

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2020.11.004

UASB + 两级人工湿地组合工艺处理农村污水

王晓云¹, 蒋柱武¹, 付爱民²

(1. 福建工程学院 生态环境与城市建设学院, 福建 福州 350008; 2. 福建宁德核电有限公司, 福建 宁德 355200)

摘要: 为研发适用于我国农村的分散式污水处理装置, 采用 UASB 串联两级表面流人工湿地(FWS1、FWS2)的组合工艺处理农村生活污水。按照污水通过 UASB 的不同水力停留时间(HRT)共分4个阶段进行试验, 探讨工艺对 COD、BOD₅、NH₄⁺-N、TN、TP、SS 的去除效果。结果表明, 当 UASB、FWS1、FWS2 的 HRT 分别为 2、45、64 h 时, 整个系统的综合处理效果最佳, 对 COD、BOD₅、SS、NH₄⁺-N、TN、TP 的去除率分别为 88%、96%、90%、77%、72%、98%。此外, 随着 UASB 反应器 HRT 的缩短, 对 COD、BOD₅、SS 的去除率有降低趋势, 当 HRT 为 1 h 时, 对 SS 没有去除效果; NH₄⁺-N、TN 主要依靠湿地系统的植物转化及微生物的硝化反硝化作用来降解; UASB 及人工湿地对 TP 的去除均起到重要作用。采用一级反应动力学方程计算 COD、BOD₅、SS、TP、NH₄⁺-N、TN 的一级反应速率常数(K_v), 均值分别为(0.23 ± 0.09)、(0.22 ± 0.03)、(0.18 ± 0.09)、(0.25 ± 0.09)、(0.09 ± 0.03)、(0.11 ± 0.03) d⁻¹, 并根据监测数据给出了一级反应速率常数与水温的关系式。

关键词: 农村分散式污水; 升流式厌氧污泥床; 人工湿地; 水力停留时间; 一级反应速率常数

中图分类号: TU992 文献标识码: A 文章编号: 1000-4602(2020)11-0021-06

Treatment of Rural Domestic Sewage by Combined Technology of Upflow Anaerobic Sludge Blanket and Two-stage Constructed Wetlands

WANG Xiao-yun¹, JIANG Zhu-wu¹, FU Ai-min²

(1. School of Ecological Environment and Urban Construction, Fujian University of Technology, Fuzhou 350008, China; 2. Fujian Ningde Nuclear Power Co. Ltd., Ningde 355200, China)

Abstract: To develop decentralized sewage treatment devices suitable for rural areas in China, a combined technology of upflow anaerobic sludge blanket (UASB) and two-stage surface flow constructed wetlands (FWS1, FWS2) was applied to treat rural domestic sewage. The experiment was divided into four stages according to different hydraulic retention time (HRT) of sewage passing through the UASB, and the removal effect of COD, BOD₅, NH₄⁺-N, TN, TP and SS was explored. When the HRTs of UASB, FWS1 and FWS2 were 2 h, 45 h and 64 h, respectively, the comprehensive treatment efficiency of the whole system was the best, and the removal rates of COD, BOD₅, SS, NH₄⁺-N, TN and TP were 88%, 96%, 90%, 77%, 72% and 98%, respectively. It was found that the removal efficiencies of COD, BOD₅ and SS decreased with the shortening of HRT of UASB. The degradation of NH₄⁺-N and

基金项目: 国家自然科学基金资助面上项目(51878171); 福建省高校产学研合作重大项目(2016H6003)

TN mainly relied on the plant transformation and biological nitrification and denitrification of the wetland system. Both UASB and constructed wetlands played an important role in the TP removal. The first order reaction rate constants (K_V) of COD, BOD_5 , SS, TP, $NH_4^+ - N$ and TN were calculated by using the first-order reaction kinetics, which were $(0.23 \pm 0.09) d^{-1}$, $(0.22 \pm 0.03) d^{-1}$, $(0.18 \pm 0.09) d^{-1}$, $(0.25 \pm 0.09) d^{-1}$, $(0.09 \pm 0.03) d^{-1}$ and $(0.11 \pm 0.03) d^{-1}$, and the relationship between the first-order reaction rate constant and water temperature was constructed.

