

江 晖,李 丹,廖天宇,等. 超声波联合光催化对沼液脱氮处理的效果[J]. 江苏农业科学,2016,44(5):509-513.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2016.05.145

超声波联合光催化对沼液脱氮处理的效果

江 晖,李 丹,廖天宇,曾庆文,耿文华

(南京工业大学生物与制药工程学院,江苏南京 211816)

摘要:通过超声波和二氧化钛光催化反应对畜禽养殖场沼液进行脱氮处理,以总氮和氨氮的去除率综合评价脱氮效果。先通过超声和光催化反应的单因素试验确定最佳值,再利用正交试验确定脱氮的最佳条件。结果表明,在超声时间为3 h、超声功率为50 W、沼液pH值为10.5的条件下,沼液总氮、氨氮去除率分别为65.39%、68.84%;而在光照时间为1.0 h、沼液pH值为8.0、流速为4.0 mL/s的光催化脱氮最佳试验条件下,沼液总氮、氨氮去除率分别为44.76%、39.90%;最后联合光催化和超声波对沼液进行脱氮处理后,沼液的总氮、氨氮去除率分别达到84.21%、83.58%,可以有效减轻后续沼液处理的负荷。

关键词:沼液;超声;光催化;脱氮处理

中图分类号: X703

文献标志码: A

文章编号: 1002-1302(2016)05-0509-05

近年来,随着畜禽养殖业体系的转变以及经济全球化的发展,中国规模化畜禽养殖业快速发展,经济增长的同时带来了对环境的污染。为了解决此类问题,国家大力扶持沼气工程建设,带来了大量的优质清洁能源^[1-3],同时大量的沼渣沼

液带来了新的问题,由于沼液有机质浓度高、含氮量高^[4-5]、碳氮比低,可生化性较差^[6-7],若直接排放势必会对水源、农业生态产生直接威胁和危害^[8-9]。

沼液中大量的氮、磷等营养物质进入水体后,促使水生生物过度繁殖,致使水体中溶解氧急剧下降,易发生富营养化^[10-13];长期饮用含氮废水,会增加新生儿先天性心脏病发生的概率^[14],另外,还易导致水体透明度下降、水体散发气味等危害。研究表明,太湖外部污染总量中,工业污染源仅占10%~16%,而农业面源污染高达59%,其中畜禽养殖污染占较大比例^[15]。

目前,国内外废水脱氮的处理方法包括物理法、生物法和化学法。物理法包括反渗透和超声处理等^[16-17]。生物法包括硝化反应、厌氧氨氧化、人工湿地、菌类处理和氮硫协同去

收稿日期:2015-04-20

基金项目:国家科技支撑计划(编号:2011BAD15B02);国家“863”计划(编号:2012AA021405);江苏省科技支撑计划(编号:BE2010359)。

作者简介:江 晖(1983—),男,江苏泰州人,硕士,主要从事环境技术方面的研究。E-mail:njutjh@126.com。

通信作者:耿文华,博士,教授,主要从事工业废水处理、养殖和生活污水达标排放、农业废弃物资源化利用与无害化处理等研究。E-mail:gengwenhua@njtech.edu.cn。

[8] Tu C, Ristaino J B, Hu S J. Soil microbial biomass and activity inorganic tomato farming systems; effects of organic inputs and straw mulching[J]. Soil Biol Biochem., 2006, 38: 247-255.

[9] Wu J, Brookes P C. The proportional mineralization of microbial biomass and organic matter caused by air-drying and rewetting of a grass land soil[J]. Soil Biol Biochem., 2005, 37: 507-515.

[10] Devi N B, Yadava P S. Seasonal dynamics in soil microbial biomass C, N and P in a mixed-oak forest ecosystem of Manipur Northeast India[J]. Appl Soil Ecol, 2006, 31: 220-227.

[11] 徐振峰,唐 正,万 川,等. 模拟增温对川西亚高山两类针叶林土壤酶活性的影响[J]. 应用生态学报, 2010, 21(11): 2727-2733.

[12] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京:中国农业出版社, 2005.

[13] 黄昌勇. 土壤学[M]. 北京:中国农业出版社, 2000.

