

Effect of Carbon Reduction of a New Type of Coral Building System and Beach Protection

Yanhong Li¹, Liquan Xie²

¹School of Naval Architecture, Ocean and Civil Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai

²Department of Hydraulic Engineering, Tongji University, Shanghai

Email: yyhli@sjtu.edu.cn

Received: Nov. 1st, 2018; accepted: Nov. 20th, 2018; published: Nov. 27th, 2018

Abstract

A new type of coral reef building system and beach protection aimed with carbon reduction was proposed. This new system promotes the fast generation of artificial stony coral reef by electrodeposit effect, thereby sequestering the overloaded carbon in the atmosphere and the seawater permanently or semi-permanently. Compared with the usually used electrodeposit method, this new system adds two sets of equipment: the first set is for wave attenuation and water current collection; the second set is for power generation and storage. These two sets of equipment improve the efficiency of carbon reduction and the environmental performance significantly. The results of experiments conducted in the laboratory pool show the newly proposed coral building system has significant effect on carbon reduction. After 170 h work of this system, the content of carbon dioxide decreased by 88% - 90% and 81% - 89% in the seawater and atmosphere, respectively. Compared with the usually used electrodeposit method without the equipment of wave attenuation and water current collection, this newly proposed coral building system has higher efficiency in absorption of carbon dioxide: the former is 1.52 - 1.55 and 4.24 - 5.1 of the latter in the seawater and atmosphere, respectively. The main reason for this higher efficiency is that more carbon dioxide is involved into seawater when the wave is broken by the equipment of wave attenuation and water current collection, which promotes the synthesis of artificial coral reef. In addition, the equipment of power generation and storage avoids the possible environment pollution caused by external electric current. In view of these advantages, the newly proposed coral reef building system has huge prosperity in the application in coastal areas.

Keywords

Beach Protection, Coral Reef Building, Carbon Reduction, Coastal Area

一种新型护岸造礁系统的降碳效果研究

李艳红¹, 谢立全²

¹上海交通大学船舶海洋与建筑工程学院, 上海

²同济大学水利工程系, 上海
Email: yyhli@sjtu.edu.cn

收稿日期: 2018年11月1日; 录用日期: 2018年11月20日; 发布日期: 2018年11月27日

摘要

本文提出一种新型护岸造礁系统, 它通过电沉积作用促进人工珊瑚礁快速生成, 从而将大气和海水中过量的碳进行永久或半永久性固定, 最终实现降碳的目标。与普通电沉积法相比, 该系统新增消浪集流子系统和发电蓄电子系统, 显著提高其降碳效率和环保性能。室内水池试验结果表明该系统降碳效果明显: 工作170小时之后海水中二氧化碳含量降低88%~90%, 水面上方大气中二氧化碳含量降低81%~89%; 与同条件下无消浪集流子系统的普通电沉积法相比, 该系统在造礁过程中对水体和水面上方大气中二氧化碳的吸收率分别是后者的1.52~1.55倍和4.24~5.1倍。这主要是因为其消浪集流子系统在破波的同时将大气中的二氧化碳大量卷入海水, 促进了人工珊瑚礁的快速合成。此外, 其发电蓄电子系统避免了因引入外部电流而带来的新的环境污染问题。鉴于以上优点, 该造礁系统具有在广大海岸地区推广运用的价值和前景。

