

鄱阳湖流域养猪废水治理概况与进展

万莉, 章洪涛, 弓晓峰, 王金保, 戴勇, 车建刚

(南昌大学 资源环境与化工学院 鄱阳湖环境与资源利用教育部重点实验室, 南昌 330047)

摘要: 概述了鄱阳湖流域现有养猪场废水水质特点和治理模式(还田、自然处理、工业化处理), 讨论了其优缺点和适用范围; 介绍了适用于规模化养猪场废水治理的组合工艺: IOG-SBBR-CW 和 BCO-SBBR-BAF-CW 工艺, 及可用于中小型养猪场的 A/O 一体化生物膜反应器和同时能降解有机物又能回收电能的 MFC; 最后提出了拟重点解决的问题: 推行养猪清洁生产、解决重金属和抗生素污染和开发微生物的低温高效技术。

关键词: 猪场废水治理; 组合工艺; A/O 一体化; MFC

中图分类号: S811.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-1683(2015)04-0798-05

Situation and progress of pig wastewater treatment in Poyang Lake Basin

WAN Li, ZHANG Hong-tao, GONG Xiao-feng, WAN Jin-bao, DAI Yong, CHE Jiar-gang

(Key Laboratory of Poyang Lake Environment and Resource Utilization, Ministry of Education, School of Environment & Chemical Engineering, Nanchang University, Nanchang 330047, China)

Abstract: In this paper, the characteristics of the existing pig farm wastewater quality and treatment approaches (returning, natural treatment, and industrialized treatment) in the Poyang Lake Basin were summarized, and the advantages, disadvantages, and applicable scope of the treatment methods were discussed. The combination techniques were introduced, including the technique for the large scale pig farm wastewater treatment: IOG-SBBR-CW and BCO-SBBR-BAF-CW technique, the technique for the small and medium sized pig farms: A/O biological membrane reactor, and MFC technique which can degrade organic matter and recycle energy at the same time. Finally, the primary problems were proposed, including promoting pig cleaning production, solving the pollution of heavy metals and antibiotics, and developing microbial technique with low temperature and high.

Key words: pig wastewater treatment; combination technique; integration of A/O; MFC

位于江西省北部的鄱阳湖, 上承赣、抚、信、饶、修等河流来水, 下淌长江, 素有“赣北明珠”之称, 其流域面积为 16 22 万 km², 占江西省流域面积的 97%, 长江流域面积的 9%^[1,2]。保护好鄱阳湖为“一湖清水”, 是建设鄱阳湖生态经济区的需要。近年来, 江西省养猪业迅猛发展, 尤其是规模化养猪业, 所带来严重的猪场废水污染, 对鄱阳湖流域的生态与环境带来了巨大的挑战。据统计^[3], 2012 年江西省有生猪规模养殖场(户) 6 万个, 其中年出栏 500 头以上的 10 652 个, 年出栏万头以上的 292 个, 全省生猪规模年出栏达 3 000 万头。当前, 大部分养猪场废水并未经合理的处理处置(仅有 2 851 家已建成了治理设施)。养猪场废水已成为继工业污染后的又一重大污染源。所以猪场废水的污染已成为不容忽视、亟待解决的问题^[4]。

1 猪场废水治理概况

1.1 猪场废水的产生及水质状况

目前规模化养猪场存在的清粪方式有三种: 水冲粪、干清粪、水泡粪。我国规模化养猪场主要采用水冲式工艺, 冲洗猪粪、猪尿的过程中产生大量的猪场废水, 其特点是: 排放量大、有机物浓度高、富含氮磷、碳氮比失调^[5]。猪场废水水质情况见表 1(水冲粪)。

1.2 猪场废水治理现状

猪场废水处理的目的是将其减量化、无害化和资源化, 最大限度地满足环境可接纳性。当前国内主要的治理模式有: 还田模式、自然处理模式和工业化处理模式。三种猪场

收稿日期: 2014-09-10 修回日期: 2014-12-31 网络出版时间: 2015-07-23

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20150723.2019.018.html>

基金项目: “十一五”国家科技支撑计划重点项目(2007BAB23C02); 江西省科技计划项目(20122BBG70079); 江西省教育厅科技落地计划项目(GJJ12433); 南昌市对外科技合作与成果转化推广计划项目(2013HZCG001)

