

DOI :10.3969/j.issn.1004-6933.2012.04.016

改进型合并净化槽处理生活污水的影响因素

鲍可茜^{1,2},高镜清^{1,2},王志斌^{1,2},周俊^{1,2},张瑞芹^{1,2}

(1. 郑州大学化学与分子工程学院,河南 郑州 450001;2. 郑州大学环境科学研究院,河南 郑州 450001)

摘要 通过设置改性复合填料和微电解铁屑床对合并净化槽进行工艺改进,采用厌氧(缺氧)-好氧(A²/O)工艺处理生活污水。为优化该装置处理生活污水的效果,分别选取水力停留时间、有机负荷、污泥回流比作为运行条件进行试验室中试研究。结合试验结果和经济效益,得出最佳运行条件:水体停留时间为 8 h,此时系统对 COD、TN 和 TP 的去除率分别为 95%、63%、87%;COD 有机负荷为 2.7 g/(L·d),该条件下出水 COD、TN 和 TP 平均去除率分别可达到 90%、74%、88%;污泥回流比为 75%,此时净化槽出水 COD、TN 和 TP 平均去除率分别达到 95%、70%、94%。

关键词 合并净化槽;生活污水;水力停留时间;有机负荷;污泥回流比

中图分类号:X523 文献标识码:A 文章编号:1004-6933(2012)04-0069-05

Factors influencing domestic sewage treatment with modified Merger Johkaso

BAO Ke-qian^{1,2}, GAO Jing-qing^{1,2}, WANG Zhi-bin^{1,2}, ZHOU Jun^{1,2}, ZHANG Rui-qin^{1,2}

(1. College of Chemistry and Molecular Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. Research Institute of Environmental Science, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: To improve the Merger Johkaso technology, a micro-electrolysis bed and complex biological fillers were set up in a test, and an anaerobic-anoxic-aerobic (A²/O) bioreactor system was designed to treat domestic wastewater. In order to optimize the performance of the system, chemical oxygen demand (COD), and TN and TP removal rates of the system were investigated, with full consideration of the influences of three major controlling factors: the hydraulic retention time, the organic loading rate, and the sludge reflux ratio. Based on long-term treatment results, the best removal rates of COD, TN, and TP were 95%, 63%, and 87%, respectively, when the hydraulic retention time was at 8 h. When the organic loading rate was 2.7 g·L⁻¹·d⁻¹, the average removal rates of COD, TN, and TP were 90%, 74%, and 88%, respectively. When the sludge reflux ratio was 75%, the average removal rates of COD, TN, and TP were 95%, 70%, and 94%, respectively.

Key words: Merger Johkaso; domestic sewage; hydraulic retention time; organic load; sludge reflux ratio

目前,全国农村每年有超过 2 500 万 t 的生活污水排放,80% 没有经过任何处理直接排入河流、水塘,影响村民居住环境,严重威胁农民的身体健[1-2]。我国农村地区几乎没有污水管道系统和污水处理管理措施,这严重威胁了水环境安全,并且目前国内一直沿用的传统化粪池处理方式,已不能满[3-4]。

合并净化槽源于日本,是一种小型家用污水处理系统,融活性污泥法和生物膜法于一体,适用于分散型地区的污水处理[5]。净化槽作为分散式污水处理的有效手段,在日本有着广泛的应用,并且随着技术的不断革新,可以满足不同的水质处理要求[6-7]。该装置采用 A²/O 工艺,由厌氧(缺氧)-好氧槽构成,可同时实现有机物去除和脱氮除磷[8-9]。

基金项目:国家外专局国家级重点引智基金(20104100141);郑州市科技创新团队基金(094SYJH36069)

作者简介:鲍可茜(1986—)女,硕士研究生,研究方向为水污染控制与生态修复。E-mail: bkq490390926@sina.com

通讯作者:高镜清,博士。E-mail: jingqinggao@zzu.edu.cn

相对于传统处理工艺,合并净化槽具有高效、一体化、污泥少和出水可循环利用等优点,可采用埋地式,既可保温、除臭,地面上又可作为其他用地,不影响用户环境的美观,适用于我国广大农村地区。该工艺主要利用附着于填料生长的生物膜去除污染物,即生物法。相对于物理化学法,生物法因其更环保和成本更低等优势而被推广应用于污水除去有机物、TN、TP,但是TP的去除效果不尽理想^[10-11]。因此,针对合并净化槽除磷效果差和建造费用高等问题,改造和研制出符合我国国情的生活污水处理装置具有重要意义。