关键词

护岸, 造礁, 降碳, 海岸地区

Copyright © 2018 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

近几十年来, 全球化石燃料消费的过快增长导致大气中的碳积累量迅速增加。二氧化碳作为碳的最主要存在形式, 其体积分数已经从工业革命前的大约 280×10^6 增加到接近 395×10^6 , 增长了将近 40% [1] [2], 超过了过去上亿年的平均增速[1] [3]。大气中这些不断增加的碳通过大气-海面的通量作用不断进入海洋[4], 加上近岸地区工业污染物的直接排放, 常常导致海岸地区的海水呈现酸化特征[5] [6]。酸化的海水中钙离子(Ca^{2+})浓度下降, 促使碳酸钙(CaCO_3)溶解并与二氧化碳(CO_2)和水分子(H_2O)化合形成碳酸氢钙($\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$), 这会使很多海洋软体动物如珊瑚的钙质壳体遭受破坏[7] [8]。例如: 图瓦卢这个由多个珊瑚礁形成的岛国, 由于大气中 CO_2 含量的剧增, 大量珊瑚礁已经被海水侵蚀[9]。近期新的研究表明, 如果二氧化碳浓度继续以当前的速度增加, 那么南大洋以及亚北极太平洋部分地方到 2100 年就“文石”(一种亚稳形式的 CaCO_3)而言将会处于不饱和状态。这一发现说明, 在高纬度地区, 一些海洋生物在几十年之内(而不是像以前的研究工作所提出的那样在几个世纪之内)将不能生长出它们由 CaCO_3 构成的外骨架。不仅如此, 南极考察结果甚至表明在普里兹湾吸收的 CO_2 已经随着高密大陆架水向深层海洋入侵, 加剧了深层海水的酸化进程(汪燕敏, 2017)。目前大气和海水中的碳增加如果得不到有效控制, 将在未来的几个世纪里引发大量海洋生物钙化速率下降[8] [9], 严重危及海洋生态系统的健康和安全[1]。因此, 积极寻求有效的措施实现大气和海水降碳、固碳以改善海水酸化已经成为全球亟待解决的重大环境问题。

如何在 Ca^{2+} 浓度降低的海水环境中, 保持 CaCO_3 不被分解, 甚至能够持续利用 CO_2 生成新的 CaCO_3 是解决海水酸化问题的关键所在。外加微电流利用电沉积作用促进人工珊瑚礁(CaCO_3)生成[10], 从而实现对水体和大气中的碳的吸收和固定已经成为海岸环境生态修复的重要发展方向。该方法的基本思路是通过外加低电压在阴、阳电极之间电解海水, 通过电离子的迁移促进海水中的 Ca^{2+} 快速富集于阴极电极, 并与电解水离子(OH^-)和 CO_2 分子合成 CaCO_3 , 形成珊瑚礁从而将碳固定于阴极。由于涉及外部电源的引入, 使其经济、环保和安全性能不高, 电沉积法目前仅限于在小型玻璃容器内进行实验[10]。此外, 在自然状态下 CO_2 通过气-水通量向海水中的补充速度难以满足人工珊瑚礁持续、快速生成的要求, 因而也难以实现大气的快速降碳。鉴于以上两个缺点, 要利用电沉积的方法来实现对酸化的海水和大气降碳, 这在大规模的海岸环境现场运用中还需要进行进一步的探索。

本文提出一种可利用波浪能高效发电的新型护岸造礁系统, 成功解决了电源的引入问题, 此外该系统通过防波堤的破波作用向海水卷入大量 CO_2 , 从而也实现了海水中 CO_2 的快速补充和大气的快速降碳。该系统是基于作者的一项发明专利[11], 它由三部分组成: 消浪集流装置, 发电蓄电装置和造礁降碳装置。该系统利用其消浪集流装置——倾斜阶梯式防波堤实现波浪能向水流能的转化; 再利用单向水轮机将其所汇集的单向水流能量转化为电能, 并将该电能储存于蓄电装置; 最后在成对的活性炭电极板之间释放电能, 促进海水中的 Ca^{2+} 快速富集并与 CO_2 化合生成人工珊瑚礁, 最终在消浪护岸的同时实现降碳固碳的目标。本文对所提出的护岸造礁系统进行了大型室内水池物理模型试验, 实现其破波消浪、发电蓄电以及集钙造礁的全过程, 验证其降碳效果, 以期使该系统在海岸地区的大气和海水碳污染治理中得到推广运用。

2. 实验设置及过程

2.1 实验设置

实验在矩形室内水池内进行, 水池平面尺寸为 $8\text{ m} \times 4\text{ m}$, 水池底部水平。水池一端安装 2 台造波滚筒, 再向下游 3 m 处安装消浪集流装置——倾斜阶梯式防波堤, 其阶梯面迎向波浪入射方向。防波堤的集流段安装发电蓄电装置, 防波堤的背浪面设置人工造礁装置。实验水池及人工造礁系统的整体平面布置见示意图(图 1)。