作者简介: 万莉(1979-), 女, 江西南昌人, 讲师, 博士生, 主要从事环境科学与工程方面的研究。E-mail: wanli@ncu.edu.cn

通讯作者: 王金保(1952-), 男, 江西南昌人, 教授, 博士生导师, 从事水污染控制及资源化技术研究。E-mail: jbw@ncu.edu.cn

废水处理模式特点见表2。

表1 猪场废水水质情况

Tab. 1 Pig farm wastewater quality

项目	粪	尿	废水
BOD ₅	63 000	5 000	3 000~ 13 000
TSS	21 700	/	9 200~ 16 500
TN	4 660	7 780	800~ 2 150
P ₂ O ₅	1.68	0.15	410~ 680
K ₂ O	0.14	0.33	310~ 400
TKN	/	/	680~ 1 100
COD _{Cr}	/	/	11 000~ 26 000
TS	/	/	10 000~ 20 000
VS	/	/	8 000~ 16 000
pH	/	/	7.5~ 8.5

数据来源:《江西规模猪场粪污治理现状与可行技术推广》。

表2 处理猪场废水的三种模式的特点

Tab. 2 Characteristics of three pig farm wastewater treatment approaches

处理模式	适用条件	优点	缺点
还田模式	将猪场废水作为肥料还田的一种处理模式 ^[6] 。适用于远离城市、有足够农田消纳粪便污水的经济地区,特别是种植常年需要施肥作物的地区,要求养殖场规模较小。	<ul style="list-style-type: none"> 1 污染物零排放,最大限度的实现废物资源化,可以减少化肥施用,增加土壤肥力; 2 投资省,不需专人管理,运转费用低。 	<ul style="list-style-type: none"> 1 受条件限制,适应性不强; 2 雨季以及非用肥季节须考虑粪污或沼液的出路; 3 存在着传播畜禽疾病和人畜共患病的危险; 4 不合理的使用方式会导致硝酸盐、磷及重金属的沉积,从而对地表水和地下水构成污染; 5 恶臭以及降解过程产生的氨、硫化氢等有害气体; 6 需配套大量土地^[7]。
自然处理模式	主要采用氧化塘 ^[8] 、土地处理系统或人工湿地 ^[9-10] 等自然处理系统对养殖场粪便污水进行处理,适用于距城市较远、气温较高且土地宽广有滩涂、荒地、林地可作污水自然处理系统地区,养殖场规模中等。	<ul style="list-style-type: none"> 1 投资较省,能耗少,运行管理费用低; 2 污泥量少,不需要复杂的污泥处理系统; 3 厌氧部分建于地下,基本无臭味; 4 可回收能源。 	<ul style="list-style-type: none"> 1 土地占用量较大; 2 处理效果易受季节温度变化的影响; 3 建于地下的厌氧系统出泥困难,且维修不便; 4 有污染地下水的可能。
工业化处理模式	主要包括厌氧 ^[11-12] 、好氧 ^[13-14] 、厌氧-好氧 ^[15-16] 、厌氧-好氧自然处理 ^[17-18] 、物理化学 ^[19-21] 等技术。对位于城市近郊、土地紧张且无足够农田消纳粪便污水或进行自然处理的规模较大养殖场,工业化处理模式最理想。	<ul style="list-style-type: none"> 1 占地少; 2 适应性广,不受地理位置限制; 3 季节温度变化影响较小; 4 处理出水水质能得到有效控制。 	<ul style="list-style-type: none"> 1 能耗较高; 2 维护管理量大; 3 需专门技术人员管理。

分析上述处理模式仍存缺陷如下:(1)厌氧工艺反应时间长、处理效率低、占地面积大;(2)厌氧消化后降低了废水的可生化性和C/N,给后续好氧处理过程带来了难度;(3)厌氧消化液缺乏反硝化电子供体以及整个处理系统碱度失衡;(4)中小型养猪场废水治理工程投资大、运行成本高;(5)猪

场废水仍停留在末端治理。

2 猪场废水治理进展

针对鄱阳湖流域养猪废水治理现状及存在的问题,进行了一系列新技术的研发。

2.1 IOC-SBBR-CW 组合工艺

针对规模化养猪场废水治理的问题,作者提出了内外循环厌氧反应器(Internal and outer circulation reactor, IOC)-序批式生物膜反应器(Sequencing Biofilm Batch Reactor, SBBR)-人工湿地(Constructed Wetland, CW)组合工艺^[18],并在江西某万头养猪场进行示范。该项目研发了 IOC-SBBR-CW 新工艺,开发了 IOC 和 SBBR 新设备,建立了原水补充碳源优化猪场厌氧消化液处理运行方式,并且研究了 IOC-SBBR 工艺同步产甲烷反硝化厌氧氨氧化新技术。工程总投资 98.8 万元,运行费为 1.27 元/m³ 水。

