22 ~ 27℃), 组合工艺出水 COD、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、TN 和 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 分别为 14.60、1.40、12.70 和 0.43 mg/L, 出水满足《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918 - 2002)一级 A 标准; 而低温下(7 ~ 12℃), 组合工艺出水 COD、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、TN 和 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 分别为 29.60、9.90、19.90 和 0.88 mg/L。保持气水比和回流比不变, 控制低温下 BCO 的 HRT 为 12 h, 人工湿地的 HLR 为 $2.74 \text{ m}^3/(\text{m}^2/\text{d})$ 时, 组合工艺出水 COD、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、TN 和 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 为 18.40、6.17、14.17 和 0.66 mg/L, 去除率分别为 90.60%、87.80%、75.40% 和 85.30%。结果表明: 常、低温下该组合工艺均能够实现污染物的良好去除, 为实际工程应用提供参考。

关键词: 生物接触氧化法(BCO) - 人工湿地; 常低温生活污水; 水力停留时间; 水力负荷; 污水处理
中图分类号: X703 文献标识码: A 文章编号: 1672-643X(2018)05-0028-07

BCO - constructed wetland treatment of domestic sewage under normal and low temperatures

ZHAO Zhichao¹, ZHANG Weitang², CUI Peng³, HUANG Jianming¹, SHI Wenyan¹, CHEN Yongzhi¹

(1. School of Environmental and Municipal Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China; 2. Beijing Enterprises Water Group(China) Investment Limited, Beijing 100124, China; 3. Chengdu Architectural Design & Research Institute, Chengdu 610015, China)

Abstract: The combined process of BCO - constructed wetland was applied to treat domestic sewage under normal and low temperatures. When the ratio of air to water was 7: 1, the ratio of reflux was 100%, the hydraulic retention time(HRT) was 9h and the hydraulic load rate(HLR) of constructed wetland was $3.65 \text{ m}^3/(\text{m}^2/\text{d})$, the combined process effluent concentrations of COD、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、TN and $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ were 14.60, 1.40, 12.70 and 0.43mg/L respectively at normal temperature (22 - 27℃), which could meet the first class A standards of "Discharge standard of pollutants for municipal wastewater treatment plant" (GB 18918 - 2002) of China. At low temperature (7 - 12℃), the combined process effluent concentrations of COD、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、TN and $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ were 29.60, 9.90, 19.90 and 0.88mg/L respectively. When the ratio of air to water and reflux remained unchanged, the HRT of BCO at 12 h and the HLR of constructed wetland of $2.74 \text{ m}^3/(\text{m}^2/\text{d})$, the combined process effluent concentrations of COD、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、TN and $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ were 18.40, 6.17, 14.17 and 0.66mg/L, the corresponding removal rates were 90.60%, 87.80%, 75.40% and 85.30%. The results showed that the combined process could achieve a good removal of pollutants under normal and low temperatures, which provided a theoretical basis for practical engineering applications.

Key words: biological contact oxidation(BCO)-constructed wetland; domestic sewage under normal and low temperatures; hydraulic retention time(HRT); hydraulic loading rate(HLR); waste water treatment

收稿日期: 2018-02-05; 修回日期: 2018-04-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(51668033); 环境工程甘肃省高等学校特色专业项目(101004); 兰州交通大学教改重点项目

作者简介: 赵智超(1995-), 男, 四川绵阳人, 硕士研究生, 主要研究污水脱氮除磷。

通讯作者: 陈永志(1969-), 男, 河南开封人, 博士, 教授, 主要从事水污染控制工程理论及技术。

1 研究背景

生物接触氧化法 (Biological contact oxidation, BCO) 具有生物量大、污泥产量少、抗冲击负荷能力强、无污泥膨胀之虞等优点^[1]。但是,由于其处理方式单一,传统生物接触氧化对氮和磷不能够很好地去除^[2]。

人工湿地利用系统中基质-水生植物-微生物的物理、化学、生物三重协同作用实现对污水的高效净化^[3],是一种生态环保的污水处理技术。与传统污水处理技术相比,人工湿地具有出水水质稳定、投资少、耗能低、操作简单、运行费用低等优点^[4-6],但也存在易堵塞、占地面积大、易受气候和运行方式影响等不足^[7]。

BCO-人工湿地组合工艺具有生态效应突出、脱氮除磷效果好、运行稳定、成本较低等优点^[8-10]。微生物生长的适宜温度在 10~35℃ 之间,一旦温度低于 10℃,处理效果会受到明显影响^[11-13],我国北方地区冬季生活污水温度时常低于 10℃^[13],因此提高该组合工艺在低温条件下的处理效能是当前的一个研究热点^[14-15],本研究重点考察了在常、低温条件下 BCO-人工湿地组合工艺处理实际生活污水的运行效果及水力停留时间对 BCO 及水力负荷对人工湿地处理效果的影响,以期为该组合工艺在

