

新型高效反应器组合系统处理奶牛养殖场 废水试验研究

王艳芹, 刘兆辉*, 边文范, 袁长波, 姚利, 张昌爱, 李国生

(山东省农业科学院农业资源与环境研究所, 济南 250100)

摘 要:选择一种新型高效反应器系统对奶牛养殖场废水进行处理试验研究,这种反应器系统主要包括两级组合生物巢厌氧反应器和砂式沼液处理池。试验结果表明,该系统处理奶牛养殖废水速度快,两级组合生物巢厌氧反应器水力停留时间(HRT)仅为 15 h, 处理效率高, 砂式沼液处理池结构简单, 对生物巢厌氧反应器出水处理效果好。该新型高效反应器组合系统对化学需氧量(COD)、生化需氧量(BOD)、氨氮(NH₃-N)和总固体悬浮物(TSS)的平均去除率分别为 97.6 %、98.2 %、81.3 %和 98.1 %,出水体积质量平均值分别为 89.0、27.1、15.7 mg·L⁻¹ 和 64.9 mg·L⁻¹, 满足国家二级排放标准。

关键词:奶牛养殖场;废水;高效系统;两级组合生物巢厌氧反应器;砂式沼液处理池

中图分类号:X703.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2011)06-1229-07

The Dairy Farm Wastewater Treatment with New Efficient Reactor System

WANG Yan-qin, LIU Zhao-hui*, BIAN Wen-fan, YUAN Chang-bo, YAO Li, ZHANG Chang-ai, LI Guo-sheng

(Institute of Agricultural Resource and Environment, Shandong Academy of Agricultural Sciences, Jinan 250100, China)

Abstract: With the rapid development of current dairy cow cultivation, a large number of manure were produced, which had caused environmental pollution. A new efficient reactor system had been used for treating dairy farm wastewater. The system was mainly formed of two anaerobic bio-nest reactors. One was bio-nest reactor; the other was sand-type reactor. Anaerobic bio-nest reactor was a kind of new efficient anaerobic reactor by biological nest material as a carrier. The biological nest material is a number of long spiral band structure cut by the black PVC pipe, width of 1.5 cm, thickness of 0.15~0.21 mm, surface area of 2 800~3 000 m²·m⁻³, conducive to the adsorption and growth of bacteria. At the same time, due to the little difference of the proportion of the material with water, the material would automatically float with the water in the anaerobic reactor, which increased the contact with the wastewater and elevate efficiency. Sand-type was a kind of new slurry handling equipment by substrate and microbial synergy through physical, chemical and biological role, with different particle size yellow sand as a substrate handling slurry, hydraulic loading 0.04 m²·m⁻²·d⁻¹. Test results indicated that: The HRT of the system was 15 h; the removal rates of COD, BOD, NH₃-N and TSS were 97.6%, 98.2%, 81.3% and 98.1% respectively. The final discharge concentrations were 89.0, 27.1, 15.7 and 64.9 mg·L⁻¹ respectively, which satisfy the second level of National Discharge Standard. The system was suitable for promotion and use in the dairy farms.

Keywords: dairy farm; wastewater; efficient system; bio-nest reactor; sand-type pond

随着人们生活水平的提高,牛奶产品需求量也不断增加,近年来,我国奶牛养殖业蓬勃发展^[1]。2007 年上半年全国奶牛存栏数已达到 1 429 万头^[2],按照每

头成年奶牛日排粪量为 25 kg、排尿量为 30 kg^[3]计算,全国奶牛养殖场每年废弃物排放量近 8 万 t。大量粪水随意排放,严重污染了养殖场周边环境及地下水,威胁着奶牛场附近居民的身体健康^[4-6]。

近年来,养殖场废弃物厌氧处理工艺发展十分迅速^[7],各种新工艺、新方法不断出现,如完全混合式厌氧反应器(CSTR)^[8]、升流式固体反应器(USR)、上流式厌氧污泥床反应器(UASB)^[9]和内循环厌氧反

收稿日期:2010-11-30

基金项目:农业部 948 项目(2008-Z34)

作者简介:王艳芹(1978—),女,山东潍坊人,硕士研究生,主要从事养殖场废水及农村废弃物处理技术研究。

E-mail: wangyanqin2003@126.com

* 通讯作者:刘兆辉 E-mail: liuzhaohui6666@sina.com

反应器(IC)^[10]等,也取得了卓越的成效。但目前,国内养殖场废水处理主要采用的是完全混合式厌氧反应器、上流式厌氧污泥床及升流式固体反应器工艺^[11]。

研究表明,要想得到较高的厌氧消化率,必须依靠较长的 SRT^[12]。完全混合式厌氧反应器是在传统消化池的基础上增加了搅拌和加热装置,提高了传质效果与微生物活性,具有完全混合的流态,但其SRT(污泥停留时间)=HRT(水力停留时间),无法分离水力停留时间和固体停留时间,不能滞留微生物;效率仍然较低,消化池体积大。

