

海水电池处理模拟海水养殖废水

李忠贵 张秋婷 陈日耀* 陈晓 郑曦

(1. 福建师范大学环境科学与工程学院,福州 350007;2. 福建省污染控制与资源循环利用重点实验室,福州 350007)

摘要 随着中国海水养殖业的迅猛发展,海水养殖废水排放量与日俱增,近海水域环境严重恶化。采用海水电池处理模拟海水养殖废水,以镁为电池负极,钛为电池正极。镁负极失去电子产生 Mg^{2+} ,与废水中的 NH_4^+ 、 PO_4^{3-} 结合生成磷酸铵镁 ($MgNH_4PO_4 \cdot 6H_2O$, MAP),将废水中的 NH_4^+ 和 PO_4^{3-} 去除。结果表明,当 pH 为 9.5,氮磷配比为 1:1.1 时,氮的去除率可达 85.34%,磷的去除率可达 98.46%。利用正交实验研究 pH、初始氨氮浓度、氮磷比和 COD 4 个因素对氮磷去除的影响,氨氮初始浓度、COD 分别对氮、磷的去除影响最大。多个电池串联时,总输出电压是各电池电压之和。

关键词 海水电池;海水养殖废水;氨氮;磷酸盐;磷酸铵镁

中图分类号 X55 文献标识码 A 文章编号 1673-9108(2016)11-6300-07 DOI 10.12030/j.cjee.201506124

Treatment of simulant marine aquaculture wastewater using sea-water battery

LI Zhonggui ZHANG Qiuting CHEN Riyao* CHEN Xiao ZHENG Xi

(1. College of Environmental Science and Engineering, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China;

2. Fujian Key Laboratory of Pollution Control & Resource Reuse, Fuzhou 350007, China)

Abstract With the rapid development of Chinese marine aquaculture, wastewater emissions have increased greatly, causing severe deterioration of the coastal environment. Simulated marine aquaculture wastewater was treated by seawater battery using magnesium and titanium as cathode and anode respectively. Mg^{2+} ions produced on the magnesium cathode were combined with NH_4^+ and PO_4^{3-} ions in the wastewater to generate $MgNH_4PO_4 \cdot 6H_2O$ precipitate (MAP), thereby removing NH_4^+ and PO_4^{3-} ions. Experimental results showed that the removal rates of ammonia nitrogen and phosphate were as high as 85.34% and 98.46% when pH was 9.5, and the ratio of nitrogen to phosphorus was 1:1.1. The effects of four factors (pH, initial ammonia concentration, nitrogen: phosphorus ratio, and COD) on the removal of nitrogen and phosphorus were studied by an orthogonal test. Initial ammonia concentration and COD were the most important factors for the removal of nitrogen and phosphorus respectively. When multiple batteries were connected in series, the total output voltage was the sum of each battery voltage.

Key words sea-water battery; marine aquaculture wastewater; ammonia nitrogen; phosphate; magnesium ammonium phosphate

近年来,我国海水养殖业发展迅速,养殖产量已连续多年居世界首位。同时,海水养殖废水排放量也超过陆源污水排放量^[1]。海水养殖废水中主要废物有残饵、排泄物、化学物质、治疗性药物残留、养殖生物死体及病原体^[2]。养殖废水大量排放使得水体中氮、磷等营养物质急剧增加,导致水体富营养化或水质恶化^[3]。提出生物、水文和气象条件会引起赤潮的发生^[4]。

海水养殖废水与工业废水和生活污水相比,有两个明显的特点,即潜在污染物的含量低和水量大^[5]。由于海水的盐度效应和海水养殖废水污染结构的特殊性,增加了养殖废水的处理难度。目前,国内外海水养殖废水处理方法主要有物理、化学和生物法等几类。物理方法是用沉淀池沉淀、砂滤池

基金项目:福建省科技厅重点项目(2012H0019);福州市科技局项目(2012-G-116);福建省自然科学基金项目(2013J01034)