笔者根据传统的净化槽工艺技术,并结合地区实际情况,从降低填料成本、降低运行成本和提高除磷效果等方面进行改进,改善后的净化槽中采用自主研发的复合生物填料和微电解铁屑床。为提高改进后的净化槽生活污水处理效果,试验考察了水力停留时间(以下简称HRT) t 、COD有机负荷(以下简称OLR) L 、污泥回流比 R 共3个运行条件对净化槽生活污水处理效果的影响,力求得出最佳运行参数,以期为该工艺在我国新农村生活污水处理领域的推广应用提供理论基础。

1 材料与方法

1.1 工艺流程和装置

试验工艺流程如图1所示,中试装置如图2所示。装置材质为有机玻璃,总体规格为:长89 cm,宽40 cm,高66 cm,总有效容积216 L,主要由厌氧槽、缺氧槽、曝气槽、沉淀槽及微电解铁屑床等构成,其中铁屑床设置在厌氧槽中,复合生物填料分别安装

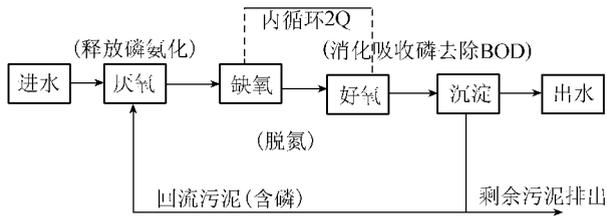


图1 工艺流程

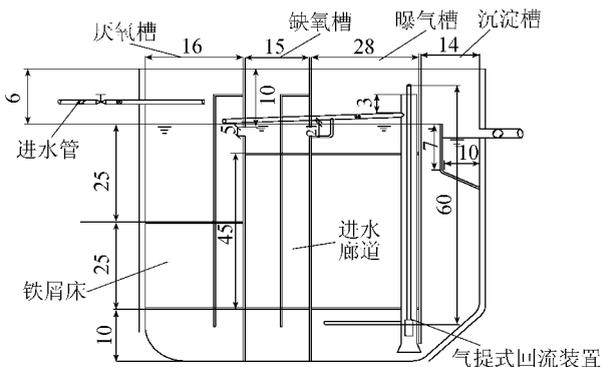


图2 中试装置剖面图(单位:cm)

在缺氧槽、厌氧槽和曝气槽中,厌氧槽、缺氧槽和曝气槽的体积比为10:6.8:10,设计处理量为100 L/d。进入到净化槽中的污水依靠各区之间的位能差,形成自然流动。

1.2 试验水质

试验采用人工模拟生活污水^[12],其母液主要组分为:葡萄糖0.34 g/L;淀粉0.32 g/L;氯化铵0.051 g/L;蛋白胨0.316 g/L(TN \geq 13%);牛肉膏0.08 g/L(TN \geq 14%)硫酸铵0.0568 g/L;磷酸二氢0.14 g/L;碳酸钠0.12 g/L;乙酸钠0.233 g/L。所用试剂均为分析纯,进水采用母液稀释,母液COD质量浓度约为1 200 mg/L,控制 $\rho(\text{COD}):\rho(\text{TN}):\rho(\text{TP})=100:5:1$,每1 g COD加入1 mL微量元素。

1.3 反应器运行及控制

在反应器成功启动后,整个试验运行了120 d,室内温度为20~30℃,填料比为60%。反应器系统达到基本稳定后,进入正式试验阶段。分别考察不同条件下净化槽对生活污水中COD、TN和TP的处理效果,具体试验安排见表1。

表1 反应器运行条件

参数	t/h	$L/(g \cdot L^{-1} \cdot d^{-1})$	$R/\%$
条件1	4	0.9	25
条件2	8	1.8	50
条件3	12	2.7	75
条件4	16	3.6	100

1.4 数据处理

数据处理采用双因素方差分析(ANOVA)和LSD比较,试验结果均用平均值 \pm 标准偏差($n=3$)的形式展示,统计分析利用软件SPSS(17.0)完成。 $P > 0.05$ 表示差异不显著, $P < 0.05$ 表示差异显著, $P < 0.01$ 表示差异高度显著, $P < 0.001$ 表示差异极显著。