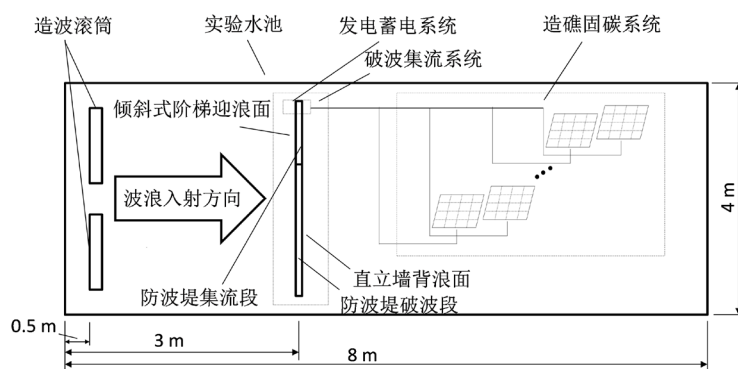


Figure 1. Schematic layout of laboratory pool

图 1. 室内实验水池平面布置示意图

造波滚筒采用长度为 1 m 的透空式鼓型(图 2), 其中间部位直径为 25 cm , 两端直径为 15 cm 。2 台造波滚筒以 0.6 m 的间距并列安装, 同轴转动产生波浪, 浪高和频率可以通过设置中轴的不同转速来调节。

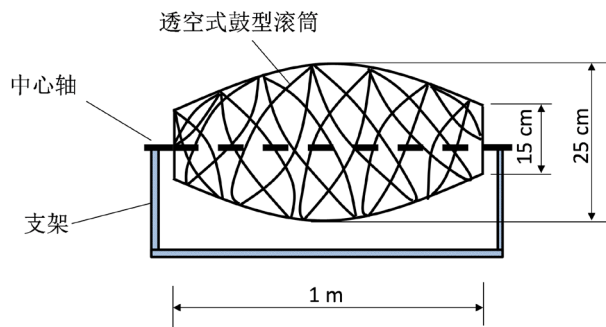


Figure 2. Side view of the drum of wave generating roller
图 2. 造波滚筒立面示意图

倾斜阶梯式防波堤总尺寸为 $3\text{ m} \times 0.8\text{ m} \times 0.55\text{ m}$ (长*宽*高), 由破波段和集流段两部分组成(图 3)。其中破波段宽度为 2 m , 由五阶高度为 0.11 m , 宽度为 0.16 m 的阶梯组成, 各阶梯均沿波浪轴线方向倾斜 2.5° 。宽度为 1 m 的集流段设置在阶梯低端, 从阶梯顶部至底部坡度为 34.5° 。波浪沿正向入射, 在防波堤的迎浪面破碎, 产生水流沿倾斜阶梯流至其低端进入集流段。集流段上的水流沿其一致坡度汇集至海水底部, 形成能量集中的单向水流用以发电。