[14] 徐华勤,章家恩,冯丽芳,等. 广东省典型土壤类型和土地利用方式对土壤酶活性的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2010, 16(6): 1464-1471.

[15] Li Z, Liu G S, Jing H X, et al. Effects of green manure application on microbial biomass C, N and enzyme activity of tobacco-planted soils[J]. Acta Pratac Sin, 2011, 20(3): 225-232.

[16] Boerner R J, Brinkman J A, Smith A. Seasonal variations in enzyme activity and organic carbon in soil of a burned and unburned hardwood forest[J]. Soil Biology & Biochemistry, 2005(37): 1419-1426.

[17] Zhang Y M, Zhou G Y, Wu N, et al. Soil enzyme activity changes in different-aged spruce forests of the eastern Qinghai-Tibetan Plateau[J]. Pedosphere, 2004, 14(3): 305-312.

[18] Paz-Ferreiro J, Trasar-Cepeda C, Leiros M C, et al. Biochemical properties in managed grassland soils in a temperate humid zone: modifications of soil quality as a consequence of intensive grassland use[J]. Biology and Fertility of Soils, 2009, 45(7): 711-722.

[19] Guo Y J, Ni Y, Han J G. The influence of land use change on chemical and biological properties of steppe soils in northern China[J]. Arid Land Research and Management, 2009, 23(3): 197-212.

[20] 潘福霞,鲁剑巍,刘 威,等. 不同种类绿肥翻压对土壤肥力的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2011, 17(6): 1359-1364.

[21] 王 岩,刘国顺. 绿肥中养分释放规律及对烟叶品质的影响[J]. 土壤学报, 2006, 43(2): 273-279.

[22] 朱春茂,李志芳,吴文良,等. 甜玉米/白三叶草秸秆还田的碳氮矿化研究[J]. 中国生态农业学报, 2009, 17(3): 423-428.

除等^[18-19]。化学法包括离子交换、吹脱、化学沉淀、电化学处理、湿式催化氧化和折点加氯等^[20-23]。

超声技术大多用于废水的预处理,主要是降低废水的生物毒性,提高可生化性,从而提高废水的生物可降解性。光催化技术在环境污染物的降解方面具有显著的成效^[24-26],许多难以生物降解的污染物都可以利用这种技术降解并彻底矿化^[27]。在诸多的半导体光催化剂中, TiO_2 具有安全无毒、化学稳定性高、分布广、成本低和高活性等优点,在环境治污领域被给予了厚望,并将逐渐稳步成为实用的工业化技术^[28-30]。

本研究采用超声波和二氧化钛光催化反应对沼液进行脱氮处理,通过单因素对比试验确定单因素最佳值,再通过正交试验确定试验最佳条件,最后联用超声-光催化方法对沼液进行脱氮处理,为后续沼液的进一步处理奠定理论基础。

1 材料与方法

1.1 试验沼液

沼液取自江苏东台某猪场粪污沼气工程的沼液储池,并经过100目的标准筛网去除粗杂质,低温避光保存。沼液水质指标见表1。

表1 水样水质指标

水质指标 (mg/L)			pH 值
COD	TN	$\text{NH}_3 - \text{N}$	
3 301.89 ± 37.74	1 372.79 ± 15.83	1 074.57 ± 1.40	8.23

1.2 试验装置

1.2.1 超声装置 超声装置见图1,频率40 kHz,功率100 W,可调范围40%~99%。试验时将超声装置注入清水,将装有100 mL沼液的三角烧瓶放置超声装置内侧(即放置在换能器正上方,保持三角烧瓶在换能器垂直方向)。

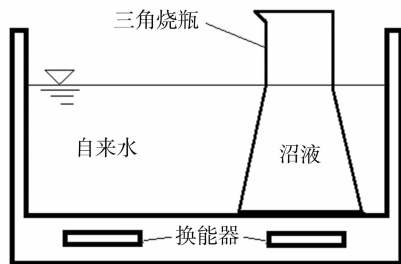


图1 超声装置示意

1.2.2 光催化反应器装置 光催化反应器装置见图2。光催化反应器由石英玻璃制成,内层石英套筒放置紫外LED光源,在光催化反应器的内层与石英套筒外层之间填充光催化吸附混合材料。本试验采用的光源为紫外LED灯管,由若干个紫外LED灯珠贴片组合而成,LED灯的波长为378.2 nm,光功率强度为0.387 mW,光功率密度为0.481 mW/cm²。