收稿日期:2015-06-17;修订日期:2015-12-22

作者简介:李忠贵(1991—),男,硕士研究生,研究方向:污染治理及资源化。E-mail: lzg8013@163.com

* 通讯联系人, E-mail: rychen@fjnu.edu.cn

过滤和用沸石粉吸附等,将水中的杂质和污物去除,但对可溶性有机物^[6]、无机物及总 N、P 等的去除效果不佳。早期使用的海水养殖废水化学处理方法,如硫酸铜、漂白粉、孔雀石绿等水质改良剂虽然对养殖废水的处理有一定效果,但会对环境产生二次污染,有的方法还会对人体造成伤害,现在已禁止使用^[7]。目前,海水养殖废水生化处理方法中应用较多的是生物接触氧化、生物转盘和生物流化床^[8]等工艺,与物化技术相比具有投资低、不易产生二次污染等优点。但由于养殖废水的盐度效应,使得这些工艺中生物相总体代谢选择性和有效微生物比例较低,系统的单位体积处理负荷不高,而且处理周期较长。

海水电池泛指以海水作为电解质的电池^[9]。它依靠阳极金属材料在海水中腐蚀溶解提供阳极放电电流,阴极则依靠海水中的溶解氧在惰性电极上还原提供阴极电流^[10]。成功应用在大功率海水电池中的阳极材料主要有镁合金和铝合金^[11]。

本研究结合海水电池技术和化学沉淀法对模拟海水养殖废水进行处理,去除其中的氮和磷。此外,阳极产生的 Mg^{2+} 与废水中的 NH_4^+ 、 PO_4^{3-} 结合生成 $MgNH_4PO_4 \cdot 6H_2O$,是一种杂质含量低、肥效释放较缓慢的农业肥料^[12],从而达到废物资源化利用的目的,同时还可以对外输出一定的电能。利用海水电池处理海水养殖废水尚未见有相关报道。

1 实验部分

1.1 药品、仪器及测定方法

氯化铵、磷酸二氢铵、磷酸二氢钾、酒石酸钾钠、碘化汞、碘化钾、乙二胺四乙酸二钠、抗坏血酸、钼酸铵、酒石酸锑钾、甲酸、氯化钾、氯化钙、氯化钠、硫酸钠、碳酸氢钠、溴化钾、硼酸、氟化钠和葡萄糖等,以上药品均为分析纯试剂,由上海国药集团化学试剂有限公司提供。

S22PC 可见分光光度计(上海棱光技术有限公司);PHS-3C 型 pH 计(雷磁,上海仪电科学仪器股份有限公司)。

氨氮浓度采用纳氏试剂分光光度法测定,磷浓度采用钼酸铵分光光度法测定,COD 采用碱性高锰酸钾法测定。

1.2 实验水质及实验方法

实验所用废水是根据南方某海水水产养殖区水质配置的模拟海水养殖废水,其中各组成成分见表

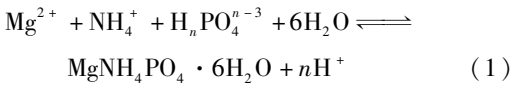
1^[13]。控制其盐度为 35‰,通过投加不同量的 NH_4Cl 及 KH_2PO_4 来调节废水中氨氮及磷酸盐的含量, NH_4^+ -N 浓度范围为 $100 \sim 500 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, PO_4^{3-} -P 浓度范围为 $221.4 \sim 1\,107.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,以葡萄糖作为模拟有机污染物,来调节模拟废水的 COD^[14],COD 范围为 $0 \sim 300 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。

表 1 模拟海水养殖废水成分及含量
Table 1 Composition and content of simulant mariculture wastewater

成分	含量/(g · L ⁻¹)	成分	含量/(g · L ⁻¹)
NaCl	29.724	NaHCO ₃	0.196
KCl	0.667	KBr	0.098
CaCl ₂	1.147	H ₃ BO ₃	0.026
Na ₂ SO ₄	4.004	NaF	0.003

以镁板(电极面积 11.4 cm^2)为电池负极,钛板为电池正极,将其插入模拟废水中,用导线将两电极连接形成回路。电槽置于磁力搅拌器上,以使整个实验过程溶液保持均匀混合,避免产生浓差极化。pH 计置于反应器中,实时监控废水的 pH 值,并通过滴加适量盐酸控制反应体系的 pH 值。