Key words: rural domestic sewage; upflow anaerobic sludge blanket; constructed wetland; hydraulic retention time; the first-order reaction rate constant

农村污水粗放型排放情况十分常见,村庄环境受到影响,并造成水体污染,由于农村饮用水处理设施相对落后,从而进一步影响到农村饮用水水质安全^[1]。农村生活污水具有氮磷含量高、可生化性好、水质水量波动大的特点。升流式厌氧污泥床(UASB)在处理中、高浓度工业废水方面取得了良好的效果,自1980年开始在生活污水处理中应用并推广^[2-3]。人工湿地作为较为常见的生态处理系统,具有出水水质好、运行管理方便、投资运行费用低、脱氮除磷效果好等优点^[4],在土地资源相对充足的农村,应用优势明显。考虑到人工湿地具有水力负荷承载力差、易于堵塞、受季节及湿地植物生长期影响等缺点,不宜单独作为污水处理工艺使用,其组合处理工艺更适合农村污水排放现状^[4]。本研究针对农村污水特点,结合上述两系统的优点,在人工湿地前增设UASB处理系统。试验设计采用表面流型人工湿地,以提升后续投用工程的景观价值,并采用两级串联提高出水水质。主要分析不同水力停留时间(HRT)下各单元处理效果,以为农村生活污水处理提供技术参考。

1 材料与方法

1.1 工艺与运行条件

试验装置主要由一个升流式厌氧污泥床(UASB)反应器、两个表面流型人工湿地(FWS)处理槽组成,各槽材质均为PVC。试验采用UASB+表面流型人工湿地组合工艺,处理流程见图1。UASB反应器尺寸为 $10\text{ cm} \times 10\text{ cm} \times 85\text{ cm}$,有效容积为 8.0 L ,使用污水厂活性污泥填充槽高度约 55 cm ,初始MLSS浓度约为 $26\ 500\text{ mg/L}$,反应器底部设置进水分散管,顶部有产气排出设备,反应器内部设有三相分离器。设有两个FWS处理槽,第1个FWS1处理槽有效容积为 126 L ,尺寸为 $80\text{ cm} \times 45\text{ cm} \times 35\text{ cm}$,种植株高为 $67 \sim 78\text{ cm}$ 的芦苇

(*Phragmites australis*)12株、株高为 $60 \sim 75\text{ cm}$ 的香蒲(*Typha orientalis*presl)12株。第2个FWS2处理槽有效容积为 180 L ,尺寸为 $80\text{ cm} \times 45\text{ cm} \times 50\text{ cm}$,种植株高为 $56 \sim 69\text{ cm}$ 的灯芯草(*Juncus effusus*)15株,直径为 $10 \sim 11\text{ cm}$ 、株高为 $12 \sim 14\text{ cm}$ 的水芙蓉(*Pistia stratiotes*)15株。对所有植物定期采收并观察、记录其生长速率。

原水取自某村镇生活污水,水质特性如下:COD浓度为 $190 \sim 310\text{ mg/L}$ 、平均为 $(240 \pm 28)\text{ mg/L}$, BOD_5 浓度为 $90 \sim 210\text{ mg/L}$ 、平均为 $(163 \pm 17)\text{ mg/L}$,SS浓度为 $51.6 \sim 221.8\text{ mg/L}$ 、平均值为 $(147 \pm 25.6)\text{ mg/L}$, $NH_4^+ - N$ 浓度为 $10 \sim 35\text{ mg/L}$ 、平均为 $(25 \pm 3)\text{ mg/L}$,TN浓度为 $15 \sim 42\text{ mg/L}$ 、平均为 $(32 \pm 4.5)\text{ mg/L}$,TP浓度为 $4 \sim 12\text{ mg/L}$ 、平均为 $(7.8 \pm 0.4)\text{ mg/L}$ 。

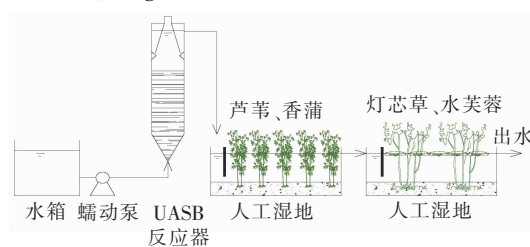


图1 UASB+人工湿地组合工艺处理流程

Fig. 1 Flow chart of the combined process of UASB and two-stage constructed wetlands