上流式厌氧污泥床反应器有机负荷高,水力停留时间一般为 0.5~2 d,中温发酵,容积负荷一般为 8~15 kgCOD·m⁻³·d⁻¹,其 SRT>HRT,用于可溶性废水,如豆制品废水、柠檬酸废水等效果良好。但该反应器进水中悬浮物需要适当控制,不宜过高,一般控制在 1 000 mg·L⁻¹ 以下,高 SS 原料则因不能形成污泥床效率低并且工艺运转故障较多^[13]。

升流式固体反应器工艺进水 TS 要求为 3%~5%,水力停留时间一般较长,为 8~15 d,COD 负荷为 5~10 kg·m⁻³·d⁻¹^[12],因反应时间长故反应器容积较大,随之占地面积大,投资增加。

厌氧膜生物反应器是厌氧处理技术和膜技术有效结合的污水处理工艺,国外研究非常活跃,而国内研究则刚刚起步^[14],目前国内常用的有厌氧滤池(AF)等,具有微生物以附着膜形式存在,停留时间短,耐冲击负荷能力强,有机负荷高等优点。但目前国内常用的填料容易发生堵塞,特别是在其底部,同时使用大量填料增加成本^[15]。

生物巢厌氧反应器是一种以生物巢材料作为载体的新型高效厌氧反应器,该生物巢是由黑色硬质 PVC 管棒削制成的多个拱形结构构成的长螺旋带状结构,宽 1.5 cm,厚 0.15~0.21 mm;表面积 2 800~3 000 m²·m⁻³,有利于菌群的吸附及生长^[16];同时因该材料比重和水相差不大,随进水在厌氧反应器内会自动漂浮,增加了与废水的接触,提高了效率。本试验采用一种新型高效反应器组合系统处理奶牛养殖场废水。研究该系统对奶牛养殖场废水的处理效果,旨在为该系统的推广应用奠定基础。

1 材料与方法

1.1 试验进水水质

本试验主要在实验室进行,试验运行时间为2009年6月—2009年12月,进水取自山东省农业科学院

畜牧兽医研究所奶牛场,目前有 300 头奶牛,采用干清粪方式处理粪便。试验期间进水的组成和主要水质指标见表 1、表 2。

1.2 试验装置设计

挤奶厅冲洗水在集水池沉淀后进入调节池,通过蠕动泵进入反应器 R1,反应器 R1 和 R2 通过管道连接,经厌氧发酵的沼液流入沼液池,再通过泵进入砂式沼液处理池,由水量控制开关和继电器控制进水水量和进水次数。试验装置如图 1 所示。

两级组合生物巢厌氧反应器内部设两层生物巢材料作为微生物载体,砂式沼液处理池上层铺有粒径为 1.5~2.5 cm 的卵石,水管设在卵石间,使沼液进水布水均匀,下层铺有卵石以方便排水,中间 3 层为不同粒径砂层,自上而下由粗到细,各层不均匀系数小于 4.0。水力负荷严格控制为 0.04 m²·m⁻²·d⁻¹,使沼液不会堵塞砂式沼液处理池。

1.3 装置的启动及运行

生物巢厌氧反应器启动时间需要 2 周,40 d 系统运行稳定,砂式沼液处理池稳定运行需 10 d。本试验稳定运行时间从 2009 年 6 月 1 日至 2009 年 12 月 31 日,共 210 d,为了更好地验证该厌氧反应器处理奶牛场废水的处理效果,试验期间废水取自奶牛场实际废水,反应器进水指标一直变化。

本试验装置置于室内,温度值在整个试验期间略有不同,冬季因室内温度较低,采用保温措施:8 月 1 日至 10 月 29 日为 18~30 ℃,10 月 30 日至 11 月 11 日为 16~26 ℃,11 月 12 日至 12 月 31 日采用保温措施,温度为 20~26 ℃。

表 1 试验期间进水组成

Table 1 Water composition of influent wastewater

奶牛场废水来源	每天冲刷次数	温度/℃	废水主要组成
奶罐冲洗水	2	60	牛奶
地面冲洗水	2	25	牛粪、尿、奶
奶牛活动场牛尿冲洗水	2	25	牛粪、尿
混合水样		16~30	牛粪、尿、奶

表 2 试验期间进水水质

Table 2 Water quality of influent wastewater

指标	单位	进水指标范围
pH	—	7.22~7.40
化学需氧量(COD)	mg·L ⁻¹	2 048~12 828
生化需氧量(BOD)	mg·L ⁻¹	685~2 663
氨氮(NH ₃ -N)	mg·L ⁻¹	59.5~138
总磷(TP)	mg·L ⁻¹	90~216
总固体悬浮物(TSS)	mg·L ⁻¹	1 192~7 823