镁负极失去电子,生成镁离子,与废水中的氨氮和磷酸盐结合生成 $MgNH_4PO_4 \cdot 6H_2O$ 沉淀,氨氮和磷酸盐得以去除。



式中: $n = 0、1、2$, n 的具体取值决定于溶夜的 pH 值。

1.3 实验装置图

本研究采用的实验装置如图 1 所示。

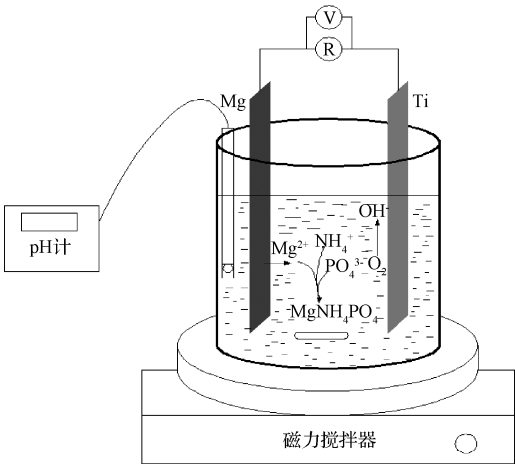


图 1 实验装置图

Fig. 1 Diagram of experimental device

2 结果与讨论

2.1 pH 值对氨氮和磷去除率的影响

反应体系的 pH 值是影响该技术脱氮除磷效果的关键因素之一。pH 值会影响磷酸盐及氨氮的存在形式,进而影响磷酸铵镁的生成。在氨氮初始浓度为 $300\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,氮磷摩尔比为 $1:1$,在整个处理过程中通过滴加适量盐酸控制反应体系的 pH 值分别保持在 6、7、8、9、9.5、10、11 和 12,考察在不同 pH 值下脱氮除磷的效果,其结果如图 2 所示(重复实验 3 次,取平均值,下同)。

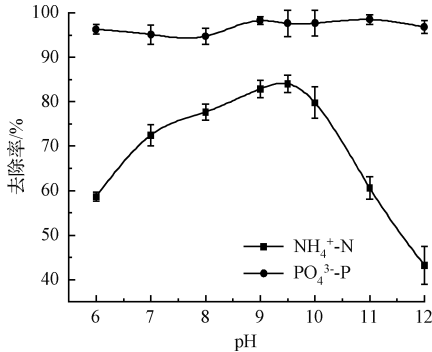


图 2 不同 pH 下氨氮和磷酸盐去除率的变化
Fig.2 Changes of removal rates of ammonia nitrogen and phosphate with pH

从图 2 可知,氨氮去除率随着 pH 值的增大先增大后减小。当 pH 为 9.5 时,氨氮的去除率达到最大,为 84.02%。而磷的去除率随着 pH 值的增大变化不大,在 95% 左右上下波动。体系 pH 值不同,会影响氨氮和磷酸盐的存在形式,从而影响生成磷酸铵镁的反应程度^[15]。随着反应体系 pH 值逐渐下降,生成 $\text{MgNH}_4\text{PO}_4\cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 反应可逆向进行,且容易生成 $\text{Mg}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ 沉淀,影响氨氮的去除率。反之,随着反应体系 pH 值不断提高, Mg^{2+} 易与 PO_4^{3-} 结合生成 $\text{Mg}_3(\text{PO}_4)_2$ 沉淀,影响 $\text{MgNH}_4\text{PO}_4\cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 的生成^[16],降低氨氮的去除率。因此,磷在不同 pH 值下都能维持较高的去除率,而 pH 约为 9.5 时,氨氮的去除率才能达到最大。

2.2 初始浓度对氨氮和磷去除率的影响

在 pH 值为 9.5,氮磷摩尔比为 $1:1$ 时,研究了不同氨氮初始浓度下氮磷的去除率,其结果见图 3 和图 4。从图 3 和 4 可知,氨氮的去除率随着处理时间的延长而不断增大,并逐渐趋于一最大值,且达