试验采用连续进水,进水管接自污水槽,使用蠕动泵将污水连续注入UASB反应器,出水从顶部以重力流方式进入FWS,采用两级串联方式,湿地前端设置隔板,进水处设置均匀散水装置,以便提高进水复氧效果。以UASB反应器的水力停留时间(HRT)为系统的操作参数,由蠕动泵进行进水流量控制。文献表明^[4]UASB反应器在水处理中HRT大都控制在 7 h 以下,本研究从 $HRT = 6\text{ h}$ 开始操作至稳定,而后逐渐降低HRT至 4 、 2 及 1 h 。整个试

验共分成4个阶段:第1阶段,2018年7月4日—9月9日,共68 d, $HRT = 6$ h ($Q = 22.2$ mL/min, FWS1、FWS2的HRT分别为135、193 h),对应取样编号1~24;第2阶段,2018年9月15日—11月4日,共51 d, $HRT = 4$ h ($Q = 33.3$ mL/min, FWS1、FWS2的HRT分别为90、128 h),对应取样编号25~43;第3阶段,2018年12月15日—2019年1月19日,共36 d,采用 $HRT = 2$ h ($Q = 66.6$ mL/min, FWS1、FWS2的HRT分别为45、64 h),对应取样编号44~57;第4阶段,2019年2月16日—3月25日,共38 d,采用 $HRT = 1$ h ($Q = 133.2$ mL/min, FWS1、FWS2的HRT分别为22、32 h),对应取样编号58~70。

1.2 分析项目及方法

COD、 BOD_5 、 $NH_4^+ - N$ 、TN、TP、SS、水温每隔2~3 d 采样检测1次。COD采用重铬酸钾法测定, BOD_5 采用稀释培养法测定, $NH_4^+ - N$ 采用纳氏试剂紫外分光光度法测定,TN、TP由哈希多指标分析仪测定,SS采用标准重量法测定^[5],水温采用PT电子温度计测定。

2 结果与讨论

2.1 组合工艺对COD的去除效果

组合工艺对COD的去除效果如图2所示。可知,进水COD平均为 (240 ± 28) mg/L,经组合工艺处理后出水COD浓度平均为 (28.7 ± 10) mg/L(范围为15~60 mg/L),总去除率约为90%。第1阶段,进水COD浓度虽然呈现不规则变化,但经组合工艺处理后最终出水浓度相当稳定。在操作期间,UASB槽因直接取用污水处理厂颗粒化污泥接种,使得UASB对COD的去除率高达70%。由于气候温暖,湿地植物生长良好,微生物活跃,FWS1对COD的去除率高达50%,FWS2对COD的去除率高达40%。因此尽管进水COD浓度高,出水COD浓度仍可以保持较低水平,基本在30 mg/L以下。第2阶段,UASB槽的HRT由6 h缩短至4 h后,UASB对COD的去除率降至55%,FWS1、FWS2对COD的去除率仍分别保持在50%和40%。第3阶段,进水COD浓度比前两个阶段高,平均约为255 mg/L,经组合工艺处理后,出水水质较稳定,HRT由4 h缩短至2 h后,UASB、FWS1、FWS2对COD的去除率分别仅下降4%、2%、2%左右。第4阶段,HRT由2 h缩短至1 h后,流量增大,使得UASB对COD的去除