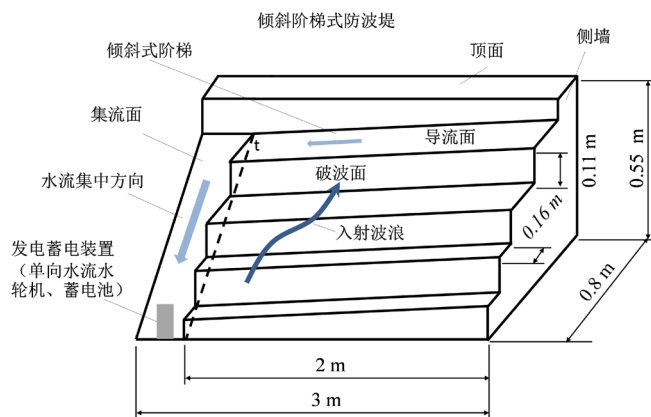


Figure 3. Sketch of breakwater with tilt multisteps
图 3. 倾斜阶梯式防波堤构造示意图

发电蓄电装置安装在集流段的底端(图 3), 由单向水流水轮机和蓄电池组构成。造礁降碳装置布置在背浪面一侧, 由 15 对尺寸为 $1\text{ m} \times 0.5\text{ m} \times 1\text{ cm}$ (长*宽*厚) 的活性炭纤维板组成, 纤维板由支架固定保持直立状态。15 对纤维板沿水池宽度方向均匀布置(图 4), 间距为 20 cm 。活性炭纤维板的比表面积为 $1500\text{ m}^2/\text{g}$, 比电阻为 $720\ \Omega\text{cm}$, 比电容为 162 F/g 。每一对纤维板分别接 2.5 V 的正、负电极。每一对正、负电荷纤维板之间距离为 5 mm , 构成一组造礁电极对。通电后, 水中的 Ca^{2+} 在电荷的作用下快速向阴极富集, 与水中的 CO_2 发生反应生成 CaCO_3 , 附着于阴极板从而形成人工珊瑚礁, 将碳永久或半永久性固定。

2.2. 实验过程

实验开始之前, 水池中静水水深 0.5 m , 水体采用祛除氯离子的自来水, 水温保持在 20°C 。向水池中注入 CO_2 以模拟酸化的海洋环境, 水面上方空气在实验过程中处于密闭的室内。水池中 CO_2 的初始含量设置为 3610 ppmv , 水面上方 0.8 m 高度范围内模拟大气中的二氧化碳初始含量为 0.23% , 二者均明显高于自然状态。

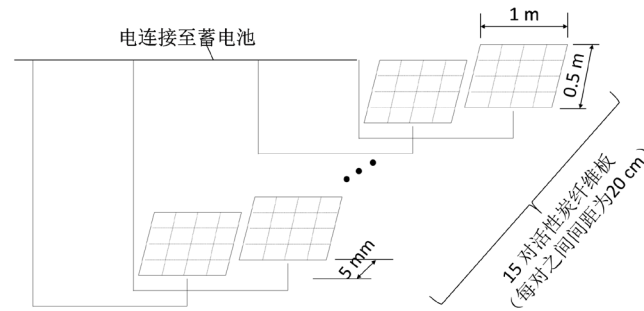


Figure 4. Sketch of the coral reef building and carbon sequestration equipment
图 4. 造礁固碳装置示意图

Table 1. Original concentration of Ca^{2+} in six experiments (g/kg)
表 1. 六组实验初始 Ca^{2+} 浓度值 (g/kg)

实验组次					
E1	E2	E3	E4	E5	E6
0.15	0.21	0.28	0.35	0.39	0.39

实验开始前 5 分钟内向水池中注入 Ca^{2+} 溶液, 根据初始 Ca^{2+} 浓度的不同设置, 具有消浪集流和发电蓄电装置的造礁系统实验分为 5 组分别进行, 分别以 E1~E5 编号(表 1)。为了模拟不同酸化海水环境中较低的 Ca^{2+} 浓度, 五组实验中 Ca^{2+} 初始浓度低于正常海水中 Ca^{2+} 含量(约为 0.4 g/kg)的 62.5%~2.5%。考虑到自然海水中 Ca^{2+} 可以从浓度较高的水域迁移到浓度较低处, 从而使某一区域内的 Ca^{2+} 浓度保持在一定范围内。实验过程中每 10 分钟测量一次 Ca^{2+} 浓度, 并根据测量结果向水中补充一次 Ca^{2+} 溶液, 使水池中 Ca^{2+} 浓度保持在与其初始值相差不超过 5% 范围内。

该护岸造礁系统的工作以造波滚筒产生波浪作为开始, 产生的二维线性规则波波长 1.2 m, 波高 0.06 m, 波周期 1.2 s。波浪作用于倾斜阶梯式防波堤的迎浪面, 每小时作用 3 次, 每次 15 分钟, 间隔 5 分钟。为便于将各组实验的降碳效果相互比较, 5 组实验(E1~E5)中的波浪参数均保持一致。

为对比该护岸造礁系统在破波条件下的降碳效果, 本文另外设计了一组无防波堤和发电系统的实验(E6, 表 1), 该组实验仅有人工造礁装置, 外接 2.5 V 的直流电源。其造礁降碳装置的设置与 E1~E5 组实验完全相同, Ca^{2+} 含量设置为与浓度最高的 E5 组实验相同, 为 0.39 g/kg。