工艺流程见图 1。

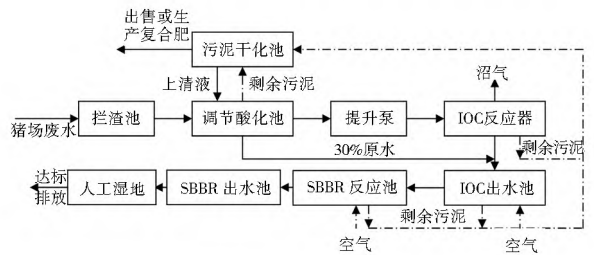


图1 IOC-SBBR-CW 组合工艺流程

Fig. 1 Flowchart of IOC-SBBR-CW combination technique

经过调试运行,该工艺对 COD_{Cr}、BOD₅、SS、NH₃-N、TP 的去除率分别达到了 96.5%、93.2%、96.2%、89%、86%,出水各项指标都达到《畜禽养殖业污染物排放标准》(GB 18596-2001)。添加原水后 COD、NH₃-N、TP 的去除率分别由 35.1%、80.4%、71.5% 提升至 74%、90.6%、78.7%。

2.2 A/O 一体化生物膜反应器

针对江西中小型养猪场大多已建有沼气池等厌氧处理设施,产生的沼液仍对环境造成一定污染,开发同时兼具厌、好氧处理功能和低成本的一体化设备,具有重要的现实意义。

研发了一种一体化 A/O 生物膜反应器及工艺,具体装置见图 2、图 3。

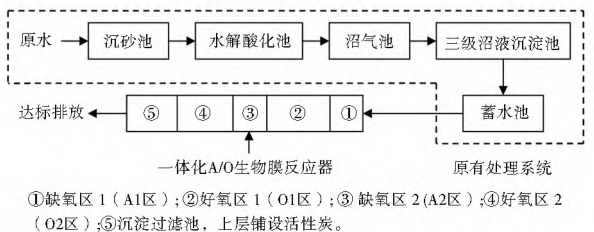
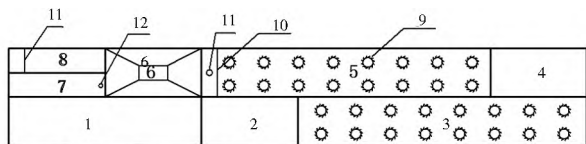


图2 某猪场废水处理工艺流程

Fig. 2 Flowchart of wastewater treatment technique for a pig farm

该装置经过调试运行,对 COD、NH₃-N 的去除率为 69%~76%、82%~90%,其出水浓度可分别维持在 400 mg/L、80 mg/L 以下(图 4),满足《畜禽养殖业污染物排放标准》(GB 18596-2001),目前已在江西某小型养猪场进行中试。



1: 进水区; 2: 缺氧区 3: 好氧区1; 4: 缺氧区2; 5: 好氧区2; 6: 沉淀区; 7: 集泥池; 8: 出水池; 9: 膜填料; 10: 堰板; 11: 出水孔; 12: 溢泥管。

图 3 一体化 A/O 生物膜反应器示意图

Fig. 3 Schematic diagram of integrated A/O biological membrane reactor

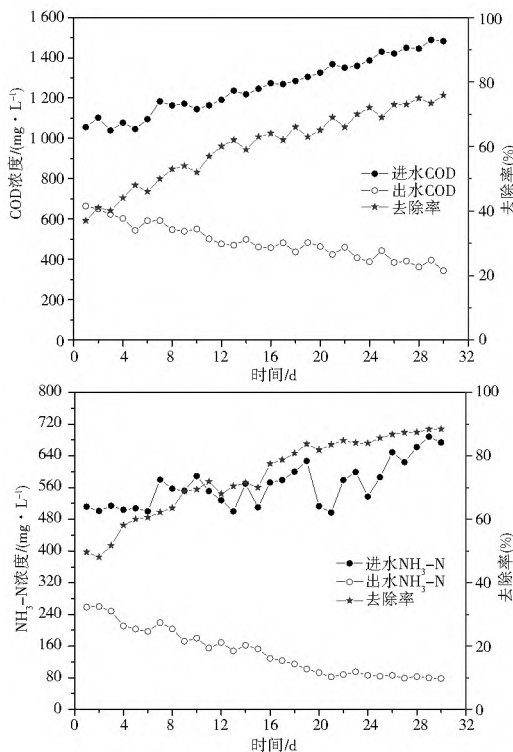


图 4 一体化 A/O 生物膜反应器的 COD、NH₃-N 去除情况

Fig. 4 Removal of COD and NH₃-N by the integrated A/O biological membrane reactor