1.3 仪器及药品

KQ2200DB型数控超声波清洗器,昆山市超声仪器有限公司生产;PHS-3C型精密pH计,上海雷磁有限公司生产;Spectrumlab 752s紫外可见分光光度计,上海棱光技术有限公司生产;YXQ-LS-50A高压灭菌锅,上海博迅实业有限公司医疗设备厂生产;GXZ-9410MBE电热鼓风干燥箱,上海博

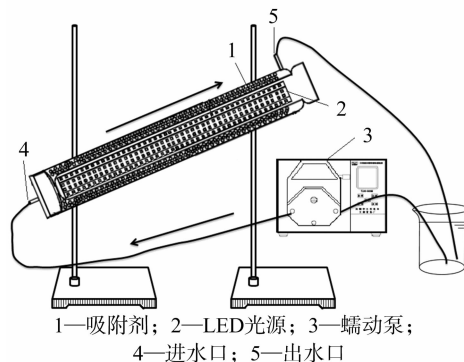


图2 光催化反应器示意

迅实业有限公司设备厂生产;SX2-4-10箱式电阻炉,济南精密科学仪器仪表有限公司生产。

无水碳酸钠(基准试剂)、活性氧化铝(工业级)、硝酸(优级纯)、过硫酸钾、氢氧化钠、浓盐酸、硼酸、轻质氧化镁、甲基红、溴百里酚蓝、酞酸丁酯和无水乙醇等试剂均为分析纯。

1.4 活性氧化铝负载光催化剂的制备

取直径3~5 mm的活性氧化铝,用去离子水多次清洗,然后100℃干燥,放置干燥器中冷却。

采用溶胶-凝胶法制备二氧化钛,混合液A:20 mL酞酸丁酯和36 mL无水乙醇;混合液B:64 mL无水乙醇、2 mL去离子水和0.4 mL浓硝酸。在剧烈的搅拌下,将混合液B加入到混合液A中,2滴/s,滴加完毕后搅拌90 min,室温下得到透明、均匀、稳定的溶液。然后将洗净干燥后的活性氧化铝浸入溶胶中,超声振荡10 min后取出自然放置10 min,然后在100℃烘干20 min,重复2次,最后在马弗炉中500℃煅烧2 h后自然冷却,得到活性氧化铝负载二氧化钛复合材料。

1.5 试验方法

1.5.1 超声脱氮试验 分别量取100 mL沼液在一定的超声功率和超声辐射时间下,针对不同pH值的沼液进行超声脱氮试验,试验结束后对沼液进行总氮和氨氮测试,确定沼液脱氮的最佳pH值;在最佳pH值的基础上,依次进行超声时间、超声功率2个主要因素的单因素试验,确定超声时间及超声功率的最佳值。最后再通过正交试验确定试验最佳超声条件。

1.5.2 光催化脱氮试验 在光催化反应器中填装308.01 g的活性氧化铝负载 TiO_2 光催化剂复合材料,其中 TiO_2 负载量为5.93 g,每组试验量取1 000 mL沼液进行。在一定的pH值和流速下,针对不同光照时间对沼液进行光催化脱氮试验,试验结束后对沼液进行总氮和氨氮测试,确定沼液脱氮的最佳光照时间;在此基础上,依次进行沼液pH值及流速2个主要因素的单因素试验,确定沼液pH值及流速的最佳值。最后再通过正交试验确定试验最佳光催化条件。

1.6 分析测定

总氮(TN):碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法(GB 11894—1989);pH值:玻璃电极法(GB 6920—1986);氨氮:蒸馏-中和滴定法(HJ 537—2009)。