3. 结果分析

3.1. 总体降碳效果

实验过程中每小时测量一次水池和大气中的二氧化碳, 其中大气始终测量水面上方 0.8 m 高度处。各组实验测量结果见图 5~8, 总体上 E1~E5 五组实验在低于正常水平的 Ca^{2+} 环境中, 大气和海水中二氧化碳均呈持续下降趋势。图 5 和图 6 显示, 在经历 30~170 小时之后, 各工况下的二氧化碳均下降至正常水平, 这表明该护岸造礁系统降碳效果显著, 能够有效缓解海水酸化和大气碳污染问题。

3.2. 降碳量对 Ca^{2+} 浓度的依赖性

不同 Ca^{2+} 浓度工况下的五组实验对比表明(图 5, 图 6), 在实验初始阶段高 CO_2 含量情况下, 该造礁系统的降碳量与海水中的 Ca^{2+} 浓度正相关, 即 Ca^{2+} 浓度越高, 降碳量越大, 其中 E5 组实验降碳量最大; Ca^{2+} 浓度越低, 降碳量越小, 其中 E1 组实验降碳量最小。这是因为在初始阶段, 海水中可供合成 CaCO_3 的 CO_2 与 Ca^{2+} 含量相比是过量的, 因而 CaCO_3 的合成速度只与 Ca^{2+} 浓度有关。随着海水和大气中 CO_2

含量的下降, 该正相关性逐渐减弱。具体表现为随着实验的持续进行, 各组实验降碳量之间的差异逐渐缩小。造成这种现象的主要原因在于随着护岸造礁系统工作的持续进行, 海水中的 CO_2 不断被吸收, CaCO_3 的合成速度越来越受到可利用的 CO_2 制约, 因而对 Ca^{2+} 浓度的依赖性逐渐减弱。