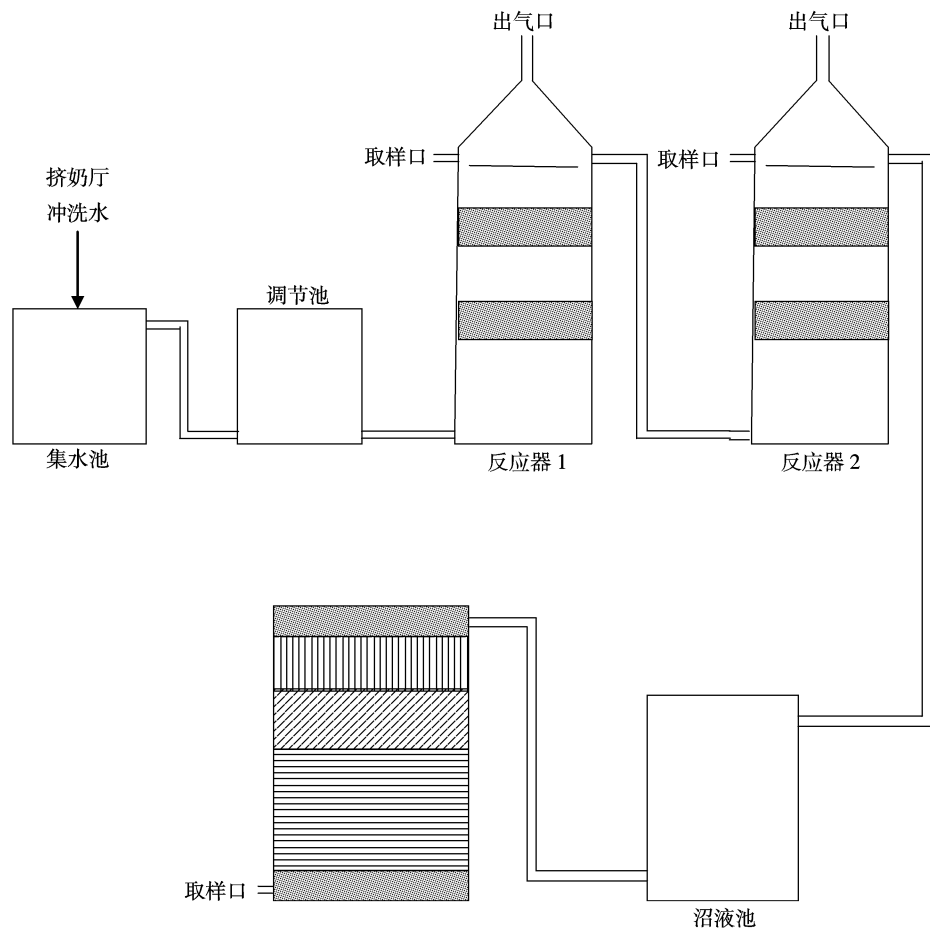


图 1 废水处理试验装置图
Figure 1 Experiment equipment

1.4 检测项目及方法

检测项目及方法见表 3。试验运行期间,每 2~4 d 取水样 1 次,每次取 300 mL,每个指标重复 3 次测定。

2 结果与讨论

2.1 有机物的去除

试验期间,整个系统运行稳定,进水、生物巢厌氧反应器出水和砂式沼液处理池出水的化学需氧量(COD)和生化需氧量(BOD)体积质量随时间变化如表 4 和图 2~图 4 所示,COD 的最终平均去除率为 97.6%,BOD 的最终平均去除率为 98.2%。

奶牛场废水先经过两级组合生物巢厌氧反应器,去除其中大部分有机物。在两级组合生物巢厌氧反应器水力停留时间为 15 h,反应器 R1 的化学需氧量负荷在 6.55~41.04 g·L⁻¹·d⁻¹ 范围内时,COD 由平均进水体积质量 5 259.5 mg·L⁻¹ 降至 1 003 mg·L⁻¹,去除率为 80.9%,而 BOD 由平均进水体积质量 1 705.7

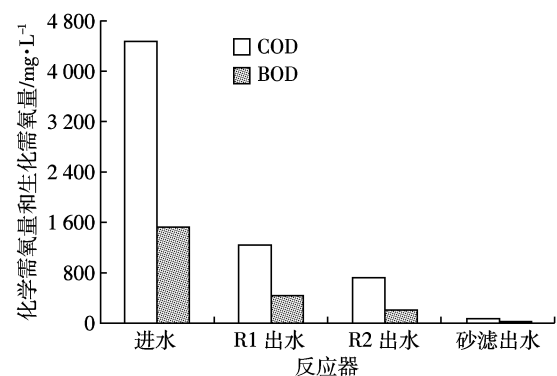
表 3 试验测定项目及方法

Table 3 Parameters and methods of experiment	
检测项目	检测方法
pH 值	台式 pH 计(PHS-3C 型)
沼气产量	湿式气体流量计(LMF-2)
沼气中甲烷含量	气相色谱仪(岛津 2100)
化学需氧量(COD)	COD 测定仪(DR/1010)
生化需氧量(BOD)	美国哈希 BOD 测定仪(BODTrakTM)
氨氮(NH ₃ -N)	纳氏试剂比色法
总磷(TP)	钼酸铵分光光度法
总固体悬浮物(TSS)	不可滤残渣烘干法
温度	温度计(TES-1319)

mg·L⁻¹ 降至 281 mg·L⁻¹,去除率为 83.5%,可见该两级组合生物巢厌氧反应器在非常短的水力停留时间下,能达到有机物的高去除效率。分析认为,一方面在于厌氧反应装置内设置两层生物巢材料作为微生物载体,大大提高了产甲烷菌的活性,提高了污泥的停留时间,另一方面在于生物巢材料特殊的结构,多个拱