率降至40%,但FWS1、FWS2对COD的去除率反而分别增加到60%、55%。这与系统供应的碳源有关,当负荷达到植物生长利用所需时,植物代谢加快^[6]。

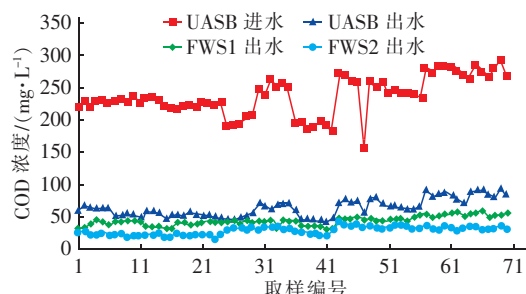


图2 组合工艺对COD的去除效果

Fig. 2 COD removal efficiency by combined process

2.2 组合工艺对 BOD_5 的去除效果

组合工艺对 BOD_5 的去除效果如图3所示。可知,进水 BOD_5 平均为 (163 ± 17) mg/L,经组合工艺处理后,出水 BOD_5 平均为 (10 ± 1) mg/L(范围为9~12 mg/L),总去除率为94.7%。第1、2阶段UASB对 BOD_5 的去除率均在70%左右,FWS1、FWS2对 BOD_5 的去除率均保持在30%左右。第3阶段,对 BOD_5 的去除效果较佳,由于系统在操作期间进水SS浓度较高,经由有机颗粒沉降而去除的 BOD_5 占大部分,使得UASB槽对COD的去除率高达65%,而FWS1、FWS2由于植物根系生长而形成的滤膜让微生物附着且植物光合作用的复氧,使微生物成长快速,有利于有机物分解^[6],去除率分别在50%、35%以上。由于以上原因,该阶段 BOD_5 在整个系统中的去除率达到90%,出水浓度均在10 mg/L以下。第4阶段,由于流量加倍,UASB槽对 BOD_5 的去除率下降到50%,而FWS1、FWS2对 BOD_5 的去除率则分别提高到60%、65%,其去除机理与COD的一致。

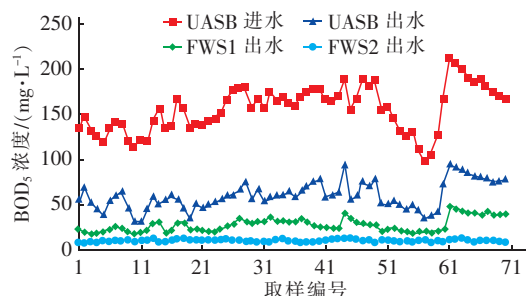


图3 组合工艺对 BOD_5 的去除效果

Fig. 3 BOD_5 removal efficiency by combined process

2.3 组合工艺对SS的去除效果

组合工艺对SS的去除效果如图4所示。可知,进水SS平均为 (147 ± 25.6) mg/L,经组合工艺处理后,出水SS平均为 (15 ± 7) mg/L(范围为5~60 mg/L),总去除率约为90%。第1阶段,进水SS浓度呈不规则起伏,经UASB处理后浓度降至50 mg/L左右,去除率约为50%,再经FWS1、FWS2处理后SS浓度则降至15 mg/L以下。第2阶段,HRT由6 h缩短至4 h后,UASB出水SS浓度与第1阶段相比并无明显变化,均维持在50 mg/L以下,去除率为50%,再经过FWS1、FWS2处理后SS浓度分别降至40、30 mg/L。第3阶段,HRT由4 h缩短至2 h,UASB对SS的去除率仅下降5%,经过FWS1、FWS2的根系过滤机制,有效将水中悬浮物去除,去除率可达到60%。第4阶段,HRT为1 h时,UASB系统对SS没有去除效果,出水SS浓度反而增加。出水中悬浮物主要靠FWS1、FWS2的根系过滤机制去除^[6],去除率分别约为80%、40%。

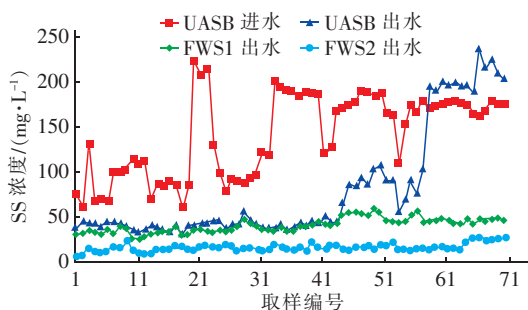


图4 组合工艺对SS的去除效果

Fig. 4 SS removal efficiency by combined process

2.4 组合工艺对 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的去除效果

进水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度平均为 (25 ± 3) mg/L,经组合工艺处理后,出水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度平均为 (6.5 ± 1) mg/L(范围为3~12 mg/L),总去除率约为75%。可以看出,4个阶段UASB出水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度均高于进水,这是因为厌氧环境会产生 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$,从而出现氨氮浓度不降反升的现象^[7]。第1、2阶段,UASB、FWS1、FWS2均出现氨氮出水浓度与进水浓度波动的情况,这期间FWS1对氨氮的去除率仅约为30%,FWS2去除率约为60%。初期进水及出水氨氮浓度均较高,但是随着时间的延长,氨氮浓度有降低的趋势,去除效果有提高的现象,最终出水氨氮浓度在15 mg/L以下。第3阶段,对氨氮的总去除率提高到77%,这与定期挖出、采收过密的植物有