2 结果与分析

2.1 超声对沼液脱氮的影响

2.1.1 pH值对沼液超声脱氮的影响 首先设定超声功率为

60 W,时间为 3 h,分别对 pH 值为 7.5、8.0、8.5、9.0、9.5、10.0 的沼液进行超声处理,试验结果见图 3。随着 pH 值的升高氮的去除率不断上升,当 pH 值为 10,总氮、氨氮去除率分别达到 60.15% 和 72.38%。这是由于水中的氮主要以 NH_4^+ 和 NH_3 的形式存在,二者存在动态平衡,随着 pH 值增大,平衡由 NH_4^+ 向 NH_3 转变,水中的氮变成气态氨气溢出; NH_4^+ 在超声辐射下高温热解生成了氮气,并与水中溶解的氧气在空化泡内反应生成 NO 和 NO_2 ,在 $\cdot\text{OH}$ 自由基的进一步作用下生成硝酸盐氮和亚硝酸盐氮,其中只有极少部分转化为硝酸盐氮和亚硝酸盐氮,更多的氨氮通过超声引发的高温热解反应去除,最终生成氮气和氢气逸出,从而降低了水中的氨氮。

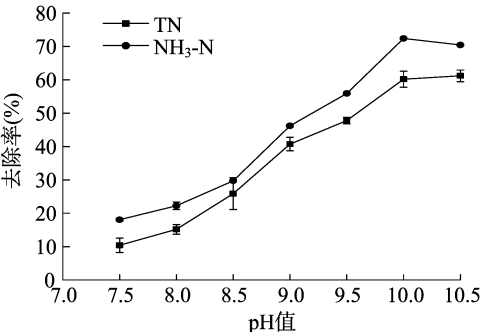


图3 pH 值对沼液脱氮的影响

2.1.2 超声时间对沼液脱氮的影响 设定超声功率为 60 W,调整沼液 pH 值为 10,考察 0.5、1.0、2.0、3.0、4.0、5.0、6.0 h 对沼液超声脱氮的影响,结果见图 4。随着超声时间的延长氮的去除率稳步增长。超声 3 h 后总氮和氨氮去除率分别达到 60.25%、66.49%,但在超声 5~6 h 后总氮、氨氮去除率趋于缓慢,这是因为超声时间过长时,体系温度会逐渐升高,而高温不利于空化气泡的产生,从而影响空化作用进一步生成羟基自由基,最终阻碍了体系的氧化作用,致使体系中更多的氨氮未能及时转化成氮气逸出,出现了脱氮效果并未随着时间的延长而一直升高的现象。在超声 6 h 时,沼液总氮、氨氮去除率分别达到 68.57%、81.18%。综合能耗考虑,选取最适超声处理时间为 2~3 h。

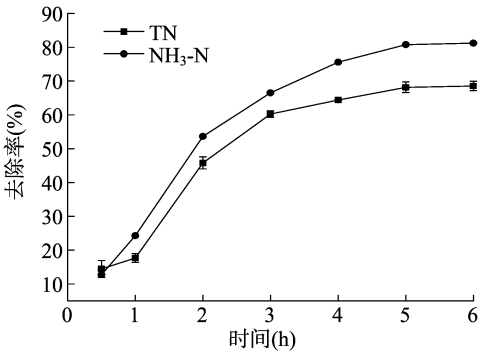


图4 超声时间对沼液脱氮的影响

2.1.3 超声功率对沼液脱氮的影响 调整沼液 pH 值为 10,设定超声时间为 2 h,考察 40、50、60、80、99 W 对沼液脱氮的影响,结果见图 5。随着超声功率的增大氨氮去除率平稳上升,最终稳定在 58% 左右,而总氮去除率在功率为 50 W 时达到最大值,为 66.16%。但是随着功率的增大,总氮去除率反

而出现下降趋势,因为超声波的频率一定时,超声波功率的增大可以起到增强空化作用,但当功率增大到一定值时,液体中的空化泡不能获得足够的崩裂时间^[31],空化作用将被削弱,从而出现氮去除率并未随着功率的增加而提高的现象^[32]。