1.5 分析方法

COD浓度采用重铬酸钾滴定法测定,TN浓度采用碱性过硫酸钾氧化法测定,TP浓度采用钼锑抗分光光度法测定^[13],分析仪器为UV-2450紫外可见分光光度计(日本岛津公司),依据的评价标准为GB 18918—2002《城镇污水处理厂污染物排放标准》。

2 结果与讨论

2.1 HRT对净化槽处理效果的影响

由表2可见,相同的槽,HRT为4 h、8 h和12 h时COD的质量浓度均有极显著性差异($P < 0.001$),而HRT为16 h和12 h,COD的质量浓度无显著性差异($P > 0.05$);同一HRT,每个槽之间对COD的去除效果均存在极显著差异($P < 0.001$)。随着HRT增加,反应器对COD的去除率呈先上升、后降低的趋

表2 HRT对COD、TN和TP去除效果的影响

参数	装置区域	$t = 4\text{ h}$		$t = 8\text{ h}$		$t = 12\text{ h}$		$t = 16\text{ h}$	
		质量浓度/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	去除率/%						
COD	进水	600.02 Aa ± 4.02		612.89 Ba ± 2.84		608.67 Ca ± 2.15		588.33 Ca ± 3.41	
	厌氧槽	258.01 Ab ± 13.11	57	208.38 Bb ± 17.08	66	170.43 Cb ± 10.81	72	158.85 Cb ± 8.50	73
	缺氧槽	198.01 Ac ± 12.06	67	140.96 Bc ± 8.61	77	127.82 Cc ± 10.61	79	135.32 Cc ± 12.63	77
	曝气槽	90.00 Ad ± 8.62	85	79.68 Bd ± 4.81	87	73.04 Cd ± 6.69	88	76.48 Cd ± 4.69	87
	沉淀槽	72.00 Ae ± 1.95	88	30.65 Be ± 5.62	95	18.26 Ce ± 4.51	97	23.53 Ce ± 3.81	96
TN	进水	32.27 Aa ± 1.26		32.61 Ba ± 2.17		32.59 Ba ± 1.11		32.48 Ba ± 2.19	
	厌氧槽	27.97 Ab ± 5.47	13	26.27 Bb ± 6.14	19	25.87 Bb ± 4.48	21	25.76 Bb ± 5.39	21
	缺氧槽	22.87 Ac ± 3.28	29	18.41 Bc ± 1.52	44	17.55 Bc ± 4.50	46	17.41 Bc ± 4.41	46
	曝气槽	18.99 Ad ± 2.33	41	12.77 Bd ± 3.61	61	11.86 Bd ± 1.39	64	11.71 Bd ± 2.43	64
	沉淀槽	18.02 Ad ± 1.33	44	11.93 Bd ± 2.41	63	10.90 Bd ± 1.10	67	10.17 Bd ± 1.15	69
TP	进水	6.64 Aa ± 0.85		6.97 Ba ± 0.20		6.73 Ba ± 0.65		6.60 Ba ± 0.43	
	厌氧槽	3.74 Ab ± 1.08	44	2.83 Bb ± 0.59	59	2.62 Bb ± 0.51	61	2.93 ± 0.69Bb	56
	缺氧槽	2.94 Ac ± 0.65	56	1.78 Bc ± 0.68	74	1.57 Bc ± 0.44	77	1.96 Bc ± 0.57	70
	曝气槽	2.18 Ad ± 0.62	67	0.94 Bd ± 0.42	87	0.98 Bd ± 0.46	85	1.22 Bd ± 0.46	82
	沉淀槽	2.06 Ad ± 0.37	69	0.88 Bd ± 0.51	87	0.86 Bd ± 0.29	87	1.10 Bd ± 0.33	83

注:小写字母 a, b, c, d 表示相同的 HRT 不同的槽间存在的显著性差异 ($P < 0.05$);大写字母 A, B, C, D 表示相同的槽不同的 HRT 间存在的显著性差异 ($P < 0.05$)。