我国北方地区的实际应用提供参考。

2 材料与方法

2.1 试验装置

“BCO-人工湿地”组合工艺流程见图 1。生活污水首先进入初次沉淀池,去除污水中大颗粒悬浮物,并去除部分有机物,后重力自流入一级调节池,调节水量,然后经泵提升进入生物接触氧化反应器,去除大部分 COD、氮和磷,出水进入二级调节池,用泵提升到人工湿地,进一步去除有机物、脱氮、除磷。

图 2(a)为 BCO 实体图。反应器采用有机玻璃制成,尺寸为 2100×600×1 000 mm,总有效容积 0.68 m³,其中缺氧区 0.20 m³,好氧一区 0.24 m³,好氧二区 0.23 m³。组合式填料见图 2(b),其比表面积 1 000~2 500 m²/m³。曝气装置为广东省日生集团生产的电磁式空压机,型号为 ACO-018,最大曝气量为 250 L/min,曝气方式为微孔曝气。

人工湿地实体图见图 3(a)。湿地植物选择芦苇进行种植,种植密度为 16 株/m²。湿地底部有 1.50% 的坡度。图 3(b)为人工湿地结构示意图。湿地规格为 1 000 mm×500 mm×900 mm,总有效容积 0.30 m³,滤料高度为 0.60 m,滤料分别为粗砂填充 60.00%,中砂填充 30.00%,细砂填充 10.00%,填充顺序从上到下依次为粗砂、中砂、细砂。

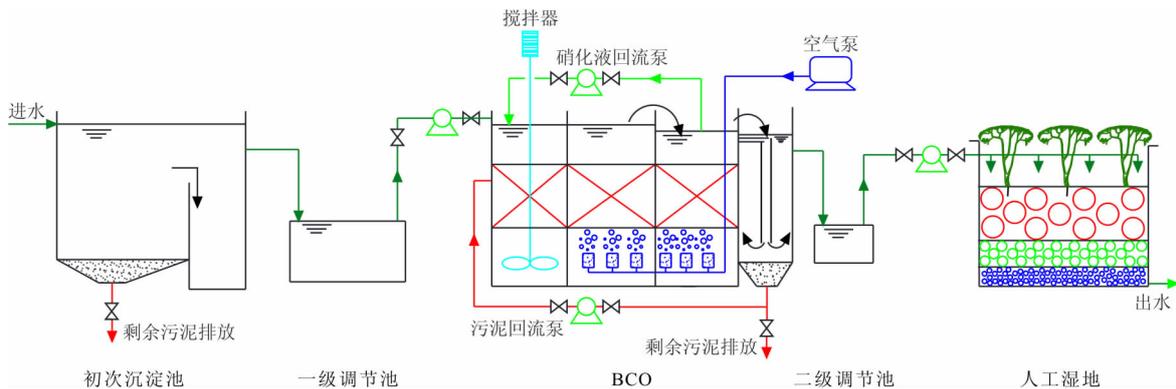
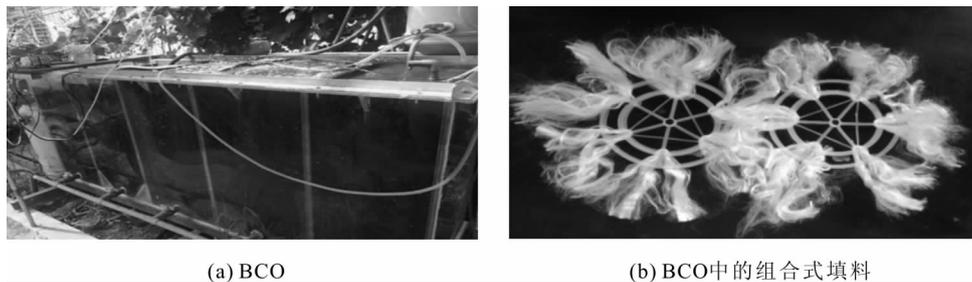