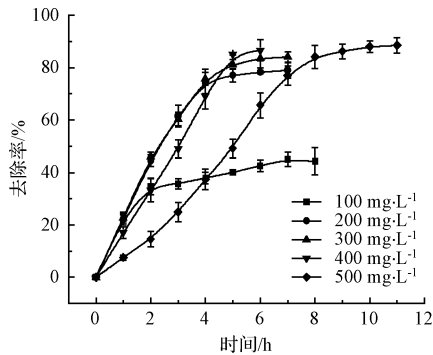


图 3 不同初始氨氮浓度下氨氮去除率随时间的变化
Fig.3 Changes of removal rate of ammonia nitrogen with time for different initial ammonia concentration

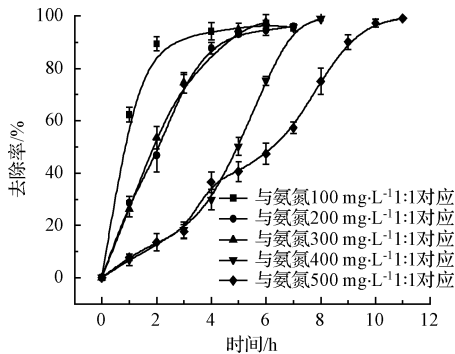


图 4 不同初始氨氮浓度下磷去除率随时间的变化
Fig.4 Changes of removal rate of phosphate with time for different initial ammonia concentration

到最大值所需时间随着氨氮浓度的增大而增加。这是因为,镁阴极失去电子生成 Mg^{2+} 的速率是一定的,氨氮的浓度越高,生成 $\text{MgNH}_4\text{PO}_4\cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 所需的 Mg^{2+} 也越多,处理时间也就越长。此外,还可看到,随着氨氮浓度增大,氨氮的最大去除率也相应略有增大,氨氮浓度 $\geq 400\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,其去除率达到最大。

与氨氮去除率变化趋势相似,磷的去除率也随着处理时间的延长而不断增大,并逐渐趋于一最大值,同样的原因,达到最大值所需的时间也随着磷浓度的增大而增加。在各种浓度下磷的去除率均能达到 95% 以上,说明磷的初始浓度对其最终去除率影响不大。

2.3 不同氮磷配比下氮和磷的去除率

在 pH 为 9.5,氨氮初始浓度为 $300\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,处理时间为 7 h 时,考察了不同氮磷摩尔比对氮磷去除率的影响,结果见图 5。

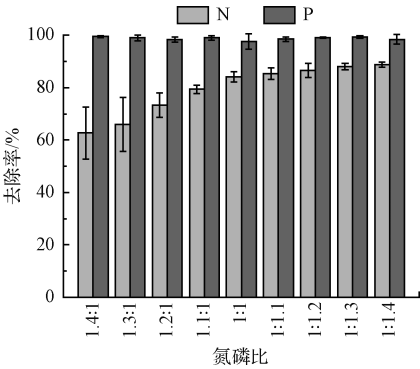


图 5 不同氮磷配比下的氮磷去除率

Fig.5 Removal rates of nitrogen and phosphorus for different ratio of nitrogen and phosphorus

由图 5 可知,当氮磷摩尔比大于 1 : 1 时,随着氮磷比的逐渐减小,氨氮的去除率呈上升趋势,当氮磷比小于等于 1 : 1 时,氮磷比的变化对氨氮去除率影响不大。这是因为在 pH 等于 9.5 时,磷酸盐基本上是以 PO_4^{3-} 的形式存在,因此在磷酸盐含量未达到生成 $\text{MgNH}_4\text{PO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 所需的化学剂量之前,提高磷的含量可以明显提高氨氮的去除率^[17],而当磷酸盐的量达到生成 $\text{MgNH}_4\text{PO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 所需的化学剂量之后,磷酸盐的增加对氨氮的去除率不会产生太大的影响,因为多余的磷酸盐会和 Mg^{2+} 结合生成 $\text{Mg}_3(\text{PO}_4)_2$ 沉淀被去除。所以,不论氮磷比是多少,磷的去除率均较高,可达 95% 以上。考虑到对氨氮的处理效果以及处理成本,氮磷比以 1 : 1 或略低(1 : 1.1)为宜。

2.4 废水的 COD 对氮磷去除的影响

在 pH 为 9.5,氨氮初始浓度为 $300\text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,氮磷比为 1 : 1.1,处理时间为 7 h 时,考察了模拟海水养殖废水不同 COD 对氮磷去除率的影响(葡萄糖作为模拟有机污染物),结果见图 6。