2.3 BCO-SBBR-BAF-CW 组合工艺

依据实验室中试结果,设计了另一种猪场废水治理示范工程^[4],其工艺流程见图 5(固液分离、匀浆池、USR、沼气池为原有处理设施)。

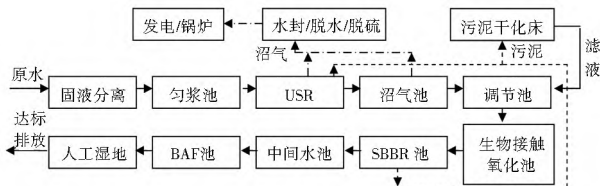


图 5 BCO-SBBR-CW 组合工艺流程

Fig. 5 Flowchart of BCO-SBBR-CW combination technique

猪场沼液首先进入调节池,调节水质水量;再经泵提升,由穿孔管喷洒到接触氧化池(Biological Contact Oxidation Ponds, BCO)未曝气区(反硝化区),进行水解酸化及反硝化;随后进入曝气区(硝化区)进一步去除有机物并进行硝化反应;再经溢流堰自流入 SBBR 池,经过缺氧-好氧-沉淀等过程,出水流入中间水池;然后经恒液位给水设备匀速自流入曝气生物滤池(Biological Aerated Filter, BAF),进一步去除

污水中的有机物、氮、磷和悬浮物;最后流入种植了狐尾藻的人工湿地进行深度处理并最终达标排放(表 3)。

表 3 出水水质监测结果

Tab. 3 Monitoring results of water quality							
处理单元	指标	COD _{Cr}	BOD ₅	SS	NH ₃ -N	TP	pH
调节池	进水/(mg·L ⁻¹)	1655	794	709	806	32.5	7.4
	出水/(mg·L ⁻¹)	1576	750	672	806	32.5	7.1
	去除率(%)	4.8	5.6	5.2	-	-	-
生物接触氧化池	出水/(mg·L ⁻¹)	692	299	320	305	16.3	6.9
	去除率(%)	56.1	60.2	52.4	62.2	50.0	-
SBBR 池	出水/(mg·L ⁻¹)	322	128	145	122	7.2	7.2
	去除率(%)	53.5	57.1	54.7	60.0	56.2	-
BAF 池	出水/(mg·L ⁻¹)	177	67	71	83	6.1	7.0
	去除率(%)	45.1	47.8	51.1	32.2	15.5	-
人工湿地	出水/(mg·L ⁻¹)	122	44	48	60	4.5	7.3
	去除率(%)	31.1	34.3	32.2	28.7	26.5	-
总去除率(%)		91.7	94.5	93.2	92.6	86.2	-

USR 及 SBBR 池产生的污泥定期排入污泥干化床进行干化处理,并与固液分离后产生的粪渣共同出售。

BCO-SBBR-CW 组合处理工艺出水水质优于《畜禽养殖业污染物排放标准》(GB 18596-2001)中的要求,系统具体运行效果见表 3。

2.4 微生物燃料电池(MFC)

养猪废水中 COD 浓度高,处理难度大、成本高。采用微生物燃料电池(Microbial Fuel Cell, MFC)可以在微生物的作用下既可降解有机物又能回收电能,是同时实现去除污染物、能源回收的理想方法。以下为研发的 MFC 处理猪场废水实验装置(图 6)。