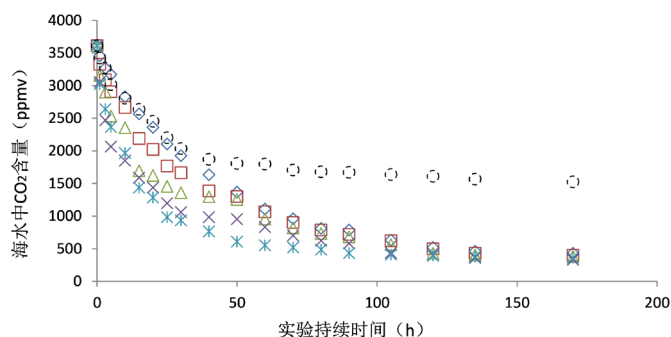


Figure 5. Reduction curve of CO_2 in seawater
图 5. 各组实验海水中 CO_2 含量的下降曲线

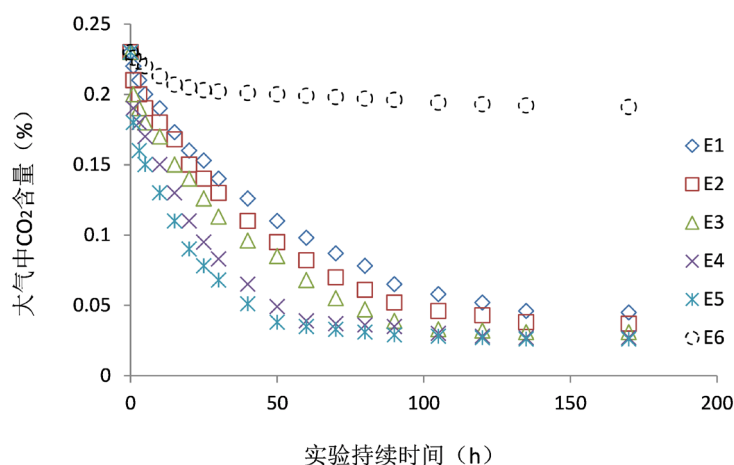


Figure 6. Reduction curve of CO_2 in atmosphere
图 6. 各组实验大气中 CO_2 含量的下降曲线

为具体展现该护岸造礁系统的降碳效率对 Ca^{2+} 浓度的依赖关系, 将各组实验中的 CO_2 降低百分比列表对比(表 2), 并分别以 E1 和 E5 两组实验数据进行对比说明。表 2 显示, 在 Ca^{2+} 浓度最低(0.15 g/kg)的 E1 组实验中, 实验开始后 1 小时之内海水和大气中的 CO_2 含量均下降了 4.3%; 实验进行 10 小时后海水中的 CO_2 含量下降了 21.6%, 水面上方大气中的 CO_2 含量下降了 17.3%; 实验进行到第 50 小时海水中的 CO_2 含量下降了 62.2%, 水面上方大气中的 CO_2 含量下降了 52.2%; 实验进行到第 90 小时海水中的 CO_2 含量下降了 78.2%, 水面上方大气中的 CO_2 含量下降了 71.7%; 实验进行到第 170 小时海水中的 CO_2 含量下降了 88.1%, 水面上方大气中的 CO_2 含量下降了 80.4%。

与之相对比, 在 Ca^{2+} 浓度最高(0.39 g/kg)的 E5 组实验中(表 2), 实验开始后 1 小时之内海水中的 CO_2 含量下降了 16.3%, 水面上方大气中的 CO_2 含量下降了 21.2%; 实验进行 10 小时后海水中 CO_2 含量下降了 45.6%, 水面上方大气中 CO_2 含量下降了 43.5%; 实验进行到第 50 小时海水中 CO_2 含量下降了 83.2%, 水面上方大气中 CO_2 含量下降了 83.5%; 实验进行到第 90 小时海水中 CO_2 含量下降了 88.0%, 水面上方大气中 CO_2 含量下降了 87.4%; 实验进行到第 170 小时海水中 CO_2 含量下降了 90.0%, 水面上方大气中 CO_2 含量下降了 88.7%。

Table 2. Reduction percentage of CO₂ in experiments E1-E5
表 2. E1~E5 实验中 CO₂ 降低值(%)

	实验组次									
	E1		E2		E3		E4		E5	
	海水	大气	海水	大气	海水	大气	海水	大气	海水	大气
1	4.3	4.3	7.9	8.7	12.7	13.0	18.1	17.4	16.3	21.7
3	9.5	8.7	14.5	13.0	19.8	17.4	31.6	21.7	26.9	30.4
5	12.2	13.0	19.5	17.4	29.9	21.7	42.9	26.1	34.5	34.8
10	21.6	17.4	26.3	21.7	34.8	26.1	48.8	34.8	45.6	43.5
15	28.9	24.8	39.4	27.0	53.1	34.8	56.1	43.5	60.2	52.2
20	34.6	30.4	44.0	34.8	55.1	39.1	60.2	52.2	64.4	60.9
25	41.7	33.5	51.0	39.1	59.8	45.2	66.9	58.7	73.0	66.1
30	46.7	39.1	54.0	43.5	62.4	50.9	70.6	63.9	74.1	70.4
40	54.8	45.2	61.6	52.2	64.1	58.3	72.8	71.7	78.8	77.8
50	62.2	52.2	64.0	58.7	65.3	63.0	73.6	78.7	83.2	83.5
60	69.3	57.4	70.5	64.3	73.6	70.4	77.0	83.0	84.7	84.8
70	73.4	62.2	75.1	69.6	77.3	76.1	80.6	83.9	85.6	85.7
80	77.6	66.1	78.2	73.4	79.7	79.6	82.8	84.3	86.6	86.5
90	78.2	71.7	80.0	77.4	81.2	83.0	83.9	84.8	88.0	87.4
105	82.5	74.8	82.8	80.0	84.4	85.7	87.9	87.0	88.7	87.8
120	85.6	77.4	86.3	81.3	88.0	86.1	88.9	87.8	89.2	88.3
135	87.3	80.0	88.1	83.5	88.8	86.5	90.0	88.3	89.5	88.7
170	88.1	80.4	88.9	83.9	89.5	86.5	90.9	88.3	90.0	88.7