表 4 试验期间新型高效处理系统总平均去除率
Table 4 Average removal efficiency of the new high efficiency system

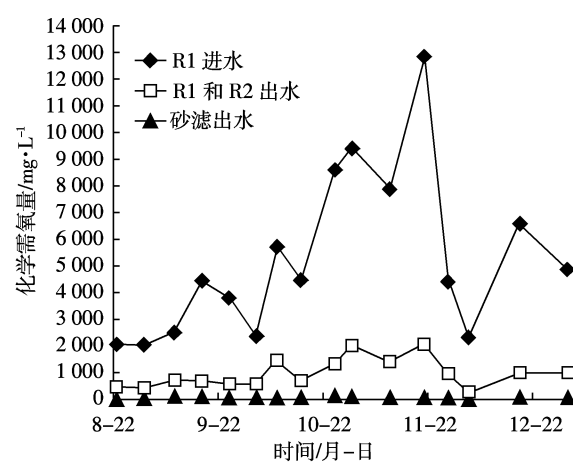
项目	进水浓度/mg·L ⁻¹		出水浓度/mg·L ⁻¹		去除率/%	
	平均值	标准偏差	平均值	标准偏差	平均值	标准偏差
化学需氧量(COD)	5 259.5	2 995.7	89.0	24.6	97.6	0.9
生化需氧量(BOD)	1 705.7	629.0	27.1	5.5	98.2	0.7
氨氮(NH ₃ -N)	88.9	22.5	15.7	2.4	81.3	6.0
总磷(TP)	130.1	37.0	18.3	5.0	85.7	2.2
总固体悬浮物(TSS)	3 233.0	1 972.0	64.9	45.3	98.1	0.8



(两级组合生物巢厌氧反应器水力停留时间为 15 h,
反应器 R1 的 COD 负荷为 14.3 g·L⁻¹·d⁻¹)
(Two anaerobic bio-nest reactor HRT 15 hours,
at COD loading rate 14.3 g·L⁻¹·d⁻¹ of R1)

图 2 不同阶段进水及出水 COD 和 BOD 值

Figure 2 Influent and effluent COD and BOD in different stages



(两级组合生物巢厌氧反应器水力停留时间为 15 h,
反应器 R1 的 COD 负荷为 6.55~41.04 g·L⁻¹·d⁻¹)
(Two anaerobic bio-nest reactor HRT 15 hours,
at COD loading rate 6.55~41.04 g·L⁻¹·d⁻¹ of R1)

图 3 试验期间进水和出水 COD 变化

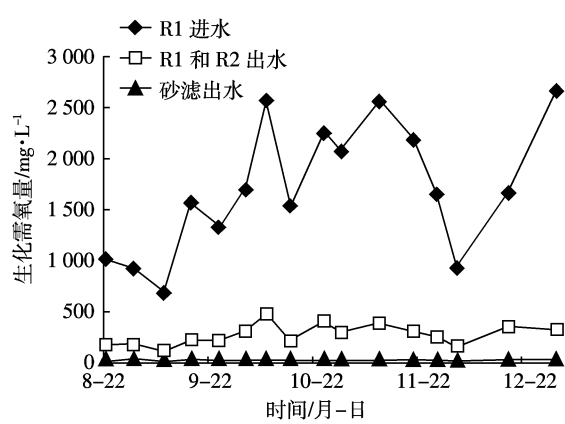
Figure 3 Influent and effluent COD in different stages

形结构构成的长螺旋带状结构,具有很大的比表面积2 800~3 000 m²·m⁻³,可以富集大量微生物。因此,该

两级组合生物巢厌氧反应器可达到对水中有机物的高效去除。

砂式沼液处理池对两级组合生物巢厌氧反应器出水的净化主要是通过砂滤料的机械截流作用和砂粒表面生物膜的接触絮凝、生物氧化作用去除沼液中的有机物。沼液经过该系统后,出水体积质量 COD 由 1 003 mg·L⁻¹ 降至 89 mg·L⁻¹,BOD 由 281 mg·L⁻¹ 降至 27.1 mg·L⁻¹,COD 和 BOD 去除率分别达到 91.1%和 90.4%,出水可以达到污水排放二级标准,可有效解决当前国内普遍存在的大多数沼气工程沼液无法消纳造成的二次污染问题。

图 2 是反应器 R1 COD 负荷为 14.3 g·L⁻¹·d⁻¹ 时,该反应器组合系统各阶段进水和出水的 COD、BOD 变化情况。可以看出,奶牛养殖场废水经两级组合生物巢厌氧反应器 R1 后,COD 由 4 460 mg·L⁻¹ 降至 1 238 mg·L⁻¹,然后经 R2,COD 由 1 238 mg·L⁻¹ 降至 726 mg·L⁻¹,最后经砂式沼液处理池,COD 由 726 mg·L⁻¹ 降至 83 mg·L⁻¹,厌氧反应器 R1、R2 和砂式沼液处理池对奶