势, HRT 为 4 h 和 12 h 时, 去除率出现了最小值和最大值, 分别为 88%、97%。HRT 较短为 4 h 时, 水力负荷过大, 微生物未能充分降解水中的有机物, 导致出水质量浓度偏高 (72 mg/L); 而 HRT 过长为 16 h 时, 微生物因缺乏营养而脱落, 因而出水 COD 质量浓度略高。在相同槽内, HRT 为 4 h 和其他 HRT 对 TN 的去除效果均有极显著性差异 ($P < 0.001$), 而 HRT 为 8 h、12 h 和 16 h 时 TN 的质量浓度没有显著性差异 ($P > 0.05$)。当 HRT 超过 8 h 时, 净化槽对 TN 的去除率可达到 60% 以上。充分的停留时间可使污水与微生物充分接触, 利用系统中形成的好氧或缺氧环境, 发生硝化反硝化反应, 从而提高 TN 的去除率^[14-15]。当 HRT 超过 8 h 时, 净化槽对 TP 的去除率达到 80% 以上, 当 HRT 为 8 h 和 12 h 时, 系统出水 TP 质量浓度较低, 分别为 0.88 mg/L 和 0.86 mg/L。由于安装有微电解铁屑床, 净化槽对磷的去处作用主要由化学除磷和生物除磷共同作用完成, 选择合适的 HRT, 有利于找出聚磷菌和铁盐除磷的结合点, 提高除磷效果^[16-17]。

2.2 OLR 对净化槽处理效果的影响

从表 3 可看出, 在相同的槽内, COD、TN 的质量浓度不同, OLR 均存在显著性差异 ($P < 0.05$)。随着 OLR 的增高, 反应器对 COD 的净化效果略有升高, 但当 OLR 大于 2.7 g/(L·d) 时, 反应器对 COD 的去除效果有所下降, 过高的 OLR 超出了净化槽中微生物对有机物的净化能力, 使微生物无法及时消耗掉有机污染物, 造成处理效果变低^[18-19], 出水有机物浓度增大。但当 OLR 为 3.6 g/(L·d) 时, 仍然能保持一个较高的 COD 去除率 (85%), 表明净化槽对

OLR 的冲击亦具有良好的适应性。系统采用的厌氧 (缺氧)-好氧工艺, 可同时实现有机物和氮的脱除^[9], 有利于完成不同 OLR 下的除 COD 和脱氮的效能。随着 OLR 的增加, 每个槽 TN 的去除率呈递减趋势, 在 OLR 大于 2.7 g/(L·d) 时, 有机物浓度去除和脱氮效果仍然较佳, 较好地实现了同时去除有机物和脱氮的效果。当 OLR 大于 3.6 g/(L·d) 时, TN 去除率仅为 32%。可以看出 OLR 的过度增加, 对系统中硝化菌和反硝化菌的适应性亦会产生一定的影响。随着 OLR 的逐渐上升, TP 的去除率略呈上升趋势。其原因可能有两个方面: ①微生物对 TP 的吸收是一个耗能过程, 需要消耗有机物来提供能量, 所以有机物浓度直接影响了微生物除磷效率; ②进水 OLR 的上升, 为分解有机物提供了适合聚磷菌生存的微厌氧/好氧环境^[20-21], 从而增强了 TP 的去除效果。

2.3 回流比对合并净化槽运行的影响

表 4 显示, 在相同的槽内, COD、TN 和 TP 的质量浓度在回流比分别为 25%、50% 和 75% 之间均存在显著性差异 ($P < 0.05$), 而回流比为 75% 和 100% 时无显著性差异 ($P > 0.05$), 相同的回流比, COD 在进水、厌氧槽、缺氧槽和曝气槽之间存在极显著差异 ($P < 0.001$)。当回流比超过 75% 时, 回流比的变化对有机物的去除效果影响并不明显。提高回流比有利于合并净化槽一级厌氧槽对有机物的去除, 这大大降低了后续处理系统的负荷, 提高了有机物的去除率。在回流比的变化范围为 50% ~ 100% 时, 系统对 COD 的去除率均在 90% 以上, 相比回流比为 25% 时, 对 COD 的去除率有所提高。在回流比由 25% 增加到 100% 时, TN 去除率亦从 40% 提高到