图 1 BCO-人工湿地系统流程



(a) BCO

(b) BCO中的组合式填料

图 2 BCO 及填料实物图

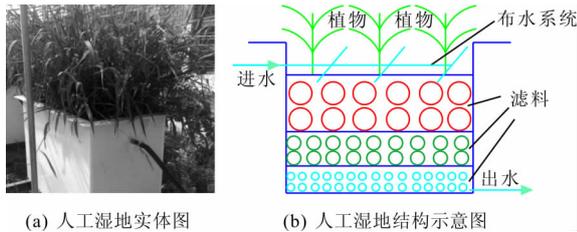


图3 人工湿地实体及结构示意图

2.2 原水水质与接种污泥

本试验原水来自兰州交通大学校园生活区的生活污水,具体水质见表1。

表1 试验原水水质 $^{\circ}\text{C}, \text{mg/L}$

温度	COD	$\text{NH}_4^+ - \text{N}$	TN	$\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$
22~27(均值)	244.00	58.90	70.10	5.20
7~12(均值)	269.70	55.20	66.10	4.80

接种污泥取自兰州市某污水处理厂曝气池, $\text{MLSS} = 3\ 000 \text{ mg/L}$, $\text{SV}_{30} = 30\%$,污泥具有良好的脱氮除磷功能。

2.3 试验方法

(1)BCO的HRT为9h,回流比为100%,气水比7:1。垂直流人工湿地的水力负荷为 $3.65 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$,采用连续进水方式,研究在常温(22~27 $^{\circ}\text{C}$)和低温(7~12 $^{\circ}\text{C}$)条件下组合工艺对实际生活污水的处理效果。

(2)保持BCO的回流比和气水比分别为100%和7:1,在常、低温下控制BCO的HRT分别为6、9、12h,人工湿地的水力负荷分别为 5.48 、 3.65 、 $2.74 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 时,考察组合工艺的污染物去除效能。

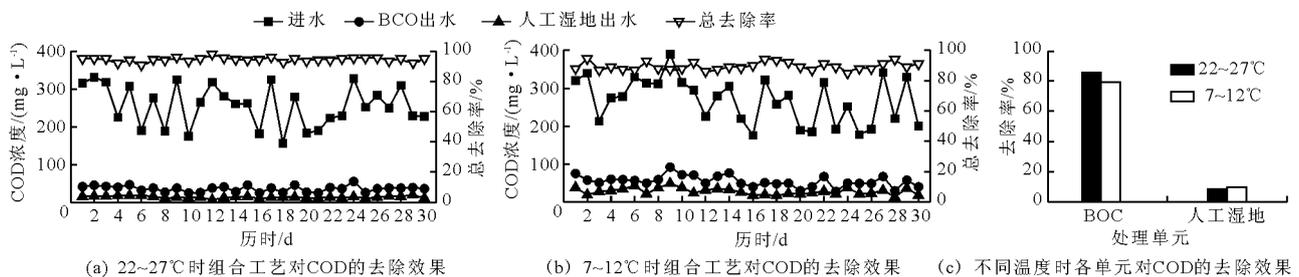


图4 COD 的去除效果及各单元的去除率

3.2 对 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的去除特性

常温(22~27 $^{\circ}\text{C}$)下组合工艺对 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的去除效果见图5(a)。在进水平均 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度为 58.90 mg/L 的条件下,BCO出水平均 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度为 7.60 mg/L ,人工湿地出水平均 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度为 1.40 mg/L ,出水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度受进水波动影响

2.4 水质分析方法

COD、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、TN 和 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 等常规指标的分析根据国家标准方法测量^[16]。温度采用 WTW multi3420 便携式水质分析仪测定。

3 结果与讨论

3.1 对 COD 的去除特性

在常温(22~27 $^{\circ}\text{C}$)时组合工艺对 COD 浓度的去除效果见图4(a)。当平均进水 COD 浓度为 244.00 mg/L 时,BCO 出水平均 COD 浓度为 35.40 mg/L ,人工湿地出水稳定,平均值为 14.60 mg/L 。组合工艺对 COD 有着良好的去除效果,平均去除率为 94.10% 。出水满足《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 8918-2002)中的一级 A 标准。

在低温(7~12 $^{\circ}\text{C}$)时组合工艺对 COD 的去除效果见图4(b)。平均进水 COD 浓度为 269.70 mg/L ,相比常温下未见明显升高,BCO 平均出水 COD 浓度为 57.20 mg/L ,在低温低 COD 进水条件下,人工湿地平均出水 COD 浓度为 29.60 mg/L ,组合工艺对 COD 的平均去除率为 88.93% 。相比于常温下,低温下组合工艺对 COD 的去除率降低,分析原因是因为在低温下 BCO 中悬浮污泥不稳定^[17],同时植被的生长进入停滞或者休眠状态,影响了 COD 的去除。

不同温度时 BCO 和人工湿地对 COD 的去除率见图4(c)。在常温和低温时,BCO 对 COD 的去除率变化不大,分别为 85.80% 、 79.50% ;而人工湿地对 COD 的去除率都很有有限,分别为 8.30% 、 9.50% 。