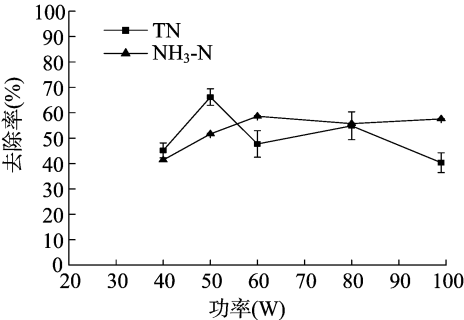


图5 超声功率对沼液脱氮的影响

2.1.4 正交试验确定最佳超声条件 选定超声时间、沼液 pH 值、超声功率作为影响处理效果的 3 个主要因素,每个因素选定 3 个水平,进行正交试验,结果见表 2 和图 6。

表 2 沼液脱氮处理最佳超声条件正交试验

试验号	时间(h)	pH 值	功率(W)	总氮去除率(%)
1	1.0	9.5	40	15.19
2	1.0	10.0	50	44.79
3	1.0	10.5	60	42.73
4	2.0	9.5	50	52.77
5	2.0	10.0	60	50.45
6	2.0	10.5	40	49.17
7	3.0	9.5	60	44.53
8	3.0	10.0	40	48.91
9	3.0	10.5	50	65.39
k_1	102.71	112.49	113.27	
k_2	152.39	144.15	162.95	
k_3	158.83	157.29	137.71	
R	18.71	14.93	16.56	

采用极差分析法分析正交试验结果,由 R 值可以看出,影响超声脱氮的主次因素为 $R_1 > R_3 > R_2$,因此,超声时间、pH 值和超声功率 3 因素对沼液超声脱氮的主次顺序为超声时间 > 超声功率 > pH 值。最佳超声脱氮试验条件超声时间为 3 h,超声功率为 50 W,沼液 pH 值为 10.5 时,沼液总氮、氨氮去除率分别达到 65.39%、68.84%。

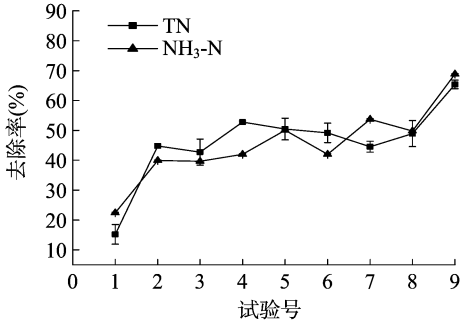


图6 正交试验组对沼液脱氮的影响

2.2 光催化反应对沼液脱氮的影响

2.2.1 光照时间对沼液脱氮的影响 利用自行设计的光催

化反应器,量取 1 000 mL 沼液,在蠕动泵流速为 4.0 mL/s 的条件下,考察不同紫外光照时间 10、20、30、60、90、120 min 对沼液光催化脱氮处理的影响,结果见图 7。随着光照时间的增加氮的去除率稳步增长,在光照 90 min 时,沼液的总氮、氨氮去除率达到最大,分别为 43.98%、38.54%,因为在光照强度稳定时,体系中的·OH 和·O₂⁻ 的数目随着光照时间的延长而增加,当光照达到一定的时间后,水中的氮类化合物已被这些自由基矿化去除。但在 120 min 光照催化反应后,沼液的总氮和氨氮去除出现下降趋势,原因可能是随着时间的延长,沼液中的有机物逐渐慢慢地吸附在光催化剂表面,不利于光电子的激发,也阻碍了紫外光与光催化剂的接触,从而降低了光催化的氧化作用,导致了沼液脱氮去除率的降低。