(两级组合生物巢厌氧反应器水力停留时间为 15 h,
反应器 R1 的 COD 负荷为 6.55~41.04 g·L⁻¹·d⁻¹)
(Two anaerobic bio-nest reactor HRT 15 hours,
at COD loading rate 6.55~41.04 g·L⁻¹·d⁻¹ of R1)

图 4 试验期间进水和出水 BOD 变化

Figure 4 Influent and effluent BOD in different stages

牛养殖场废水 COD 的去除率分别为 72.2%、41.4%和 88.6%。同样, BOD 由 $1\,532\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 降至 $631\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 然后降至 $212\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 最后降至 $29\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 厌氧反应器 R1、R2 和砂式沼液处理池对奶牛养殖场废水 BOD 的去除率分别为 71.9%、50.8%和 86.3%。两级组合生物巢厌氧反应器 R1 对 COD 和 BOD 的去除效率明显高于 R2, 与本文 pH 值部分分析相对应, 在此厌氧发酵反应过程中, 反应器 R1 占主导地位, 反应器 R2 主要起到辅助厌氧发酵的作用。

2.2 氨氮($\text{NH}_3\text{-N}$)的去除

如表 4 和图 5 所示, 试验期间, 奶牛养殖场废水处理系统进水和出水氨氮($\text{NH}_3\text{-N}$)的体积质量平均值分别为 $88.9\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $15.7\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 去除率为 81.3%。

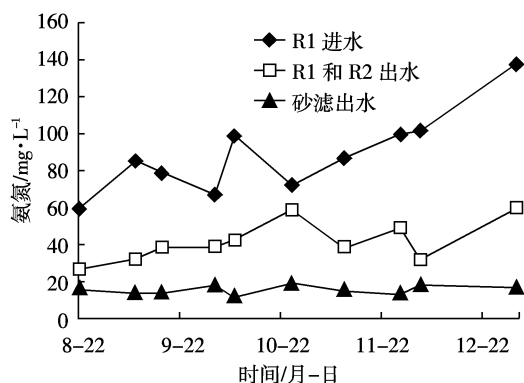
奶牛养殖场废水经两级组合生物巢厌氧反应器后, 氨氮($\text{NH}_3\text{-N}$)的平均进水体积质量由 $88.9\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 降至 $41.7\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 去除率为 53.1%, 测得试验期间两级组合生物巢厌氧反应器中溶解氧(DO)的变化如图 6 所示, 分析两级组合生物巢厌氧反应器能去除部分氨氮的原因为, 一方面是系统中的溶解氧范围在 $0.18\sim 0.6\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间, 当溶解氧在 $0.5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 左右时, 系统中硝化细菌具有一定的活性, 可以进行硝化反应以去除氨氮^[17], 而厌氧反应器的溶解氧变化或稍微升高对厌氧反应器处理效果影响甚微^[18]。另一方面可能是部分氨氮进入到沼渣中, 未随出水排出。

砂式沼液处理池对氨氮的平均去除率为 62.4%, 在废水进入砂式沼液处理池的过程中, 废水中微生物会附着在砂粒上, 靠自身分泌的胶体黏液留在砂粒表

面^[19], 微生物在砂粒较粗糙的表面上形成生物膜, 微生物膜之间存在着生物絮体, 使砂式沼液处理池具有较强的接触絮凝和生物氧化作用, 通过生物氧化作用去除部分氨氮。另外在砂层区域形成缺氧、好氧的微环境, 氨氮在好氧微环境中被硝化菌氧化为亚硝酸盐氮和硝酸盐氮, 硝酸盐氮在反硝化菌的作用下被转化为 NO 、 N_2 而被去除^[20]。

2.3 总磷(TP)的去除

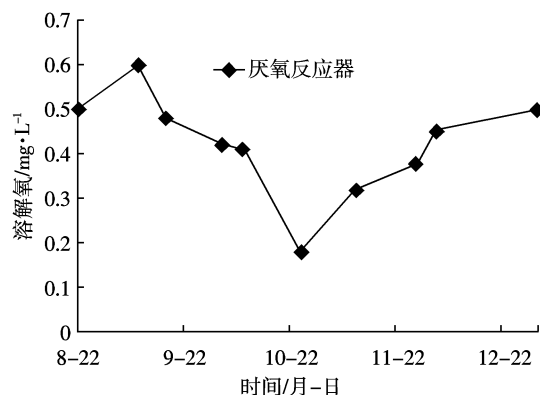
如表 4 和图 7 所示, 试验期间奶牛养殖场废水处理系统进水总磷体积质量平均为 $130.15\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 出水总磷体积质量平均为 $18.3\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 去除率为 85.7%。废水中的磷主要来自于奶牛粪尿^[21]、挤奶厅冲洗水洗涤剂, 主要以溶解态和颗粒态存在。两级组合生物巢厌氧反应器对总磷的平均去除率为 41.7%, 在厌氧反应过程中, 由于微生物的代谢作用, 导致微环境发生变化, 使得废水中的部分溶解性磷酸盐化学性地沉积于污泥上而从废水中除去, 即生物具有诱导化学沉淀的辅助作用^[22]。厌氧反应器出水总磷体积质量平均为 $75.9\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 经砂式沼液处理池后降低至 $18.3\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 去除率为 75.9%, 砂式沼液处理池对磷的去除主要包括微生物的生物化学作用以及砂粒基质的吸附^[23]、络合和沉淀作用^[24]。在沼液进入砂式沼液处理池的过程中, 与处理池中的砂石直接接触, 废水中的可溶性磷酸盐与砂石中的金属离子等发生吸附和沉淀反应, 生成难溶性磷酸盐而固定下来, 从而达到去除磷的目的。因砂式沼液处理池建于室外, 平时下雨会对砂石有一定的冲刷, 起到一定的清洗功能, 砂式沼液处理池使用 2 年后, 应进行人工维护, 以防止堵塞。奶牛养