很小。组合工艺对 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的平均去除率可以达到 97.70% ,出水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度满足一级 A 标准。

低温(7~12 $^{\circ}\text{C}$)下组合工艺对 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的去除效果见图5(b)。当平均 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度为 55.20 mg/L 时,BCO 出水平均 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度为 21.00 mg/L ,人工湿地出水有一定波动,平均出水 $\text{NH}_4^+ -$

N浓度为9.90 mg/L。组合工艺对NH₄⁺-N的平均去除率为82.80%,与常温时相比下降明显。

不同温度时BCO和人工湿地对NH₄⁺-N的去除率见图5(c)。不同温度条件下,BCO对NH₄⁺-N的去除率分别为91.10%、61.50%,人工湿地对NH₄⁺-N的去除率分别为6.60%、21.30%;常温时,BCO对NH₄⁺-N的去除率很高,这是由于在生

物接触氧化工艺中增设缺氧段能使硝化菌和反硝化菌在不同的功能区富集,消除了COD对好氧区自养硝化菌的抑制作用。低温时BCO对NH₄⁺-N的去除率受到较大影响,这是由于低温下生物接触氧化工艺中微生物生态丰富性降低^[18]。相比于常温下,垂直流人工湿地在低温下对NH₄⁺-N的去除中占着更大的比例。

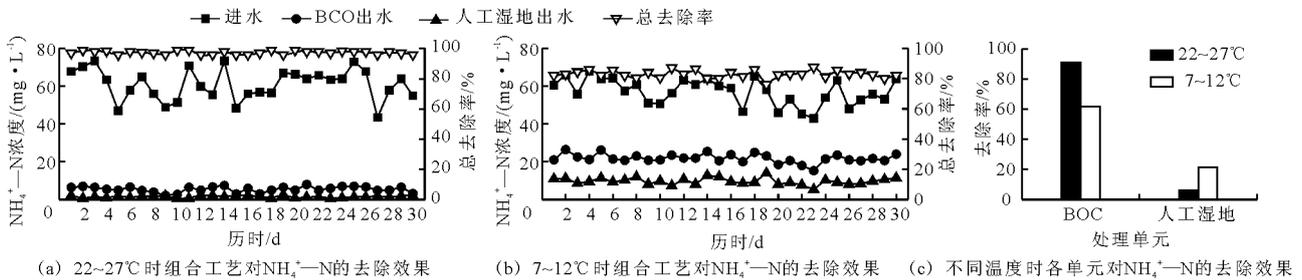


图5 NH₄⁺-N的去除效果及各单元的去除率

3.3 对TN的去除特性

常温(22~27℃)下组合工艺对TN的去除效果见图6(a)。组合工艺对TN有着高效稳定的去除效果,在进水TN平均浓度70.10 mg/L的条件下,BCO平均出水TN浓度为26.30 mg/L,人工湿地出水TN平均浓度为12.70 mg/L,对TN的平均去除率为81.20%。

低温(7~12℃)下组合工艺对TN的去除效果见图6(b)。平均进水TN浓度为66.10 mg/L,比常温时略有降低,BCO出水平均TN浓度为39.10 mg/L,人工湿地出水TN浓度比较稳定,为19.90 mg/L。组合工艺对TN的去除率为70.50%。

不同温度时BCO和人工湿地对TN的去除率见

图6(c)。低温时BCO对TN的去除率为40.90%,远低于常温条件下62.70%的去除率;低温时人工湿地对TN的去除效果优于常温条件下,常温 and 低温时的去除率分别为18.50%、29.60%。温度降低,BCO对TN去除率受到较大影响,主要是在低温下底物和溶解氧的扩散速率变慢,大多数硝化菌和反硝化菌处于生物絮体内部^[18],因此低温下硝化反应和反硝化反应难以进行。与常温下相比,在低温时人工湿地对TN的去除贡献率较大,这是因为人工湿地对TN的去除是通过基质的过滤、吸附作用完成^[19],另一方面低温时人工湿地的进水的COD浓度较高,对反硝化有利。