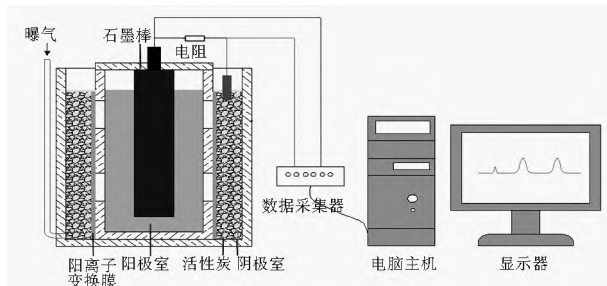


图 6 MFC 实验装置

Fig. 6 MFC experimental instrument

经过一段时间的驯化及条件优化,将其运用于处理实际养猪废水,输出电压及 COD 去除率情况见图 7、图 8。

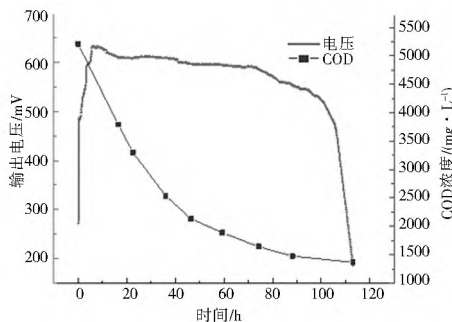


图 7 输出电压、COD 随时间变化

Fig. 7 Variations of output voltage and COD with time

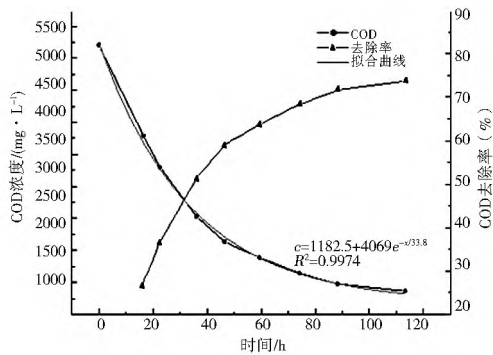


图8 COD浓度、COD去除率随时间变化

Fig. 8 Variation of COD removal rate with time

由图7、图8可知:当系统pH、电阻、温度分别控制在7.69~8.18、100Ω、30℃时,具有良好的产电效率,结束时输出电压为230mV,COD去除率可达73.8%,反应周期为113.1h,产电量为2418C,库伦效率可达20.9%,理论上可用于处理猪场废水。

3 猪场废水治理拟解决的问题

3.1 推行养猪清洁生产

规模化养猪场快速发展导致粪污污染日益严重,影响养猪业生产方式的转变,威胁畜产品质量安全,与生态型、环保型养猪业发展方向背道而驰。而清洁生产可从源头削减污染物的产生,同时提高产品质量,降低生产成本,故有必要在末端治理的基础上大力推行养猪业的清洁生产,具体措施为:选择养猪场址、设计猪场布局、改善饲养水平、提高管理水平、综合利用废物、改进治理技术以及建立循环经济模式等方面。

3.2 解决重金属和抗生素污染

在生猪饲养育肥过程中,为了加快生猪生长速度,预防育肥中生猪发生疾病,在饮料中加入含铜锌重金属和四环素类抗生素,使得猪场废水中含有重金属和抗生素,排入环境后对水体、土壤、植物、人类造成的危害如何尚不清楚,缺乏系统的研究。可考虑解决的方法:¹应用饲料制粒技术,提高饲料利用效率;²饲料中添加合成氨基酸、乳酸菌等制剂提高蛋白质利用率,减少有机物及粪污中氮、磷等的排放量;³使用有机微量元素、益生菌、植物提取物等取代重金属添加剂,可降低粪污中重金属和抗生素含量。

3.3 开发微生物的低温高效技术

由于冬天气温较低,厌氧反应器处理效率低,致使出水水质难于达标,若采用废水加温手段,会引起运行费上升,影响厌氧反应器在养猪场的运用。今后可考虑的解决途径包括:¹选育中低温甲烷菌等微生物;²开发低价保温材料;³充分利用太阳能;⁴深度利用厌氧产生的沼气等。

4 结语

猪场废水具有有机物浓度高、富含氮磷等特点,目前国内常用的猪场废水治理模式有:还田模式、自然处理模式、工业化处理模式,但仍存在一定缺陷。针对存在的问题进行了以下新技术的研发。

(1)建设了两个示范工程,即采用IOG-SBBR-CW组合工艺、BCO-SBBR-BAF-CW组合工艺,均应用于大型规模化养猪场,示范工程的COD_{Cr}、BOD₅、SS、NH₃-N、TP去除率分别为:96.5%、93.2%、96.2%、89%、86%和91.7%、94.5%、93.2%、92.6%、86.2%,且均具有明显的技术经济优势。