表 3 OLR 对 COD、TN 和 TP 去除效果的影响

参数	装置区域	$L = 0.9 \text{ g}(\text{L} \cdot \text{d})$		$L = 1.8 \text{ g}(\text{L} \cdot \text{d})$		$L = 2.7 \text{ g}(\text{L} \cdot \text{d})$		$L = 3.6 \text{ g}(\text{L} \cdot \text{d})$	
		质量浓度/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	去除率/%						
COD	进水	289.67Aa ± 5.77		574.67Ba ± 20.53		873.67Ca ± 23.09		1192.00Ca ± 21.32	
	厌氧槽	125.67Ab ± 10.21	56	287.27Bb ± 8.60	50	454.31Cb ± 32.14	48	659.63Cb ± 30.85	45
	缺氧槽	89.77Ab ± 16.40	69	198.27b ± 25.46	65	331.99Cb ± 8.24	62	470.76Cb ± 13.80	61
	曝气槽	28.97Ac ± 10.52	90	68.47Bc ± 12.77	88	122.31Cc ± 7.76	86	228.40Cc ± 5.36	80
	沉淀槽	12.30Ac ± 8.20	95	46.43Bc ± 10.37	92	87.37Cc ± 14.33	90	178.80Cc ± 12.26	85
TN	进水	32.79Aa ± 3.12		33.31Ba ± 2.20		32.69Ca ± 2.36		32.87Da ± 4.33	
	厌氧槽	31.91Ab ± 2.08	3	30.29Bb ± 3.13	9	27.71Cb ± 1.16	15	27.36Db ± 5.23	17
	缺氧槽	25.73Ac ± 5.29	22	20.37Bc ± 4.26	39	17.15Cc ± 2.11	48	15.70Dc ± 2.24	52
	曝气槽	22.59Ad ± 4.22	31	13.10Bd ± 1.07	61	9.48Cd ± 2.10	71	8.47Dd ± 1.28	74
	沉淀槽	22.39Ad ± 5.08	32	12.20Bd ± 3.20	63	8.50Cd ± 3.23	74	7.77Dd ± 1.19	76
TP	进水	6.70Aa ± 0.34		6.89Ba ± 0.30		6.92Ba ± 0.50		6.74Ba ± 0.25	
	厌氧槽	3.08Ab ± 0.19	54	3.03Bb ± 0.90	56	2.72Bb ± 0.21	61	2.54Bb ± 0.80	62
	缺氧槽	2.26Ac ± 0.07	66	2.00Bc ± 0.38	71	1.77Bc ± 0.40	74	1.64Bc ± 0.65	75
	曝气槽	1.35Ad ± 0.29	80	1.14Bd ± 0.29	83	0.94Bd ± 0.42	86	0.88Bd ± 0.52	87
	沉淀槽	1.30Ad ± 0.54	81	0.99Bd ± 0.41	85	0.82Bd ± 0.39	88	0.88Bd ± 0.70	87

注:小写字母 a、b、c、d 表示相同的 HRT 不同的槽间存在的显著性差异 ($P < 0.05$);大写字母 A、B、C、D 表示相同的槽不同的 HRT 间存在的显著性差异 ($P < 0.05$)。

表 4 R 对 COD、TN 和 TP 去除效果的影响

参数	装置区域	$R = 25\%$		$R = 50\%$		$R = 75\%$		$R = 100\%$	
		质量浓度/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	去除率/%						
COD	进水	598.03Aa ± 3.35		610.31Ba ± 7.9		604.13Ca ± 6.40		602.07Ca ± 7.10	
	厌氧槽	382.74Ab ± 14.52	36	262.43Bb ± 8.1	57	205.40Cb ± 0.60	66	192.66Cb ± 9.92	68
	缺氧槽	245.19Ac ± 7.69	59	183.09Bc ± 9.25	70	144.99Cc ± 5.60	76	138.48Cc ± 3.97	77
	曝气槽	113.63Ad ± 1.68	81	85.44 Bd ± 7.10	86	60.41Cd ± 4.78	90	66.23Cd ± 6.18	89
	沉淀槽	89.70Ae ± 3.85	85	54.93Be ± 2.57	91	30.21Ce ± 0.26	95	30.10Ce ± 4.41	95
TN	进水	32.33Aa ± 1.04		31.92Ba ± 1.75		32.01Ca ± 1.31		32.21Ca ± 1.24	
	厌氧槽	22.87Ab ± 3.43	29	21.09Bb ± 0.74	34	14.39Cb ± 1.42	55	14.04Cb ± 4.57	56
	缺氧槽	21.74Ac ± 1.26	33	20.12Bc ± 5.54	37	13.26Cc ± 2.67	59	12.59Cc ± 2.38	61
	曝气槽	19.81Ad ± 3.32	39	18.01Bd ± 2.55	44	10.98Cd ± 5.81	66	9.69Cd ± 2.63	70
	沉淀槽	19.30Ad ± 0.38	40	17.48Bd ± 1.17	45	9.61Cd ± 1.34	70	9.22Cd ± 1.61	71
TP	进水	6.79Aa ± 0.77		7.08Ba ± 1.20		6.82Ba ± 1.19		6.73Ba ± 0.86	
	厌氧槽	3.96Ab ± 0.93	42	3.22Bb ± 0.32	54	2.94Bb ± 1.12	57	2.83Bb ± 0.38	58
	缺氧槽	3.32Ac ± 0.97	51	2.26Bc ± 0.76	68	1.91Bc ± 0.16	72	1.73Bc ± 0.19	74
	曝气槽	2.17Ad ± 0.26	68	0.88Bd ± 0.29	88	0.54Bd ± 0.10	92	0.83Bd ± 0.29	88
	沉淀槽	1.94Ad ± 0.40	71	0.73Bd ± 0.19	90	0.43Bd ± 0.21	94	0.76Bd ± 0.16	89