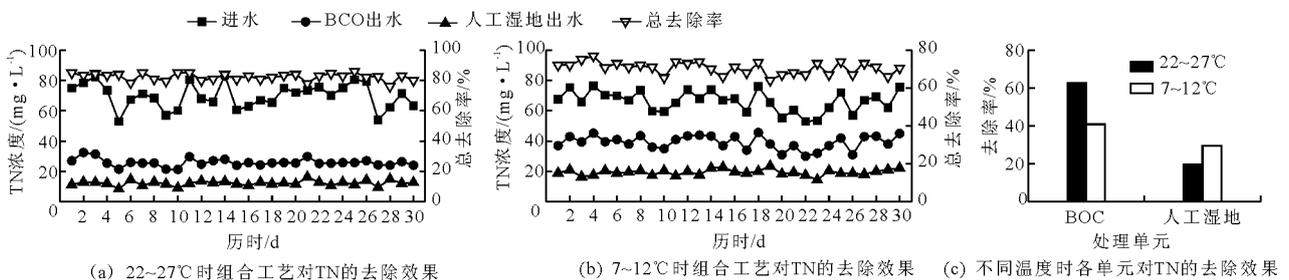


图6 TN的去除效果及各单元的去除率

3.4 对PO₄³⁻-P的去除特性

常温(22~27℃)时组合工艺对PO₄³⁻-P的去除效果见图7(a)。在平均进水PO₄³⁻-P浓度为5.02 mg/L时,BCO平均出水PO₄³⁻-P浓度为1.58 mg/L,大部分PO₄³⁻-P都随着BCO中的剩余污泥排出系统而被去除。人工湿地出水相对稳定,平均

PO₄³⁻-P浓度为0.43 mg/L,组合工艺对PO₄³⁻-P的平均去除率为91.10%。BCO对PO₄³⁻-P的去除主要依靠剩余污泥的排出。人工湿地去除PO₄³⁻-P主要依靠植物吸收和基质吸附完成。人工湿地中有机磷在微生物作用下分解氧化为无机磷,无机磷在植物吸收及同化作用下可转化成植物的

ATP、DNA、RNA 等有机成分,进入到植物体内^[20]。基质对磷的吸附主要为化学吸附,即可溶性磷与基质中的 Ca、Al、Fe 和土壤颗粒吸附、络合,形成难溶性物质沉淀去除^[21]。

低温(7~12℃)时组合工艺对 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 的去除效果见图 7(b)。在平均进水 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 浓度为 4.80 mg/L 时,BCO 出水 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 浓度较常温时波动较大,平均值为 1.82 mg/L,人工湿地出水 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 浓度较常温时增大,平均值为 0.88 mg/L,组合工艺对 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 的平均去除率为 80.90%。低温时组合工艺对磷的去除率较常温时降低,这可能是由于低温时水中 VFA (volatile fatty acid,挥发性脂肪酸)的浓度较低,而 VFA 又影响聚

磷菌厌氧释磷^[22-23],从而导致聚磷菌吸磷能力下降,除磷效果变差。

不同温度时 BCO 和人工湿地对 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 的去除率见图 7(c)。常温和低温时 BCO 对 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 的去除率变化不大,分别为 67.90%、61.30%。不同温度时人工湿地对 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 的去除率分别为 23.20%、19.60%。低温条件下,BCO 和人工湿地对 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 的去除率均降低。