以上两组 Ca²⁺浓度最低和最高的实验(E1 与 E5)对比表明, 实验开始后 1 小时之内 E5 实验海水和大气中的 CO₂ 含量下降值分别达到 E1 实验的 3.8 倍和 4.9 倍, 二者差异最大; 10 小时后海水和大气中 CO₂ 含量下降值倍比分别下降至 2.1 倍和 2.6 倍; 50 小时后分别下降至 1.3 倍和 1.6 倍; 90 小时后分别下降至 1.1 倍和 1.2 倍; 170 小时后分别下降至 1.0 倍和 1.1 倍, 二者差异已经显著缩小。该对比数据具体说明了该护岸造礁系统的降碳效果对 Ca²⁺浓度的依赖性在实验初始阶段表现强烈, 随着实验的持续进行呈减弱趋势。通过分析进一步发现这种不断下降的依赖性与水体中 CO₂ 含量的变化直接相关。

3.3. 降碳效率与 CO₂ 含量变化的关系

实验表明该护岸造礁系统的降碳效率除与 Ca²⁺浓度相关外, 也与 CO₂ 本身的含量密切相关。(图 7, 图 8)显示各种 Ca²⁺浓度工况(E1~E5)下大气和海水中的降碳速度均与 CO₂ 含量呈负相关关系。在护岸造礁系统工作的初始阶段, CO₂ 下降速度较快, 随着实验的持续进行, 其下降速度逐渐减缓。在实验进行的第一小时内, 海水中 CO₂ 下降速度在每小时 4.3%~16.3%之间, 大气中 CO₂ 下降速度在每小时 4.3%~21.7%之间。实验进行到第 50 小时海水中的 CO₂ 下降速度为每小时 0.74%~0.44%, 水面上方大气中的 CO₂ 下降速度为每小时 0.78%~0.13%。当实验进行至 135~170 小时, 海水中 CO₂ 下降速度降至每小时 0.015%~0.023%, 大气中 CO₂ 已经不再继续下降。出现这种现象的主要原因是随着海水中 CO₂ 本身含量的持续下降, 可供合成 CaCO₃ 的碳酸根离子减少。

3.4. 倾斜阶梯式防波堤对降碳效果的影响

图 5 和图 6 同时显示了未设置防波堤和发电装置的 E6 组对比实验的降碳量。对比结果表明, 尽管

E6 设置为与 Ca^{2+} 浓度最高的 E5 组实验相同, 其降碳效率却显著低于 E1~E5 组。在经历了 170 小时之后, E6 组实验 CO_2 含量在海水中和水面上方大气中分别下降了 57.8% 和 17%, 显著低于 E1~E5 组的 88% 和 80% (图 5, 图 6)。也就是, E1~E5 海水中的降碳量达到 E6 组实验的 1.52~1.55 倍(图 5), 大气中的降碳量达到 E6 组实验的 4.24~5.1 倍(图 6)。针对 E6 进一步对比其大气和海水中的降碳量(图 5, 图 6), 结果显示大气中的降碳量显著低于海水中, 这说明其大气中的 CO_2 并未通过水-气通量充分进入海水。而在 E1~E5 组实验中, 大气和海水中的降碳量均较大, 这说明在倾斜阶梯式防波堤的破波作用下, 大气中的 CO_2 能够被破碎的波浪携带而充分卷入海水中。

图 7 和图 8 同时显示了 E6 组对比实验的降碳速度。在实验开始的前 30 小时, E6 海水中的降碳速度甚至高于 E1~E5 中效率最低的 E1 组实验 23.4%; 然而从第 30 小时直至 170 小时期间, 其降碳速度却始终低于 E1~E5 (图 7)。出现这种转折的原因是由于 E6 大气中的 CO_2 未充分进入海水, 致使海水中 CO_2 随着 CaCO_3 的持续合成而快速降低。这可以从图 6 和图 8 中充分显示出来: E6 大气中 CO_2 的下降低于其余各组实验至少 16% (图 6), 其下降速度也从实验开始至结束阶段均处于显著的低水平(图 8)。

值得注意的是, 在实验开始阶段 E6 海水中降碳速度高于 E1, 其主要原因是在实验的初始阶段 E6 的 Ca^{2+} 含量高于 E1, 因而其 CaCO_3 的合成速度较快。然而随着实验的持续进行, E6 海水中的 CO_2 补充量显著少于 E1~E5 组实验, 导致 E6 组实验的 CaCO_3 合成速度降低。这进一步说明 E1~E5 组实验中倾斜阶梯式防波堤能够通过破波作用向海水中卷入大量 CO_2 。