关,此阶段FWS1对氨氮的去除率高达65%,FWS2对氨氮的去除率约为40%,最终出水的氨氮浓度 < 5.5 mg/L。第4阶段, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 去除率几乎不随HRT的缩短而降低,FWS1、FWS2对氨氮的去除率分别可达到40%、50%。

2.5 组合工艺对TN的去除效果

组合工艺对TN的去除效果如图5所示。可知,进水TN浓度平均为 (32 ± 4.5) mg/L,经组合工艺处理后,出水TN浓度平均为 (10 ± 2.5) mg/L(范围为8~22 mg/L),总去除率约为69%。可以看出,4个阶段UASB出水TN浓度均高于进水,这是因为厌氧环境氨化作用的结果。第1、2阶段,UASB、FWS1、FWS2均出现TN出水浓度与进水浓度波动的情况,这期间FWS1对TN的去除率仅为25%左右,FWS2对TN的去除率约为50%。初期进水及出水TN浓度均较高,但是随着时间的延长,浓度有降低的趋势,去除效果有提高的现象,最终出水TN浓度在15 mg/L以下。第3阶段,总去除率提高到72%,这也与定期挖出、采收过密的植物有关,此阶段FWS1对TN的去除率高达65%,FWS2对TN的去除率约为40%,最终出水TN浓度 < 10 mg/L。第4阶段,TN去除率几乎不随HRT的缩短而降低,FWS1、FWS2对TN的去除率分别可以达到35%、45%。

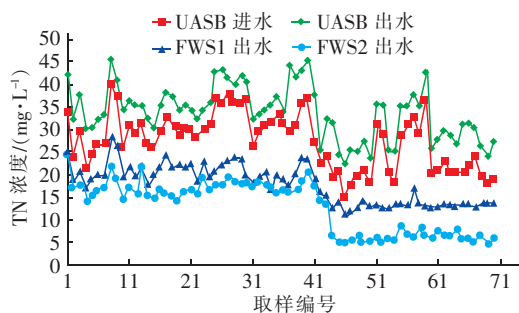


图5 组合工艺对TN的去除效果

Fig. 5 TN removal efficiency by combined process

2.6 组合工艺对TP的去除效果

组合工艺对TP的去除效果如图6所示。可知,进水TP平均为 (7.8 ± 0.4) mg/L,经组合工艺处理后,出水TP平均为0.3 mg/L,总去除率达到98%。4个阶段中,TP的去除均不受HRT的影响。UASB出水TP浓度均在4.0 mg/L以下,去除率可达到50%。FWS1、FWS2对TP的去除效果均很好,最终出水TP浓度均维持在较低水平,这主要依赖水生

植物根系的吸收作用^[7]。

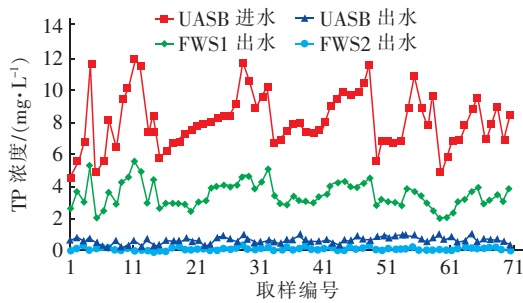


图6 组合工艺对TP的去除效果

Fig. 6 TP removal efficiency by combined process

2.7 去除各污染物的动力学

水温(T)的高低可能影响气体溶解度、微生物活性及代谢速率、化学反应速率等。水温低时DO浓度高,夏季水温升高,水中DO浓度降低,而温度升高使得生物活性加快,进一步消耗DO,将不利于保持良好的水质。监测结果发现,人工湿地系统进、出水最高水温均出现在2018年的7月15日,分别为29.3、31.3℃;进、出水最低水温均出现在2019年1月17日,温度均为15.8℃。进水平均水温为 (23.9 ± 3.5) ℃,出水平均水温为 (24.6 ± 3.2) ℃。