从图 6 可知,随着废水 COD 值的上升,相同处理时间,氨氮的去除率(见图 6(a))和磷的去除率(见图 6(b))均有所下降,处理时间增加。这可能是由于随着模拟海水养殖废水 COD 的上升,添加的葡萄糖量增加,而葡萄糖含有大量的羟基,使得葡萄糖易于附着在镁电板表面,阻碍了镁失去电子形成镁离子的扩散和与氨氮和磷生成磷酸铵镁沉淀,从而使得所需处理时间延长。从图 6 还可知,在相同的 COD 条件下,氨氮的去除率要略高于磷的去除率,这可能是由于葡萄糖的存在,影响了纳氏试剂与氨氮的反应,造成测定值偏低,氨氮的表现去除率有

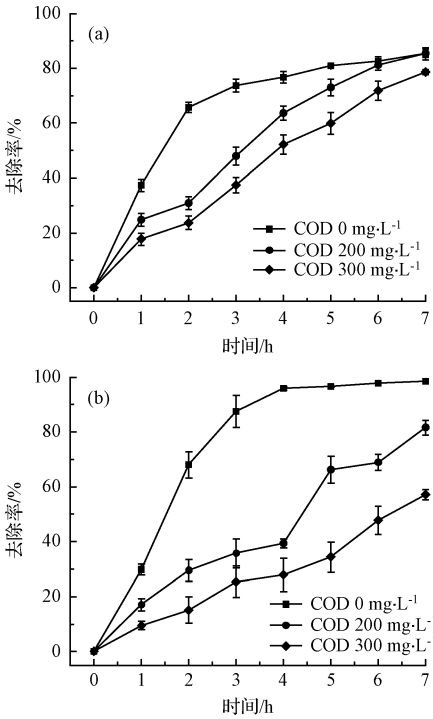


图 6 不同 COD 下氨氮(a)和磷(b)去除率随时间的变化

Fig.6 Changes of removal rates of ammonia nitrogen (a) and phosphorus (b) with time for different COD

所上升。

2.5 影响氮磷去除的各因素重要性分析

为探究模拟海水养殖废水中氮磷去除的各影响因素的重要性,采用 4 因素 4 水平的 L_{16} (4^4) 正交实验进行确定。4 个因素为 pH、初始氨氮浓度、氮磷比(摩尔比)、COD 值,设计正交实验见表 2。

表 2 正交实验因素及水平				
Table 2 Orthogonal test factor and level				
水平	A pH	B 初始 $\text{C}_{\text{NH}_4^+-\text{N}}/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	C 氮磷比	D $\text{COD}/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$
1	8	100	1.2 : 1	0
2	9	200	1.1 : 1	100
3	9.5	300	1 : 1	200
4	10	400	1 : 1.1	300

正交实验所得的氨氮及磷的去除率数据和极差分析如表 3 所示。从表 3 可知,如果以氨氮的去除率来分析时,各影响因素的重要性顺序为:氨氮初始浓度 > 氮磷比 > pH > COD;而以磷的去除率来分析时,重要性最高的因素为 COD 大小,氨氮初始浓度,氮磷比和 pH 对磷去除影响较小。

表 3 正交实验结果及分析
Table 3 Orthogonal test results and analysis

实验编号	A	B	C	D	氨氮 去除率/%	磷 去除率/%
1	8	100	1.2: 1	0	25.24	93.86
2	8	200	1.1: 1	100	69.37	86.32
3	8	300	1: 1	200	76.50	80.52
4	8	400	1: 1.1	300	78.46	61.79
5	9	100	1.1: 1	200	38.76	75.33
6	9	200	1.2: 1	300	62.12	53.66
7	9	300	1: 1.1	0	82.36	97.67
8	9	400	1: 1	100	82.62	89.04
9	9.5	100	1: 1	300	40.19	52.26
10	9.5	200	1: 1.1	200	76.89	78.00
11	9.5	300	1.2: 1	100	68.95	88.23
12	9.5	400	1.1: 1	0	82.57	99.15
13	10	100	1: 1.1	100	37.96	85.01
14	10	200	1: 1	0	69.86	98.50
15	10	300	1.1: 1	300	72.43	57.33
16	10	400	1.2: 1	200	67.17	81.38
均值 1	62.40(80.62)	35.54(76.62)	55.87(79.28)	65.01(97.30)		
均值 2	66.47(78.93)	69.56(79.12)	65.78(78.53)	64.73(87.15)		
均值 3	67.15(79.41)	75.05(80.94)	67.29(80.08)	64.83(78.81)		
均值 4	61.85(80.56)	77.71(82.84)	68.92(80.62)	63.30(56.26)		
极差	5.30(1.69)	42.17(6.22)	13.05(2.09)	1.71(41.04)		