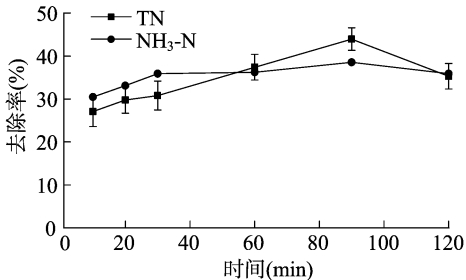


图7 光照时间对沼液脱氮的影响

2.2.2 pH 值对沼液脱氮的影响 在蠕动泵流速为 4.0 mL/s,紫外光照时间为 90 min 的条件下,考察不同 pH 值 (7.5、8.0、8.5、9.0、9.5、10.0) 对沼液脱氮的影响,结果见图 8。随着 pH 值的不断升高氮的去除率出现先升高后降低的现象,这是由于 pH 值太大或太小影响半导体催化剂的价带空穴和导带电子的转移,都不利于·OH 自由基的稳定存在,从而影响降解的速率,只有在其最佳的 pH 值附近才能最大发挥羟基自由基的氧化效应,而不同光催化体系都会有自身最佳的 pH 范围,所以在这个最佳 pH 之后去除效果都会呈现下降趋势。当 pH 值为 8.0 时,光催化处理后的沼液脱氮效果最好,总氮去除率达到 42.99%,氨氮去除率达到 38.81%。

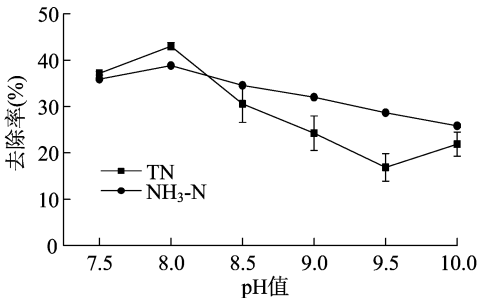


图8 pH 值对沼液脱氮的影响

2.2.3 流速对沼液脱氮的影响 在光照时间为 90 min 和沼液 pH 值为 8.0 的条件下,考察不同流速 2.0、3.0、4.0、5.0、6.0、8.0 mL/s 对沼液脱氮的影响,结果见图 9。随着流速的不断增大氮的去除率出现先高后低的现象,原因可能是流速过大造成沼液中的有机氮化物与活性氧化铝表面的 TiO₂ 接触不充分,加上单位体积内接受光照的时间较短,导致沼液流速增大而脱氮效果降低。当流速为 4.0 mL/s 时,总氮、氨氮去除率最高,分别达到 43.87%、39.08%。

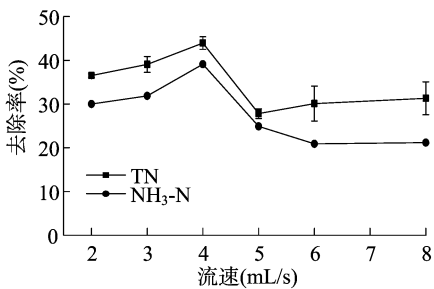


图9 流速对沼液脱氮的影响

2.2.4 正交试验确定光催化最佳脱氮条件 根据单因素试验结果,对影响光催化脱氮主要因素进行正交试验,并对结果进行极差分析,确定最佳光催化脱氮条件。选定光照时间、沼液 pH 值、流速作为影响处理效果的 3 个主要因素,每个因素选定 3 个水平(表 3)。

表 3 沼液脱氮处理最佳光催化条件的正交试验结果

试验号	光照时间(h)	pH 值	流速(mL/s)	总氮去除率(%)
1	1.0	7.5	3.0	33.97
2	1.0	8.0	4.0	44.76
3	1.0	8.5	5.0	24.75
4	1.5	7.5	4.0	37.21
5	1.5	8.0	5.0	27.65
6	1.5	8.5	3.0	29.14
7	2.0	7.5	5.0	25.28
8	2.0	8.0	3.0	30.37
9	2.0	8.5	4.0	27.38
k ₁	103.48	96.46	93.48	
k ₂	94.00	102.78	109.35	
k ₃	83.03	81.27	77.68	
R	6.82	7.17	10.56	

正交试验结果见表 3、图 10,采用极差分析法分析正交试验结果,由 R 值可以看出,影响光催化脱氮的主次因素为 R₃ > R₂ > R₁,因此光照时间、pH 值、流速 3 因素对沼液光催化脱氮的主次顺序为流速 > pH 值 > 光照时间。最佳光催化脱氮试验条件光照时间为 1.0 h,沼液 pH 值为 8.0,流速为 4.0 mL/s 时,沼液总氮、氨氮去除率分别达到 44.76%、39.90%。