3.5 水力停留时间(HRT)对 BCO 及水力负荷对人工湿地处理效果的影响

3.5.1 HRT 对 BCO 去除污染物效能的影响

在常温和低温条件下,HRT 对 BCO 去除污染物效能的影响见表 2。

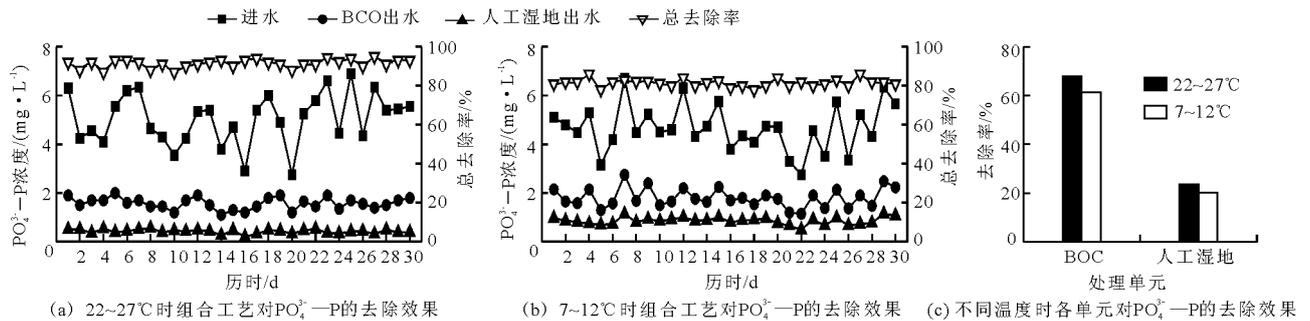


图 7 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 的去除效果及各单元的去除率

表 2 常低温下 HRT 对 BCO 去除效能的影响

温度/ ℃	HRT/ h	COD			$\text{NH}_4^+\text{-N}$			TN			$\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$		
		进水 浓度/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	出水 浓度/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	去除率/ %	进水 浓度/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	出水 浓度/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	去除率/ %	进水 浓度/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	出水 浓度/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	去除率/ %	进水 浓度/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	出水 浓度/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	去除率/ %
22~27	6	150.42	51.14	66.01	48.00	25.28	47.16	56.57	33.28	41.12	4.17	1.98	52.40
	9	173.28	19.86	88.56	46.28	6.63	85.54	49.14	15.19	69.13	3.90	0.98	74.81
	12	150.71	15.43	89.68	44.85	4.50	89.92	52.85	14.12	73.08	3.61	1.34	63.48
7~12	6	219.28	87.75	59.94	52.57	30.02	42.95	59.57	40.43	32.13	4.05	2.32	42.84
	9	212.42	41.51	80.49	53.42	20.00	62.22	60.14	29.98	50.10	4.37	1.61	63.40
	12	187.71	26.86	85.62	51.29	17.14	66.50	57.28	24.27	57.63	4.38	1.33	70.06

由表 2 可知,在常温下(22~27℃),当 HRT 从 6 h 提高至 12 h,BCO 对 COD、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TN 和 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 的去除率从 66.01%、47.16%、41.12% 和 52.40% 分别增大至 89.68%、89.92%、73.08% 和 63.48%,出水浓度分别为 15.43、4.50、14.12、1.34 mg/L。

当 HRT 较小时,进水流量大,水流剪切作用强,不利于 BCO 中生物膜在填料表面上附着生长;当 HRT 增大时,基质与生物膜充分接触,单位生物量活性增强,污染物去除效果明显^[24-25]。在低温下

(7~12℃),当 HRT 从 6 h 升高至 12 h 时,BCO 对 COD、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TN 和 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 的去除率从 59.94%、42.95%、32.13% 和 42.84% 分别增大至 85.62%、66.5%、57.63%、70.06%,其出水浓度分别为 26.86、17.14、24.27、1.33 mg/L。这是因为低温下微生物活性受到抑制,BCO 对污染物的去除能力下降。

3.5.2 水力负荷(HLR)对人工湿地去除污染物效能的影响 在常温和低温条件,HLR 对人工湿地去除污染物效能的影响见表 3。

表3 常、低温下 HLR 对人工湿地处理效能的影响

温度/ ℃	HLR/ (m ³ ·m ⁻² ·d ⁻¹)	COD			NH ₄ ⁺ -N			TN			PO ₄ ³⁻ -P		
		进水 浓度/ (mg·L ⁻¹)	出水 浓度/ (mg·L ⁻¹)	去除率/ %	进水 浓度/ (mg·L ⁻¹)	出水 浓度/ (mg·L ⁻¹)	去除率/ %	进水 浓度/ (mg·L ⁻¹)	出水 浓度/ (mg·L ⁻¹)	去除率/ %	进水 浓度/ (mg·L ⁻¹)	出水 浓度/ (mg·L ⁻¹)	去除率/ %
22~27	2.74	15.43	7.00	5.58	4.50	0.91	7.98	14.12	9.37	8.96	1.34	0.44	24.90
	3.65	19.86	10.44	5.43	6.63	1.07	12.05	15.19	8.96	12.67	0.98	0.34	16.59
	5.47	51.14	21.10	19.96	25.28	14.25	22.92	33.28	23.67	16.94	1.98	0.85	27.00
7~12	2.74	26.86	18.39	4.44	17.14	6.18	21.33	24.27	14.07	17.80	1.33	0.66	14.93
	3.65	41.51	24.09	8.51	20.00	9.11	20.38	29.98	18.08	19.80	1.61	0.81	12.20
	5.47	87.75	53.74	15.49	30.02	22.46	14.36	40.43	29.23	18.70	2.32	1.18	28.20