注:括号内数据为以磷去除率分析所得

根据正交实验结果,最优的条件组合是 pH 值 9.5、初始氨氮浓度 $400\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、氮磷比 1.1:1、COD 值为 0,这与前述的实验结果大体一致(即 pH 值 9.5、初始氨氮浓度 $400\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、氮磷比 1:1 或略低、COD 值 0)。主要差异在于根据正交实验结果,最优的氮磷比为 1.1:1,前述实验结果氮磷比宜为 1:1 或略低。从不同氮磷配比下氮和磷的去除实验结果可知,氮磷比对磷的去除率影响不大。氮磷比达 1:1 前后,氨氮的去除率差异不大,在 80%~85% 之间。

2.6 处理装置

2.6.1 电池串联对输出电压影响

海湾网箱养殖区,通常与海岸有一定距离,电力输送存在困难,如何获得生活、工作所需的充足电力一直是困扰养殖户的一大难题。海水电池不仅可以有效地去除养殖海水中氮磷污染物,变废为宝,还可提供养殖户所需的能源。且海水电池所提供的能源与其他能源,如太阳能、风能等相比,受气候的影响较小,输出的能量较为稳定。

由图 7 可知,将两个输出电压约为 1.5 V 的海水电池串联后,其输出电压约为 3.0 V。因此,在实

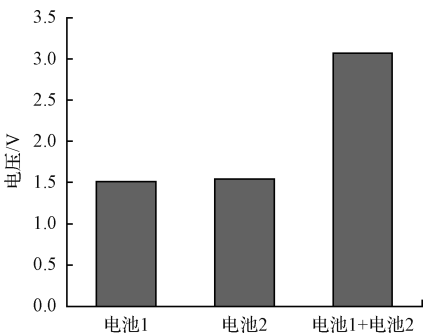


图 7 海水电池串联时电压

Fig. 7 Voltage of sea-water battery when connected in series

际处理海水养殖废水过程中,可将几个甚至几十、上百个海水电池串联,形成电池堆,以提高输出电压。

2.6.2 处理装置

根据以上实验结果以及实际应用环境条件,设计了如下处理海水养殖废水的电池堆装置。

该装置可根据实际需要定制电池堆的废水处理单元数,通过控制气囊的充气量来调节其浮在水面上的高度;装置设有泥斗,便于磷酸铵镁的收集,回收利用;电池堆产生的电储存于蓄电池中,以提供养殖过程中所需的部分电力。