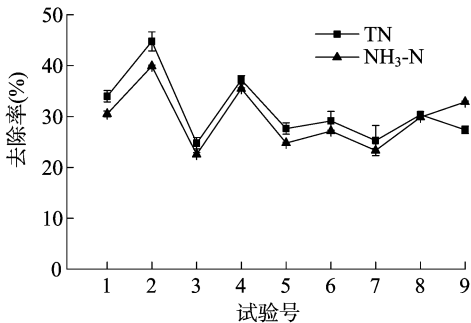


图10 正交试验组对沼液脱氮的影响

2.3 光催化联合超声波处理沼液

在光照时间为 1.0 h、沼液 pH 值为 8.0、流速为 4.0 mL/s 的条件下,采用光催化对沼液进行处理,处理后的出水(pH 值为 9.4)分成 2 批再进行超声波处理,进一步在超声时间为

3.0 h 和超声功率为 50 W 的条件下,一批不作任何处理直接进行超声,另一批调节最适 pH 值 10.5 再进行超声波处理,结果见图 11。经单独光催化反应处理后的沼液总氮、氨氮去除率分别为 44.19%、40.84%;光催化联合超声波(未调 pH)处理后的沼液总氮、氨氮去除率分别为 63.37% 和 66.08%;而光催化联合超声波(调 pH 值至 10.5)处理后的沼液总氮、氨氮去除率分别为 84.21%、83.58%。表明超声联合光催化对沼液脱氮的效果明显高于单方法脱氮的效果,联用方法实现了二者的协同效应,更彻底地降解了水中的有机污染物。

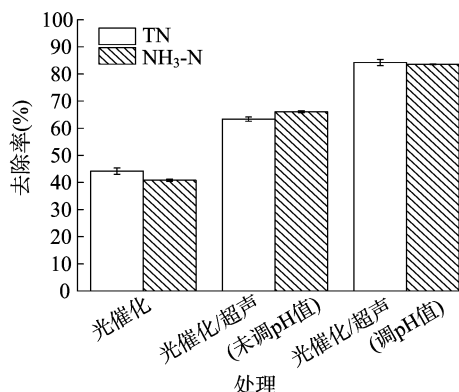


图11 光催化联合超声波对沼液脱氮效果比较

3 结论

通过超声波、二氧化钛光催化反应以及超声波联用二氧化钛光催化反应分别对沼液进行了脱氮处理,结果表明,联合方法处理后达到的脱氮效果明显高于单独超声和二氧化钛光催化处理,处理后的沼液总氮及氨氮去除率分别达到 84.21% 和 83.58%,实现了联用方法的协同效应,使在沼液脱氮去除率方面达到了最优化。

参考文献:

- [1] 叶小梅,常志州,钱玉婷,等. 江苏省大中型沼气工程调查及沼液生物学特性研究[J]. 农业工程学报,2012,28(6):222-227.
- [2] 李景明,孙玉芳. 大中型畜禽养殖场沼气工程发展的障碍因素分析[J]. 农业工程学报,2003,19(增刊1):163-167.
- [3] 张国治,吴少斌,王焕玲,等. 大中型沼气工程沼渣沼液利用意愿现状调研及问题分析[J]. 中国沼气,2010,28(1):21-24.
- [4] 倪亮,孙广辉,罗光恩,等. 沼液灌溉对土壤质量的影响[J]. 土壤,2008,40(4):608-611.
- [5] 刘荣厚,郝元元,叶子良,等. 沼气发酵工艺参数对沼气及沼液成分影响的实验研究[J]. 农业工程学报,2006,22(增刊1):85-88.
- [6] Kitzing L, Mitchell C, Morthorst P E. Renewable energy policies in Europe: converging or diverging? [J]. Energy Policy, 2012, 51(12):192-201.
- [7] Tricase C, Lombardi M. State of the art and prospects of Italian biogas production from animal sewage: technical - economic considerations [J]. Renewable Energy, 2009,34(3):477-485.
- [8] 陈思琳,刘方,张登宇,等. 木炭和活性炭对沼液中氨态氮、总磷和化学需氧量的吸附效果[J]. 贵州农业科学,2012,40(3):204-206,210.
- [9] 骆林平. 沼液浓缩液与化肥配施对水稻和油菜产量及品质的影