(2)采用了A/O一体化生物膜反应器处理中小型养猪场废水,出水满足《畜禽养殖业污染物排放标准》(GB 18596-2001)。

(3)研发了MFC处理猪场废水,具有稳定产电平台,COD去除率可达73.8%,库伦效率可达20.9%,为猪场废水处理提供了新的技术和思路。

参考文献(References):

- [1] 鄱阳湖编委会. 鄱阳湖研究[M]. 上海: 上海科技出版社, 1988. (Editorial Board of Poyang Lake. Poyang Lake Study[M]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 1988. (in Chinese))
- [2] 万金保, 蒋胜韬. 鄱阳湖水环境分析及综合治理[J]. 水资源保护, 2006, 22(3): 24-27. (WAN Jirbao, JIANG Shengtao. Analysis and comprehensive treatment of aquatic environment in Poyang Lake[J]. Water Resources Protection, 2006, 22(3): 24-27. (in Chinese))
- [3] 江西省统计局, 国家统计局江西调查总队. 江西省统计年鉴2013[M]. 北京: 中国统计出版社, 2013. (Jiangxi Provincial Bureau of Statistics, NBS Survey Office in Jiangxi Province. Jiangxi Statistical Yearbook 2013[M]. Beijing: China statistics press, 2013. (in Chinese))
- [4] 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 Keqiang, GAO Huaiyou. Livestock and Poultry Breeding Industry Pollutant Treatment and Disposal[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2004. (in Chinese))
- [5] Vanotti M B, Szogi A A, Hunt P G., et al. Development of environmentally superior treatment system to replace anaerobic swine lagoons in the USA[J]. Bioresource Technology, 2007, 98(17): 3184-3194.
- [6] Choudhary M, Bailey L D, Grant C A. Review of the use of swine manure in crop production: effects on yield and composition and on soil and water quality[J]. Waste Management & Research, 1996(14): 581-595.
- [7] Miner J R. Alternatives to minimize the environmental impact of large swine production units[J]. Journal of Animal Science, 1999(77): 440-444.
- [8] Stone K C, Poach M E, Hunt P G., et al. Marshland constructed wetland design analysis for swine lagoon wastewater treatment[J]. Ecological Engineering, 2004, 23(2): 127-133.
- [9] Sklarz M Y, Gross A, Soares M I M, et al. Mathematical model for analysis of recirculating vertical flow constructed wetlands[J]. Water Research, 2010, 44(6), 2010-2020.
- [10] 廖新伟, 汪植三, 李其谦. 人工湿地在猪场污水净化中的应用[J]. 农业工程学报, 1995, (4): 96-100. (LIAO Xinwei, WANG Zhisan, LI Qiqian. The Application of effluent purification