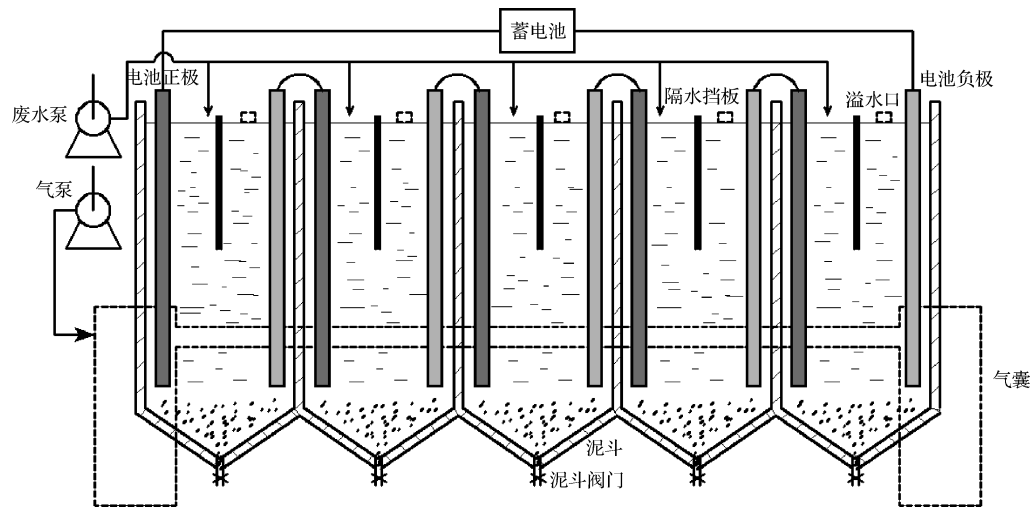


图 8 海水电池堆处理装置

Fig. 8 Processing device of sea-water battery stack

该处理装置处理海水养殖废水简单经济核算数据见表 4。模拟废水的主要指标:氨氮浓度:308 mg · L⁻¹,磷酸盐磷浓度:735.7 mg · L⁻¹, COD: 200 mg · L⁻¹, pH: 9.5, 处理时间: 7 h,氨氮去除率: 86.5%,磷去除率:79.75%。

由表 4 可知,处理 1 t 海水养殖废水可产生净效益 4.42 元(其中,不包括设备折旧费、人工费及水泵等辅助设备所需动力电等费用)。

表 4 经济核算数据

Table 4 Economic calculation data

Mg 电极板消耗量/(g · (500 mL 废水) ⁻¹)	0.35
Mg 板价格/(元 · kg ⁻¹)	20
Mg 电极板消耗成本/(元 · (500 mL 废水) ⁻¹)	0.007
生成 MgNH ₄ PO ₄ · 6H ₂ O 量/(元 · (500 mL 废水) ⁻¹)	2.65
MgNH ₄ PO ₄ · 6H ₂ O 价格/(元 · t ⁻¹)	3 000
MgNH ₄ PO ₄ · 6H ₂ O 产生效益/(元 · (500 mL 废水) ⁻¹)	0.007 95
产生电量/(kW · h · (500 mL 废水) ⁻¹)	0.002 1
电效益/(元 · (500 mL 废水) ⁻¹)	0.001 26
总效益/(元 · (500 mL 废水) ⁻¹)	0.009 21
总成本/(元 · (500 mL 废水) ⁻¹)	0.007
吨废水处理净效益/(元 · (t 废水) ⁻¹)	4.42

3 结 论

以镁为原电池负极,钛为原电池正极,镁负极放电产生的 Mg²⁺,可与海水养殖废水中的 NH₄⁺、PO₄³⁻结合生成 MgNH₄PO₄ · 6H₂O 沉淀,从而去除废水中的氮磷,MgNH₄PO₄ · 6H₂O 是一种有价值的农业肥料,变废为宝,而且通过电池的串联,可提高电池堆

的输出电压,提供养殖户所需的部分能源。实验结果表明,海水电池在 pH 为 9.5,氮磷配比为 1:1.1,处理效果最佳,氮的去除率可达 85.34% 以上,磷的去除率可达 98.46% 以上;通过正交实验确定了氨氮初始浓度、COD 浓度分别对氮、磷的去除率影响最大。

参 考 文 献

[1] 宋志文,王玮,赵丙辰,等. 海水养殖废水的生物处理技术研究进展. 青岛理工大学学报, 2006, 27(1): 13-17
SONG Zhiwen, WANG Wei, ZHAO Bingchen, et al. Development of marine aquaculture wastewater bio-treatment technology. Journal of Qingdao technological University, 2006, 27(1): 13-17 (in Chinese)

[2] 卜雪峰,曲克明,马绍赛,等. 海水养殖废水的处理技术及应用前景. 海洋水产研究, 2003, 24(4): 85-90
PU Xuefeng, QU Keming, MA Shaosai, et al. Mariculture wastewater treatment technology and its application prospect. Marine Fisheries Research, 2003, 24(4): 85-90 (in Chinese)

[3] PIEDRAHITA R. H. Reducing the potential environmental impact of tank aquaculture effluents through intensification and recirculation. Aquaculture, 2003, 226 (1/2/3/4): 35-44