描述人工湿地中污染物降解的一级反应动力学模型^[8]可以表示为:

$$C_e = C_0 \exp(-K_v \cdot t) \quad (1)$$

表1 污染物降解的一级反应速率常数的线性拟合值

Tab. 1 Linear fitting of first order reaction rate constant of pollutant removal

| 项 目 | K_v 均值/ d^{-1} | θ | R^2 | K_{20}/d^{-1} | K_T/d^{-1} |
|----------------------------------|--------------------|----------|---------|-----------------|-------------------------------|
| COD | 0.23 ± 0.09 | 1.002 | 0.893 7 | 0.123 | $0.123 \times 1.002^{(T-20)}$ |
| BOD ₅ | 0.22 ± 0.03 | 1.001 | 0.907 1 | 0.128 | $0.128 \times 1.001^{(T-20)}$ |
| SS | 0.18 ± 0.09 | 0.999 | 0.835 6 | 0.118 | $0.118 \times 0.999^{(T-20)}$ |
| NH ₄ ⁺ - N | 0.09 ± 0.03 | 1.059 | 0.462 4 | 0.108 | $0.108 \times 1.059^{(T-20)}$ |
| TN | 0.11 ± 0.03 | 1.061 | 0.489 9 | 0.097 | $0.097 \times 1.061^{(T-20)}$ |
| TP | 0.25 ± 0.09 | 1.001 | 0.922 2 | 0.135 | $0.135 \times 1.001^{(T-20)}$ |

3 结论

① 采用UASB+两级人工湿地处理农村生活污水,出水COD、BOD₅、TN、TP浓度可以达到《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)的一级A标准。

② 组合工艺耐水力负荷冲击,适合处理水质、水量变化大的农村生活污水,且效果良好。当UASB、FWS1、FWS2的HRT分别为2、45、64 h时,整个系统的综合去除率最高,对COD、BOD₅、SS、NH₄⁺ - N、TN、TP的去除率分别为88%、96%、90%、

式中: C_0 和 C_e 分别为湿地污染区进、出水浓度,mg/L; K_v 为一级反应速率常数, d^{-1} ; t 为水力停留时间,d。

受水温影响的 K_v 可以表示为 K_T :

$$K_T = K_{20} \theta^{(T-20)} \quad (2)$$

式中: K_{20} 为水温在20℃时的一级反应速率常数, d^{-1} ; θ 为温度校正系数。

根据一级反应动力学方程求出各污染物的 K_v ,并线性模拟求得 K_T 与 T 的关系,见表1。结果显示,COD、BOD₅、SS、TP的 K_v 平均值分别为 (0.23 ± 0.09) 、 (0.22 ± 0.03) 、 (0.18 ± 0.09) 、 $(0.25 \pm 0.09) d^{-1}$,大于文献[8]中的报道值。其中,COD、BOD₅、SS、TP的模拟决定系数 R^2 值较大,表明使用一级反应动力学方程模拟该工艺上述污染物的 K_T 与 T 的关系及去除规律较好。NH₄⁺ - N、TN的 K_v 值较低,分别为 (0.09 ± 0.03) 、 $(0.11 \pm 0.03) d^{-1}$,而且线性模拟决定系数 R^2 值也较低,表明一级动力学方程不能模拟该工艺对NH₄⁺ - N、TN的去除规律以及 K_T 与 T 的关系,这可能与该工艺对NH₄⁺ - N、TN的去除能力有限有关,使得拟合效果较差。同时也发现,温度对NH₄⁺ - N、TN的去除效果影响较大,且呈正相关;而温度对COD、BOD₅、SS、TP的去除效果影响很小,这与Kadlec等^[9-10]的研究结果一致。

77%、72%、98%。

③ 组合工艺去除COD、BOD₅、SS、TP的一级反应速率常数均值分别为 (0.23 ± 0.09) 、 (0.22 ± 0.03) 、 (0.18 ± 0.09) 、 $(0.25 \pm 0.09) d^{-1}$,且决定系数 R^2 值较大,表明采用一级动力学方程模拟该工艺去除污染物的规律及 K_T 与 T 的关系较好。组合工艺去除NH₄⁺ - N、TN的 K_v 均值较低,分别为 (0.09 ± 0.03) 、 $(0.11 \pm 0.03) d^{-1}$,且决定系数 R^2 值也较低,表明一级动力学方程不适合模拟该组合工艺对NH₄⁺ - N、TN的去除规律以及 K_T 与 T 的关