(两级组合生物巢厌氧反应器水力停留时间为 15 h, 反应器 R1 的 COD 负荷为 $6.55\sim 41.04\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$)
(Two anaerobic bio-nest reactor HRT 15 hours, at COD loading rate $6.55\sim 41.04\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$ of R1)

图 5 试验期间进水和出水 $\text{NH}_3\text{-N}$ 变化

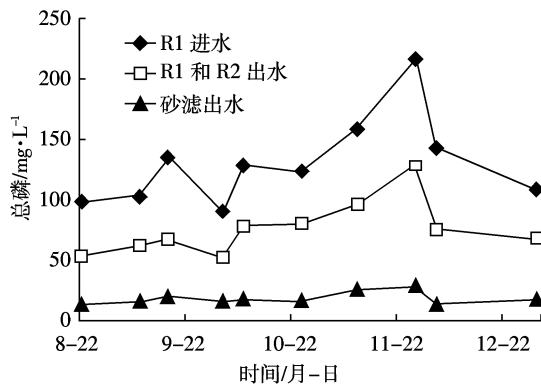
Figure 5 Influent and effluent $\text{NH}_3\text{-N}$ in different stages



(两级组合生物巢厌氧反应器水力停留时间为 15 h, 反应器 R1 的 COD 负荷为 $6.55\sim 41.04\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$)
(Two anaerobic bio-nest reactor HRT 15 hours, at COD loading rate $6.55\sim 41.04\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$ of R1)

图 6 试验期间进水和出水 DO 变化

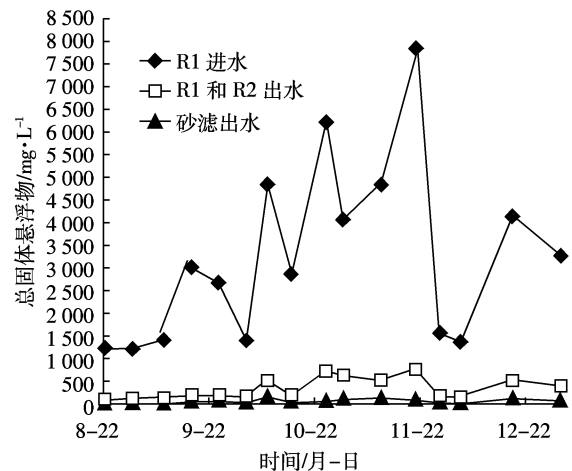
Figure 6 Influent and effluent DO in different stages



(两级组合生物巢厌氧反应器水力停留时间为15 h,
反应器 R1 的 COD 负荷为 $6.55\sim 41.04 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$)
(Two anaerobic bio-nest reactor HRT 15 hours,
at COD loading rate $6.55\sim 41.04 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$ of R1)

图7 试验期间进水和出水 TP 变化

Figure 7 Influent and effluent TP in different stages



(两级组合生物巢厌氧反应器水力停留时间为15 h,
反应器 R1 的 COD 负荷为 $6.55\sim 41.04 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$)
(Two anaerobic bio-nest reactor HRT 15 hours,
at COD loading rate $6.55\sim 41.04 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$ of R1)

图8 试验期间进水和出水 TSS 变化

Figure 8 Influent and effluent TSS in different stages

殖场废水经过该系统后出水 TP 不能达到排放标准,还有待进一步试验研究。

2.4 总固体悬浮物(TSS)的去除

试验期间,奶牛养殖场废水处理系统对废水中总固体悬浮物(TSS)有着非常好的去除效果,去除率达到 98.1%,该系统进水、两级组合生物巢厌氧反应器出水和砂式沼液处理池出水的总固体悬浮物(TSS)的变化情况如图 8 所示。生物巢厌氧反应器对 TSS 有很好的吸附和截留作用^[25],因水力停留时间(HRT)短、水流快,废水在生物巢厌氧反应器中与生物巢材料表面形成的生物膜充分接触^[16],大量悬浮物被有效去除,去除率达到 89.4%,砂式沼液处理池对 TSS 的去除率为 81.2%,其主要是依靠被微生物膜覆盖的滤料表面对 TSS 进行吸附和截留^[26],进而通过微生物氧化和胞外酶降解吸附有机物^[27]。