- on constructed wetlands in pig farm [J]. Transactions of the CSAE, 1995 (4): 96-100. (in Chinese)
- [11] Sakar S, Yetilm ezsoy K, Kocak E. Anaerobic digestion technology in poultry and livestock waste treatment a literature review [J]. Waste Management & Research, 2009, 27(1): 3-18.
- [12] 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 Liangwei, CHEN Geming. Treatment of pig wastewater using internal circulation reactor [J]. China Biogas, 2001, 19(2): 12-15. (in Chinese))
- [13] Obaja D, Mace S, Mat a Alvarez J. Biological nutrient removal by a sequencing batch reactor (SBR) using an internal organic carbon source in digested piggery wastewater [J]. Bioresource Technology, 2005, 96(1): 7-14.
- [14] 邓良伟, 姚爱莉, 梅自立. SBR 工艺处理猪场粪污的实验研究 [J]. 中国沼气, 2008, 18(1): 8-11. (DENG Liangwei; YAO Aili; MEI Zili. Treatment of piggery waste with the sequencing batch reactor [J]. China Biogas, 2008, 18(1): 8-11. (in Chinese))
- [15] 杨虹, 李道棠, 朱章玉, 等. 集约化养猪场冲栏水的达标处理 [J]. 上海交通大学学报, 2000, 34(3): 558-560. (YANG Hong, LI Dao tang, ZHU Zhangyu, et al. ABR-ICEAS system for piggery wastewater treatment [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2000, 34(3): 558-560. (in Chinese))
- [16] 邓良伟, 郑平, 陈子爱. Anarwia 工艺处理猪场废水的技术经济性研究 [J]. 浙江大学学报: 农业与生命科学版, 2004, 30(6): 628-634. (DENG Liangwei, ZHENG Ping, CHEN Ziai. Technological and economical potential of anaerobic adding raw wastewater intermittent aeration process for treatment of piggery wastewater [J]. Journal of Zhejiang University: Agric. & Life Sci., 2004, 30(6): 628-634. (in Chinese))
- [17] 蒋敏. ABR+ BCO+ 人工湿地工艺处理养猪场废水的应用研究 [D]. 长沙: 湖南农业大学, 2012. (JIANG Min. Study on ABR/ BCO/ Constructed Wetland Process Treating Wastewater of Pig Breeding Farm [D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2012 (in Chinese))
- [18] 万金保, 陈琳, 吴永明, 等. IOG SBBR 人工湿地组合工艺在猪场废水处理中的应用 [J]. 给水排水, 2011, 37(7): 47-51. (WAN Jinbao, CHEN Lin, WU Yongmin, et al. IOG SBBR- the combination of artificial wetland technology application in swine farm wastewater treatment [J]. Water Supply and Drainage, 2011, 37(7): 47-51. (in Chinese))
- [19] Suzuki K, Tanaka Y, Kuroda K, et al. Removal and recover of phosphorous from swine wastewater by struvite accumulation device [J]. Bioresource Technology, 2007, 98(8): 1573-1578.
- [20] 宋永会, 钱锋, 弓爱君, 等. 钙型天然斜发沸石去除猪场废水中营养物的实验研究 [J]. 环境工程学报, 2011, 5(8): 1701-1706. (SONG Yonghui, QIAN Feng, GONG Aijun, et al. Experimental study on nutrients removal from swine wastewater by natural Ca-type clinoptilolite [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2011, 5(8): 1701-1706. (in Chinese))
- [21] 张冬梅. 猪场废水氮磷 MAP 回收工艺及其对传统厌氧-好氧处理系统的影响研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2013. (ZHANG Dongmei. MAP Precipitation Recycling of N and P from Swine Wastewater and Its Impacts on Traditional Anaerobic and Aerobic Processes [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2013. (in Chinese))
- [22] 王瑞, 魏源送. 畜禽粪便中残留四环素类抗生素和重金属的污染特征及其控制 [J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(9): 1705-1719. (WANG Rui, WEI Yuan song. Pollution and control of tetracyclines and heavy metals residues in animal manure [J]. Journal of Agro Environment Science, 2013, 32(9): 1705-1719. (in Chinese))
- [23] Moral R, Perez Murcia M, Perez Espinosa A, et al. Salinity, organic content, micronutrients and heavy metals in pig slurries from South eastern Spain [J]. Waste Management, 2008, 28: 367-371. (in Chinese))
- [24] 罗炳林, 覃遵镜, 田凤文. 沼气综合利用的模式设计与经济效益 [J]. 中国西部科技, 2004(7): 72-74. (LUO Binglin, TAN Zunjing, TIAN Fengwen. Comprehensive utilization of biogas model design and economic benefits [J]. Science and Technology in Western China, 2004(7): 72-74. (in Chinese))

(上接第 792 页)

- [11] Litrico X, Malaterre P O, Baume J P. Automatic tuning of PI controllers for an irrigation canal pool [J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 2007, 133(1): 27230.
- [12] Robert S. Gooch, Eduardo Bautista, Robert J. Strand. Automated scheduling of open channel deliveries: potential and limitations [C]. SCADA and Related Technologies for Irrigation District Modernization, II. Phoenix, Arizona: USCID, 2007. 23-32.
- [13] 崔巍, 陈文学, 郭晓晨, 等. 长输水渠道前馈控制时间研究 [J]. 水利学报, 2009, 40(11): 1345-1350. (CUI Wei, CHEN Wexue, GUO Xiaochen, et al. Anticipation time estimation for feedforward control of long canal [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2009, 40(11): 1345-1350. (in Chinese))
- [14] Bautista E, Clemmens A J. Volume compensation method for routing irrigation canal demand changes [J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 2005, 131(6): 494-503.
- [15] 姚雄, 王长德, 丁志良, 等. 渠系流量主动补偿运行控制研究 [J]. 四川大学学报, 2008, 40(5): 38-45. (YAO Xiong, WANG Changde, DING Zhiliang, et al. Study on canal system operation based on discharge active compensation [J]. Journal of Sichuan University, 2008, 40(5): 38-45. (in Chinese))