[4] 李红山,黎松强. 水体富营养化的生化防治机理——污水深度处理与脱氮除磷. 海洋科学, 2002, 26(6): 31-34
LI Hongshan, LI Songqiang. Prevention and cure of nutro-

- hication in cultured water body by biochemical prevention mechanism. *Marine Sciences*, **2002**, 26(6): 31-34 (in Chinese)
- [5] CRIPPS S. J. Minimizing outputs: Treatment. *Journal of Applied Ichthyology*, **2007**, 10(4): 284-294
- [6] 李来阳, 谢卫兵. 海水养殖废水处理技术研究进展. 河北渔业, **2009** (5): 46-50
LI Laiyang, XIE Weibing. Advances in waste water treatment in marine culture. *Hebei Fisheries*, **2009** (5): 46-50 (in Chinese)
- [7] 生物净水技术在我国水产养殖业中的应用现状和前景. 中国水产, **2001** (1): 86
Application status and prospects of biological purification technology in aquaculture. *China Fisheries*, **2001** (1): 86 (in Chinese)
- [8] TAL Y., WATTS J. E. M., SCHREIER S. B., et al. Characterization of the microbial community and nitrogen transformation processes associated with moving bed bioreactors in a closed recirculated mariculture system. *Aquaculture*, **2003**, 215(1/2/3/4): 187-202
- [9] 宋文顺. 化学电源工艺学. 北京: 中国轻工业出版社, **1998**
- [10] 冯艳, 王日初, 彭超群. 海水电池用镁阳极的研究与应用. 中国有色金属学报, **2011**, 21(2): 259-268
FENG Yan, WANG Richu, PENG Chaoqun. Researches and applications of magnesium anode materials in seawater battery. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, **2011**, 21(2): 259-268 (in Chinese)
- [11] LI Qingfeng, BJERRUM N. J. Aluminum as anode for energy storage and conversion: A review. *Journal of Power Sources*, **2002**, 110(1): 1-10
- [12] YE Zhilong, SHEN Yin, YE Xin, et al. Phosphorus recovery from wastewater by struvite crystallization: Property of aggregates. *Journal of Environmental Sciences*, **2014**, 26(5): 991-1000
- [13] 王文华, 张晓青, 邱金泉, 等. 磷酸铵镁(MAP)沉淀法处理低浓度氨氮污水. 化工进展, **2014**, 33(1): 228-232
WANG Wenhua, ZHANG Xiaoqing, QIU Jinqian, et al. Low concentrated ammonia nitrogen removal in contaminated seawater by MAP precipitation method. *Chemical Industry and Engineering Progress*, **2014**, 33(1): 228-232 (in Chinese)
- [14] 卢芳芳. 动态膜生物反应器用于海水养殖废水的脱氮效果研究. 厦门: 华侨大学硕士学位论文, **2012**
LU Fangfang. Study on nitrogen removal effect of dynamic membrane bioreactor for mariculture wastewater treatment. Xiamen: Master Dissertation of Huaqiao University, **2012** (in Chinese)
- [15] 王晓丹, 汤琪. 磷酸铵镁沉淀法预处理垃圾渗滤液. 环境工程学报, **2012**, 6(3): 755-760
WANG Xiaodan, TANG Qi. Pretreatment of landfill leachate by magnesium ammonium phosphate precipitation process. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, **2012**, 6(3): 755-760 (in Chinese)
- [16] 黄海明, 丁丽. 磷酸铵镁沉淀去除氨氮机理及影响因素. 广州化工, **2014**, 42(9): 13-15
HUANG Haiming, DING Li. Mechanism and influence factors for the removal of ammonium nitrogen from struvite precipitation. *Guangzhou Chemical Industry*, **2014**, 42(9): 13-15 (in Chinese)
- [17] 叶标, 胡青, 周礼杰, 等. 磷酸铵镁法去除垃圾渗滤液中高浓度氨氮的研究. 环境污染与防治, **2013**, 35(7): 31-35
YE Biao, HU Qing, ZHOU Lijie, et al. Study on the ammonium-nitrogen removal from landfill leachate by magnesium-ammonium-phosphate precipitation. *Environmental Pollution & Control*, **2013**, 35(7): 31-35 (in Chinese)