3 结论

(1)新型高效奶牛养殖场废水处理系统是一种针对养殖场废水处理设计的处理效率高、污染物去除效果好的系统,由两级组合生物巢厌氧反应器和砂式沼液处理池组合而成,适合于处理大中小型养殖场废水处理。

(2)该系统处理奶牛养殖废水速度快,两级组合生物巢厌氧反应器以生物巢材料作为载体,水力停留时间(HRT)仅为 15 h,处理效率高,砂式沼液处理池每层砂的不规则系数小于 4.0,水力负荷严格控制 $0.04 \text{ m}^3\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$,保证了该装置不会堵塞。

(3)新型高效反应器组合系统对化学需氧量(COD)、生化需氧量(BOD)、氨氮($\text{NH}_3\text{-N}$)和总固体悬浮物(TSS)的平均去除率分别为 97.6%、98.2%、81.3%和 98.1%。出水体积质量平均值分别为 89.0、27.1、15.7 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 64.9 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,满足国家二级排放标准。

参考文献:

- [1] 刘毅,张淑萍,孟华,等.制约农户奶牛养殖效益因素的调查分析[J].中国奶牛,2009,12:76-77.
LIU Yi, ZHANG Shu-ping, MENG Hua, et al. Dairy farming efficiency factors constraining farmers investigation and analysis[J]. *China Dairy*, 2009, 12:76-77.
- [2] 王会群,高腾云,傅彤,等.奶牛集约化生产体系中磷污染的研究进展[J].江西农业学报,2009,21(9):147-149.
WANG Hui-qun, GAO Teng-yun, FU Tong, et al. Research progress in phosphorus pollution in intensive dairy production system[J]. *Acta Agriculturae Jiangxi*, 2009, 21(9):147-149.
- [3] 张克强,高怀友.畜禽养殖业污染物处理与处置[M].北京:化学工业出版社,2004.
ZHANG Ke-qiang, GAO Huai-you. The treatment and disposal of live-stock and poultry breeding industry pollutant[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2004.
- [4] 刘旭,李登煜,李扬,等.我国奶牛养殖发展中存在的环境污染问题及控制措施[J].环境保护,2004,2:25-28.
LIU Xu, LI Deng-yu, LI Yang, et al. Problems of environmental pollution and control measures in developing cow farming in China[J]. *Environmental Protection*, 2004, 2:25-28.
- [5] Sivakumar M, Tie Ling. Dairy shed wastewater treatment using anaerobic bioreactors[J]. *Journal of Shenyang Institute of Chemical Technology*