注:小写字母 a、b、c、d 表示相同的 HRT 不同的槽间存在的显著性差异 ($P < 0.05$);大写字母 A、B、C、D 表示相同的槽不同的 HRT 间存在的显著性差异 ($P < 0.05$)。

71%,由此可知,回流比对 TN 的去除有较大的影响,当回流比过小,致使污泥浓度低和微生物水量少,TN 降解率下降。因此,系统的污泥浓度不能太低,即回流比不能太小。污泥的回流是为了维持系统里微生物的量,保证系统具有良好的脱氮效果。有研究^[22-23]表明,增大污泥回流比有利于系统的反硝化效果。污泥回流比增大,TP 的去除率也随之增大,然后小幅降低,这说明适宜的污泥回流比有利于 TP 的去除,但随污泥回流比的再增大,TP 去除率逐渐减小,因为回流污泥中含有 NO_3^- -N,在厌氧状态下水中存在 NO_3^- -N,反硝化菌产生反硝化将与聚磷菌竞争易降解的低分子脂肪酸,而反硝化菌的竞争

能力远远大于聚磷菌, NO_3^- -N 会抑制厌氧池中聚磷菌厌氧状态下磷的释放,甚至会使聚磷菌停止放磷^[24],因此,随着污泥回流比增大,TP 的去除率逐渐减小,为了保证系统有较好除磷效果,污泥回流比不宜过大,在 75%较适宜。

3 结论

a. HRT 对有机物的去除有较大影响,而对 TN、TP 的影响较小。本试验条件下确定工艺的最佳的 HRT 为 8 h,此时 COD、TN 和 TP 的去除率分别为 95%、63%和 87%。

b. 系统对有机负荷具有较强的抗冲击能力,在

OLR为 2.7 g/(L·d)时,出水 COD、TN 和 TP 平均质量浓度分别为 87.37 mg/L、8.50 mg/L 和 0.82 mg/L,平均去除率分别达到 90%、74% 和 88%。当进水 OLR 为 2.7 g/(L·d)时,出水 COD 已无法达到国家生活污水排放标准。

c. 回流比的变化对系统去除 COD 没有明显影响,但对 TN 和 TP 的去除有较大的影响。回流比为 75% 有利于实现 3 类污染物最佳的去除效果,此时净化槽出水 COD、TN 和 TP 平均质量浓度分别为 30.21 mg/L、9.61 mg/L 和 0.43 mg/L,平均去除率分别达到 95%、70% 和 94%。

d. 从显著性分析可以看出,合并净化槽每个槽对 COD、TN 和 TP 均有一定作用,其中厌氧槽对于有机物去除效果影响最大。相对于传统的净化槽,改进后的合并净化解了除磷效果不好的问题,并且强化了有机物和氮的去除效果。

参考文献:

[1] 嵇欣. 国外农村生活污水分散治理管理经验的启示 [J]. 中国环保产业, 2010, (5) : 57-61.

[2] 吴光前, 孙新元, 张齐生. 净化槽技术在中国农村污水分散处理中的应用 [J]. 环境科技, 2010, 23(6) : 36-40.

[3] WEN Yi-bo. Development suited to china 's national conditions of urban sewage treatment technology [J]. Environmental Protection, 1997, (3) : 37-41.

[4] 田娜, 朱亮, 张志毅, 等. 高效生活污水处理装置: 高性能合并处理净化槽 [J]. 环境污染治理技术与设备, 2004, (5) : 84-86.