由表3可知,在常温条件下(22~27℃),人工湿地的HLR从2.74提高至5.47 m³/(m²·d)时,对COD、NH₄⁺-N、TN和PO₄³⁻-P的去除率从5.58%、7.98%、8.96%、24.90%分别增大至19.96%、22.92%、16.94%、27.00%,出水浓度分别为21.10、14.25、23.67、0.85 mg/L。这是因为当人工湿地的水力负荷为2.74 m³/(m²·d)时,对应的BCO的HRT为12 h,BCO完成了大部分污染物的去除,进入到人工湿地中的污染物浓度很低,其不能充分发挥去除污染物的能力,所以污染物去除率较低;当水力负荷增大为5.47 m³/(m²·d)时,对应的BCO的HRT为6 h,此时BCO出水中污染物浓度较高,能够充分发挥人工湿地去除污染物效能,所以各污染物去除率升高,这与梁奇奇等^[26]的研究结果相反,这是因为他采用了单一的人工湿地处理生活污水。在低温下(7~12℃),当人工湿地的HLR从2.74提高至5.48 m³/(m²·d),对COD、TN和PO₄³⁻-P的去除率从4.44%、17.8%、14.93%分别增加至15.49%、18.70%、28.20%,而NH₄⁺-N的去除率从21.33%降低至14.36%,出水COD、NH₄⁺-N、TN和PO₄³⁻-P浓度依次为53.74、22.46、29.23、1.18 mg/L。这是因为在低温下,温度对硝化菌活性的影响更敏感。

综合表2和表3,低温下(7~12℃),在BCO的HRT为12 h、人工湿地对应的HLR为2.74 m³/(m²·d)时,组合工艺出水COD、NH₄⁺-N、TN、PO₄³⁻-P分别为18.40、6.17、14.17、0.66 mg/L,总的去除率分别为90.60%、87.80%、75.40%、85.30%,可见,在低温条件下,该系统仍然具有较好的污染物去除性能。

4 结论

(1)常温(22~27℃)时,组合工艺出水COD、

NH₄⁺-N、TN、PO₄³⁻-P分别为14.60、1.40、12.70、0.43 mg/L,去除率分别为94.10%、97.70%、81.2%、91.10%,出水水质满足《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918-2002)一级A标准;低温(7~12℃)下,组合工艺出水COD、NH₄⁺-N、TN、PO₄³⁻-P分别为29.60、9.90、19.90、0.88 mg/L,去除率分别为88.93%、82.80%、70.50%、80.90%,出水水质满足《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918-2002)一级B标准。

(2)低温下,当BCO的HRT从6 h提高至12 h时,其对COD、NH₄⁺-N、TN和PO₄³⁻-P的去除率呈现增大趋势,其出水浓度分别为15.43、4.50、14.12、1.34 mg/L。当人工湿地的HLR逐渐增大时,其对COD、TN和PO₄³⁻-P的去除率也呈现增大趋势,而对NH₄⁺-N的去除率却呈现递减规律。组合工艺在BCO的HRT为12 h、人工湿地的HLR为2.74 m³/(m²·d)时,其出水COD、NH₄⁺-N、TN和PO₄³⁻-P分别为18.40、6.17、14.17和0.66 mg/L,总的去除率分别为90.60%、87.80%、75.40%和85.30%,系统具有较好的去除污染物性能。

(3)BCO不但减小了人工湿地的污染负荷,而且避免了人工湿地容易堵塞的风险,同时低温下人工湿地又能很好地弥补BCO对氮、磷去除的不足。该组合工艺运行稳定,受温度影响较小,是一种很有应用价值的工艺。

参考文献:

- [1] 王亮. “生物滤池+生物接触氧化池”组合工艺处理小城镇生活污水的试验研究[D]. 重庆:重庆大学, 2015.
- [2] 阳琪琪. A/O生物接触氧化工艺处理城市污水试验研究[D]. 重庆:重庆大学, 2013.
- [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] 于少鹏, 王海霞, 万忠娟, 等. 人工湿地污水处理技术及其在我国发展的现状与前景[J]. 地理科学进展, 2004, 23(1): 22-29.
- [5] 刘冬, 张慧泽, 徐梦佳. 我国人工湿地污水处理系统的现状探析及展望[J]. 环境保护, 2017, 45(4): 25-28.
- [6] 陶敏, 贺锋, 王敏, 等. 人工湿地强化脱氮研究进展[J]. 工业水处理, 2014, 34(3): 6-10.
- [7] 黄锦楼, 陈琴, 许连煌. 人工湿地在应用中存在的问题及解决措施[J]. 环境科学, 2013, 34(1): 401-408.
- [8] 王建翔, 金璇. 生物接触氧化-人工湿地组合工艺处理集镇污水[J]. 给水排水, 2013, 49(S1): 135-137.
- [9] 刘婧, 黎忠, 张太平, 等. 生物接触氧化/人工湿地组合工艺处理农村生活污水[J]. 安徽农业科学, 2010, 38(17): 9163-9164.
- [10] 朱琼璐, 楼倩, 崔理华, 等. 生物接触氧化-复合人工湿地组合工艺对工业园区污水的处理效果研究[J]. 环境污染与防治, 2012, 34(1): 37-41+55.
- [11] 蒋岚岚, 胡邦, 冯成军, 等. 温度对膜生物反应器运行效果的影响分析[J]. 给水排水, 2014, 50(11): 124-127.
- [12] 姜涛, 赫俊国, 杨晓南, 等. 温度对复合式 A/O 工艺的影响研究[J]. 给水排水, 2007, 33(S1): 115-118.
- [13] 胡奇. 生物接触氧化-温室结构潜流人工湿地处理农村生活污水[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011.
- [14] 谷先坤. 生物接触氧化和人工湿地组合工艺处理生活污水尾水研究[D]. 南京: 南京师范大学, 2011.
- [15] 梁建军, 陈莽, 何强. 潜流人工湿地-生物接触氧化处理低温低浓度生活污水[J]. 环境工程学报, 2013, 7(11): 4275-4280.
- [16] APHA. Standard methods for the Examination of water and wastewater [M]. Washington DC: American Public Health Association, 2007.
- [17] 端正花, 潘留明, 陈晓欧, 等. 低温下活性污泥膨胀的微生物群落结构研究[J]. 环境科学, 2016, 37(3): 1070-1074.
- [18] 梁建祺, 宁寻安. 生物接触氧化技术在低温条件下脱氮除磷效果试验研究[J]. 环境工程, 2009, 27(S1): 334-336+37.
- [19] 李志杰, 孙井梅, 刘宝山. 人工湿地脱氮除磷机理及其研究进展[J]. 工业水处理, 2012, 32(4): 1-5.
- [20] 钟成华, 李杰, 邓春光. 人工湿地废水处理中氮、磷去除机理研究[J]. 重庆建筑大学学报, 2008, 30(4): 141-145.
- [21] 徐丽, 葛大兵, 谢小魁. 水力停留时间对人工湿地运行的影响[J]. 中国农学通报, 2014, 30(31): 219-223.
- [22] 张波, 高廷耀. 生物脱氮除磷工艺厌氧/缺氧环境倒置效应[J]. 给水排水, 1997, 13(3): 7-10+2.
- [23] 王亚宜, 彭永臻, 王淑莹. 反硝化除磷理论、工艺及影响因素[J]. 给水排水, 2003, 19(1): 33-36.
- [24] 王志勇, 许振成, 魏清伟, 等. HRT 对悬挂链曝气式生物接触氧化工艺的影响[J]. 环境科学与技术, 2009, 32(5): 52-56+61.
- [25] 张岩, 李秀艳, 徐亚同, 等. 8种植物床人工湿地脱氮除磷的研究[J]. 环境污染与防治, 2012, 34(8): 49-52.
- [26] 梁奇奇, 沈耀良, 吴鹏, 等. 植物种类与水力负荷对人工湿地去除污染物的交互作用[J]. 环境工程学报, 2016, 10(6): 2975-2980.

(上接第 27 页)

- [17] 温亮, 侯英姿. 山东省水资源与社会经济发展协调度评价[J]. 国土与自然资源研究, 2017(6): 30-31.
- [18] 杨红霞, 蔡昕. 基于 WDO-PP 模型的区域水资源系统与经济社会生态系统协调度评价[J]. 水资源与水工程学报, 2017, 28(2): 68-75.
- [19] 谢永红, 张云英. 云南省区域水资源与社会经济协调发展研究[J]. 水资源保护, 2015, 31(3): 112-114.
- [20] 邵金花, 刘贤赵, 李德一. 烟台水资源与社会经济可持续发展协调度分析[J]. 经济地理, 2007, 27(2): 599-602.
- [21] 周校培, 陈建明. 南京市水资源与社会经济耦合协调发展研究[J]. 水利经济, 2016, 34(4): 26-30+34+74.
- [22] 万晨, 万伦来, 金菊良. 安徽省水资源-社会经济系统协同分析[J]. 人民黄河, 2016, 38(9): 50-55+67.
- [23] 马向东, 孙金华, 胡震云. 生态环境与社会经济复合系统的协同进化[J]. 水科学进展, 2009, 20(4): 566-571.
- [24] 赵克勤. 集对分析对不确定性的描述和处理[J]. 信息与控制, 1995, 24(3): 162-166.
- [25] HAKEN H. Synergetics [M]. Springer, Berlin, Heidelberg: 1983.
- [26] 孙毓, 刘玲基, 居娴. 天津市社会经济与水资源发展协同预警研究[J]. 水资源保护, 2009, 25(6): 81-84+89.
- [27] 彭耿, 刘芳. 武陵山片区区域经济协同度的评价研究[J]. 经济地理, 2014, 34(10): 39-45.
- [28] 胡光伟. 湖南省“3+5”城市群土地综合承载力评价与提升对策[D]. 长沙: 湖南师范大学, 2010.