系。同时也发现,温度对 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、TN 的去除效果影响较大,且呈正相关;而温度对 COD、 BOD_5 、SS、TP 的去除效果影响很小。

④ 组合工艺中人工湿地总 HRT 为 109 h (约为 4.5 d),满足《人工湿地污水处理工程技术规范》(HJ 2005—2010)中关于表面流人工湿地 HRT 在 4~8 d 的规定。按照处理量为 $1\,000\text{ m}^3/\text{d}$ 计算,需要湿地面积约 $7\,500\text{ m}^2$,适合南方农村地区利用现有土地并结合景观设计使用。

参考文献:

- [1] 邱俊,陈玺茜,郭若彬,等. 组合式人工湿地用于处理江西地区农村污水[J]. 中国给水排水,2018,34(24):84-86.
Qiu Jun, Chen Xixi, Guo Ruobin, *et al.* Combined constructed wetland for treatment of rural sewage in Jiangxi Province[J]. China Water & Wastewater, 2018, 34(24):84-86 (in Chinese).
- [2] 余晓玲,邓觅,吴永明,等. UASB-两级 A/O-生态塘组合工艺处理养猪废水[J]. 给水排水,2018,44(3):59-63.
Yu Xiaoling, Deng Mi, Wu Yongming, *et al.* Treatment of swine wastewater by combined process of UASB-two stage A/O-ecological pond[J]. Water & Wastewater Engineering, 2018, 44(3):59-63 (in Chinese).
- [3] 张康. 常温下 UASB 反应器处理城市生活污水的试验研究[D]. 广州:广东工业大学,2018.
Zhang Kang. Study on Urban Domestic Sewage Treatment with UASB Reactor at Normal Temperature [D]. Guangzhou:Guangdong University of Technology, 2018 (in Chinese).
- [4] 葛秋易,梁冬梅,肖尊东,等. 人工湿地治理东北地区典型农村面源污染工程设计[J]. 中国给水排水,2018,34(24):61-65.
Ge Qiuyi, Liang Dongmei, Xiao Zundong, *et al.* Design of constructed wetland for treatment of typical rural non-point source pollution in Northeast China [J]. China Water & Wastewater, 2018, 34(24):61-65 (in Chinese).
- [5] 付新喜,吴晓芙,奚成业,等. 农户型组合人工湿地系统生活污水处理效果分析[J]. 给水排水,2017,43(7):25-30.
Fu Xinxi, Wu Xiaofu, Xi Chengye, *et al.* Efficiency of rural sewage treatment by a household multiple-cell constructed wetland system [J]. Water & Wastewater Engineering, 2017, 43(7):25-30 (in Chinese).
- [6] 张琪,张统,李志颖. 低温条件下磁分离与装配式人工湿地处理小区污水试验研究[J]. 给水排水,2017,43(7):20-24.
Zhang Qi, Zhang Tong, Li Zhiying. Study on treatment of wastewater from residential area by magnetic separation and prefabricated constructed wetland under low temperature [J]. Water & Wastewater Engineering, 2017, 43(7):20-24 (in Chinese).
- [7] 黄杉,怀静,吴娟,等. 碳源补充促进人工湿地脱氮研究进展[J]. 水处理技术,2018,44(1):13-16.
Huang Shan, Huai Jing, Wu Juan, *et al.* Research progress of nitrogen removal promotion in constructed wetland system by carbon addition [J]. Technology of Water Treatment, 2018, 44(1):13-16 (in Chinese).
- [8] 何丽君. 人工湿地对城镇降雨径流面源污染的净化机理及动力学研究[D]. 广州:华南理工大学,2012.
He Lijun. Research on Purification Mechanism and Dynamics of Towns Runoff Non-point Pollution with Constructed Wetland [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2012 (in Chinese).
- [9] Kadlec R H. Deterministic and stochastic aspects of constructed wetland performance and design[J]. Water Sci Technol, 1997, 35(5):149-156.
- [10] Kadlec R H, Wallace S. Treatment Wetlands [M]. 2nd ed. Florida: CRC Press, 2009.



作者简介:王晓云(1978—),女,河北保定人,硕士,副教授,研究方向为水质净化及安全等。

E-mail: 541981557@qq.com

收稿日期:2019-09-18