- gy, 2008, 22(3):280-287.
- [6] 孙小菊, 潘喜平. 基于厌氧处理的畜禽养殖废水处理与资源化利用[J]. 漯河职业技术学院学报, 2009, 8(5):4-5.
- SUN Xiao-ju, PAN Xi-ping. Based on anaerobic treatment of livestock wastewater treatment and resource utilization[J]. *Jouranal of Luohe Vocational Technology College*, 2009, 8(5):4-5.
- [7] 彭武厚, 胡文英, 李新吾, 等. 大型奶牛场粪便厌氧消化工程的研究[J]. 工业微生物, 1995, 25(1):5-12.
- PENG Wu-hou, HU Wen-ying, LI Xin-wu, et al. Large-scale anaerobic digestion of dairy manure research project[J]. *Industrial Microbiology*, 1995, 25(1):5-12.
- [8] 寿亦丰, 蔡昌达, 林伟华, 等. 杭州灯塔养殖总场沼气与废水处理工程的技术特点[J]. 农业环境保护, 2002, 21(1):29-32.
- SHOU Yi-feng, CAI Chang-da, LIN Wei-hua, et al. Hangzhou light-house total aquaculture wastewater treatment biogas and technical characteristics[J]. *Agricultural Environmental Protection*, 2002, 21(1):29-32.
- [9] 邓良伟, 陈铭铭. IC 工艺处理猪场废水试验研究[J]. 中国沼气, 2001, 19(2):12-15.
- DENG Liang-wei, CHEN Ge-ming. IC technology for treatment of piggery wastewater[J]. *China Biogas*, 2001, 19(2):12-15.
- [10] NY/T 1222—2006. 规模化畜禽养殖场沼气工程设计规范[S].
- NY/T 1222—2006. Scale livestock farms biogas design[S].
- [11] 刘志勇. 畜禽养殖废水的处理技术[J]. 广东化工, 2009, 36(7):170-171.
- LIU Zhi-yong. Livestock breeding wastewater treatment technology[J]. *Guangdong Chemical*, 2009, 36(7):170-171.
- [12] 周孟津, 杨秀山, 张维来, 等. 升流式固体反应器(USR)鸡粪中温厌氧消化性能研究[J]. 江苏沼气, 1994, 4:17-21.
- ZHOU Meng-jin, YANG Xiu-shan, ZHANG Wei-lai, et al. Up-flow solid reactor(USR) in the digestion of chicken manure properties[J]. *Jiangsu Biogas*, 1994, 4:17-21.
- [13] 王凯军, 左剑恶, 甘海南, 等. UASB 工艺的理论工程实践[M]. 北京: 中国环境科学出版社.
- WANG Kai-jun, ZUO Jian-e, GAN Hai-nan, et al. UASB process theory and engineering practice[M]. Beijing: China Environmental Science Press.
- [14] 余慧玲. 厌氧膜生物反应器在污水处理中的研究进展[J]. 工业用水与废水, 2009, 40(4):19-22.
- YU Hui-ling. Research progress on anaerobic membrane bioreactor in wastewater treatment[J]. *Industrial Water & Wastewater*, 2009, 40(4):19-22.
- [15] 马溪平, 等. 厌氧微生物学与污水处理[M]. 北京: 化学工业出版社.
- MA Xi-ping, et al. Anaerobic microbiology and wastewater treatment [M]. Beijing: Chemical Industry Press.
- [16] Dong Liangjie, Yang P Y. Design and Analysis of an Anaerobic Bionest Reactor for Milk Parlor Wastewater Treatment; National Summit of Anaerobic Digestion Conference Preceding Paper, 2003, June, North Carolina, USA.
- [17] 黄志金, 黄光团, 史春琼, 等. 溶解氧对膜生物反应器处理高氨氮废水的影响[J]. 环境科学与技术, 2010, 33(1):138-145.
- HUANG Zhi-jin, HUANG Guang-tuan, SHI Chun-qiong, et al. Effect of DO on high concentration of ammonia nitrogen wastewater treatment in membrane bioreactor[J]. *Science and Technology*, 2010, 33(1):138-145.
- [18] 朱 勇, 张选军, 张亚雷, 等. 溶解氧对厌氧颗粒污泥活性的影响[J]. 环境科学, 2007, 28(4):781-785.
- ZHU Yong, ZHANG Xuan-jun, ZHANG Ya-lei, et al. Impact of dissolved oxygen on the activity of anaerobic granular sludges[J]. *Environmental Science*, 2007, 28(4):781-785.
- [19] 方 平, 陆少鸣, 刘 蛟, 等. 生物砂滤池对有机物和氨氮的去除[J]. 环境科学与技术, 2006, 29(12):73-80.
- FANG Ping, LU Shao-ming, LIU Jiao, et al. Removal of organic matter and $\text{NH}_3\text{-N}$ by biological sand filter[J]. *Environmental Science and Technology*, 2006, 29(12):73-80.
- [20] 龙用波, 邓仕槐, 朱春兰, 等. 膜生物反应器 MBR 处理畜禽废水的效果研究[J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(增刊):418-422.
- LONG Yong-bo, DENG Shi-huai, ZHU Chun-lan, et al. Membrane bioreactor MBR wastewater treatment study on the effect of livestock and poultry[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, 26(Suppl.):418-422.
- [21] Drizo A, Reddy K R, Moore P A. Solubility of inorganic P in stream water as influenced by pH and Ca concentration[J]. *Water Research*, 1994, 28(8):1755-1763.
- [22] 吴克谦. 奶牛养殖要重视环境保护[J]. 中国动物保健, 2007, 11.
- WU Ke-qian. Dairy farming should pay attention to environmental protection[J]. *China Animal Health*, 2007, 11.
- [23] Reddy K R, Kadlec R H, Flaig E, et al. Phosphorus retention in streams and wetlands: A review[J]. *Critical Review in Environmental Science Technology*, 1999, 29(1):83-146.
- [24] 张 颖, 邓良伟. 猪场废水厌氧除磷工艺研究[D]. 中国农业科学院环境工程专业硕士论文, 2006.
- ZHANG Ying, DENG Liang-wei. Research of anaerobic phosphorus removal techniques of piggery wastewater[D]. The Chinese Academy of Agricultural Sciences, Environmental Engineering Master's thesis, 2006.
- [25] 李 杰, 钟成华, 邓春光, 等. 厌氧池/人工湿地/生物塘系统处理奶牛养殖场废水[J]. 中国给水排水, 2008, 24(9):83-85.
- LI Jie, ZHONG Cheng-hua, DENG Chun-guang, et al. Application of anaerobic tank/constructed wetland/biological pond system for treatment of cows farm wastewater[J]. *China Water & Wastewater*, 2008, 24(9):83-85.
- [26] 吴树彪, 董仁杰, 翟 旭, 等. 组合家庭人工湿地系统处理北方农村生活污水[J]. 农业工程学报, 2009, 25(11):282-287.
- WU Shu-biao, DONG Ren-jie, ZHAI Xu, et al. Northern rural domestic sewage treatment by integrated household constructed wetlands[J]. *Transactions of the CSAE*, 2009, 25(11):282-287.
- [27] 施东文, 陈健波, 奚旦立, 等. 活性炭滤池深度处理水中有机物[J]. 环境工程, 2006, 24(6):85-87.
- SHI Dong-wen, CHEN Jian-bo, XI Dan-li, et al. Advanced treatment of organic compounds in water using activated carbon filter[J]. *Environmental Engineering*, 2006, 24(6):85-87.