[5] 陈男, 冯颖, 冯传平. 电絮凝法去除合并净化槽出水中的磷 [J]. 环境科学与技术, 2008, 31(9) : 103-120.

[6] 刘呈波, 樊娟, 石静, 等. 净化槽在农村生活污水处理中的应用前景分析 [J]. 环境整治, 2007, (2) : 68-69.

[7] 冯欣, 赵军, 郎咸明, 等. 净化槽技术在我国农村污水处理中的应用前景 [J]. 安徽农业科学, 2011, 39(7) : 4165-4166.

[8] WANG Xiao-lian, PENG Yong-zhen, WANG Shu-ying, et al. Influent of wastewater composition on nitrogen and phosphorus removal and process control in A²/O process [J]. Bioprocess Biosystem Engineering, 2006, 28(6) : 397-404.

[9] WU Chang-yang, CHEN Zhi-qiang, LIU Xiu-hong, et al. Nitrification-denitrification via nitrite in SBR using real-time control strategy when treating domestic wastewater [J]. Biochem Engineering Journal, 2007, 33(2) : 87-92.

[10] FENG Chuan-ping, SUGIURA N, SHIMADAS, et al. Development of a high performance electrochemical wastewater treatment system [J]. Journal of Hazardous Materials, 2003, 103

(1/2) : 65-78.

[11] FAN Jie, TAO Tao, ZHANG Jing, et al. Performance evaluation of a modified anaerobic/anoxic/oxic (A²/O) process treating low strength wastewater [J]. Desalination, 2009, 249(2) : 822-827.

[12] 崔丽, 张贤光, 胡筱敏. 多功能混合菌剂处理模拟生活污水研究 [J]. 安全与环境学报, 2007, (6) : 50-53.

[13] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法编委会. 水和废水监测分析方法 [M]. 4 版. 北京: 中国环境科学出版社, 2002: 563-568.

[14] YU Jian-heng, ZHOU Shao-qi, WANG Wei-feng. Combined treatment of domestic wastewater with landfill leachate by using A²/O process [J]. Journal of Hazardous Materials, 2010, 178(1/2/3) : 81-88.

[15] ZHANG Dai-jun, LIU Pei-li, LONG Teng-rui, et al. The integration of methanogenesis with simultaneous nitrification and denitrification in a membrane bioreactor [J]. Process Biochemistry, 2005, 40(2) : 541-547.

[16] 陈敏, 程刚, 李艳, 等. 微电解法处理磷化废水的试验研究 [J]. 环境科学与管理, 2006, 31(6) : 100-102.

[17] 温沁雪, 王官胜, 陈志强, 等. 聚合铝铁强化 A²/O 系统脱氮除磷研究 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2010, 42(6) : 945-948.

[18] HYUNG S L, SE J P, TAI L Y. Wastewater treatment in a hybrid biological reactor using powdered minerals: effects of organic loading rates on COD removal and nitrification [J]. Process Biochemistry, 2002, 38(1) : 81-88.

[19] MICHAEL G B, VASANTHA N. Industrial wastewater bioreactors: sources of novel microorganisms for biotechnology [J]. Trends in Biotechnology, 2000, 18(2) : 501-505.

[20] DONG Bin, LIANG Ya, ZHOU Zeng-yan, et al. Influence of high organic load on nitrogen and phosphorus removal in an activated sludge-biofilm combined system [J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2006, 34(8) : 1066-1069.

[21] AHMEDA Z, LIM B R, SONG K G, et al. Biological nitrogen and phosphorus removal and changes in microbial community structure in a membrane bioreactor effect of different carbon source [J]. Water Research, 2008, 42(1/2) : 198-210.

[22] 杨晓南, 赫俊国, 欧阳锋, 等. 污泥回流比对复合式生物膜-活性污泥工艺的影响研究 [J]. 现代化工, 2006, 26(2) : 215-218.

[23] 李银波, 周少奇, 邱育真, 等. 回流比对投料 A²/O 工艺脱氮除磷影响的中试研究 [J]. 环境科学与技术, 2010, 33(2) : 142-145.

[24] 张学洪, 李金成, 刘荃. A²/O 工艺生物除磷的运行实践 [J]. 给水排水, 2000, 26(4) : 14-17.

(收稿日期: 2011-11-07 编辑: 徐娟)