- 响[D]. 杭州:浙江农林大学,2010.
- [10] 孙大鹏,孙宏亮,胡博. 浅论地下水中的氮污染[J]. 地下水, 2007,29(1):68-71.
- [11] 刘钰畴. 污水脱氮技术浅析[J]. 有色冶金设计与研究,2002, 23(1):26-28,51.
- [12] 董涛. SBR 反应器中同步硝化反硝化影响因素研究[D]. 天津:天津大学,2007.
- [13] 张璐. 常温短程硝化反硝化的启动及过程控制研究[D]. 天津:天津大学,2008.
- [14] Feleke Z, Sakakibara Y. A bio - electrochemical reactor coupled with adsorber for the removal of nitrate and inhibitory pesticide[J]. Water Research,2002,36(12):3092-3102.
- [15] 环境保护部.《全国畜禽养殖污染防治“十二五”规划》发布[J]. 养殖与饲料,2013(3):64.
- [16] Schoeman J J, Steyn A. Nitrate removal with reverse osmosis in a rural area in South Africa[J]. Desalination,2003,155(1):15-26.
- [17] Jiang Y, Pétrier C, Waite T D. Kinetics and mechanisms of ultrasonic degradation of volatile chlorinated aromatics in aqueous solutions[J]. Ultrasonics Sonochemistry,2002,9(6):317-323.
- [18] 姜金生. 水污染治理新工艺设计[M]. 北京:北京海洋出版社,1999.
- [19] 陈坚. 环境生物技术[M]. 北京:中国轻工业出版社,1999.
- [20] 宋卫锋,骆定法,王孝武,等. 折点氯化法处理高 NH₃-N 含钴废水试验与工程实践[J]. 环境工程,2006,24(5):12-13.
- [21] 郭文倩. 电化学法降解焦化废水中的氨氮[D]. 太原:太原理工大学,2007.
- [22] 费宇雷,曹国民,张立辉,等. 离子交换树脂脱除地下水中的硝酸盐[J]. 净水技术,2011,30(1):20-24.
- [23] Boumediene M, Achour D. Denitrification of the underground waters by specific resin exchange of ion [J]. Desalination, 2004, 168: 187-194.
- [24] 高远,徐安武,刘汉钦. 掺铁 TiO₂ 用于 NO₂⁻ 光催化降解研究[J]. 中山大学学报:自然科学版,2000,39(5):44-48.
- [25] 祝静艳,曾玉燕,匡代彬,等. 弱紫外光下 NO_x 气相光催化氧化研究[J]. 中山大学学报:自然科学版,2001,40(6):31-34.
- [26] Yu J C, Lin J, Kwok R W. Enhanced photocatalytic activity of Ti_{1-x}V_xO₄ solid solution on the degradation of acetone[J]. Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry, 1997, 111 (1/2/3):199-203.
- [27] Hoffmann M R, Martin S T, Choi W Y, et al. Environmental applications of semiconductor photocatalysis[J]. Chemical Reviews, 1995, 95(1):69-96.
- [28] Rosenberg I, Brock J R, Heller A. Collection optics of TiO₂ photocatalyst on hollow glass microbeads floating on oil slicks[J]. The Journal of Physical Chemistry, 1992, 96(8):3423-3428.
- [29] Chen X B, Mao S S. Titanium dioxide nanomaterials: synthesis, properties, modifications, and applications [J]. Chemical Reviews, 2007,107(7):2891-2959.
- [30] Pelaez M, Nolan N T, Pillai S C, et al. A review on the visible light active Titanium dioxide photocatalysts for environmental applications [J]. Applied Catalysis B - Environmental, 2012, 125:331-349.
- [31] 彭人勇,陈康康,李艳琳. 超声吹脱去除氨氮的机理和动力学研究[J]. 环境工程学报,2010,4(12):2811-2814.
- [32] 平凡. 超声吹脱去除水中高浓度氨氮的方法研究[D]. 天津:天津大学,2012.