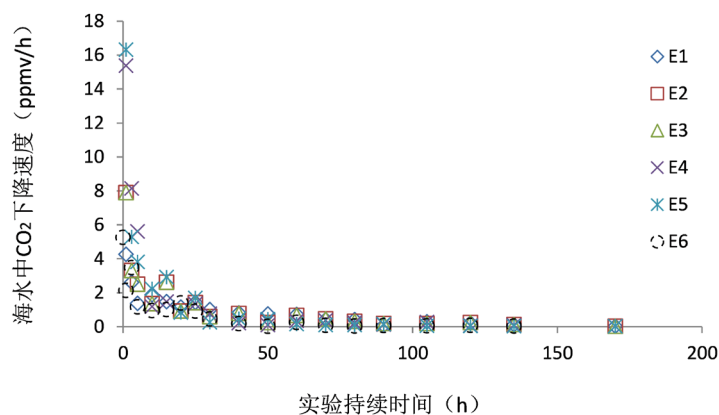


Figure 7. Reduction speed curve of CO_2 in seawater

图 7. 各组实验海水中 CO_2 含量的下降速度曲线

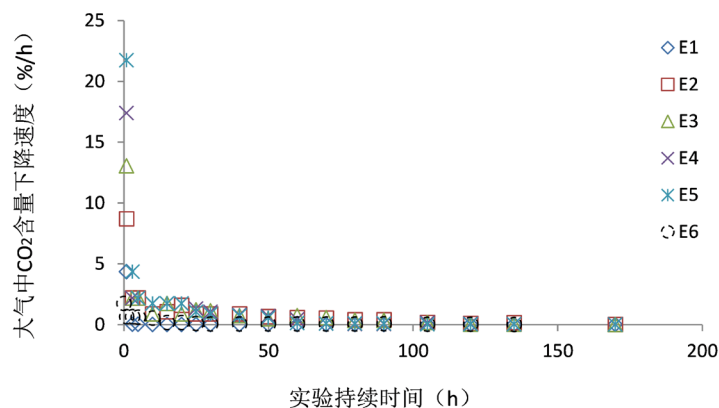


Figure 8. Reduction speed curve of CO_2 in atmosphere

图 8. 各组实验大气中 CO_2 含量的下降速度曲线

4. 结论

本文提出的新型护岸造礁系统通过电沉积作用促进人工珊瑚礁的快速生成来进行固碳, 对受污染的大气和海水具有显著降碳效果。研究表明, 该系统的降碳效果和效率与受污染海水中较低的 Ca^{2+} 浓度以及大气和海水中的 CO_2 含量均呈正相关关系, 其主要原因是人工珊瑚礁的主要成分 CaCO_3 的生成受到可利用的 Ca^{2+} 和 CO_2 的制约。

该新型护岸造礁系统的主要优点表现为: 1) 与无消浪集流装置的人工造礁系统相比, 其消浪集流系统在破波的同时将大气中的 CO_2 大量卷入海水中, 为人工珊瑚礁的生成提供充足的碳酸根离子, 从而显著提高了降碳效果和效率; 2) 倾斜阶梯式防波堤将波浪能转化为集中的单向水流能, 推动水轮机发电, 具有经济、简易的优势; 3) 具有自发电系统, 无需引入外部电源, 不带来新的环境污染。鉴于以上优点, 该护岸造礁系统适于在广大海岸地区推广运用, 它将有助于解决海岸地区大气和海水碳污染问题。

致 谢

本论文受国家自然科学基金(项目批准号: 51479109, 51479137)的资助, 在此向国家自然科学基金委致谢!

参考文献

- [1] 张锦峰, 高学鲁, 周凤霞, 李培苗, 庄文. 海洋生物及生态系统对海洋酸化的响应[J]. 海洋环境科学, 2015, 34(4): 630-640.
- [2] Trenberth, K.E., Jones, P.D., Ambenie, P., *et al.* (2007) Observations: Surface and Atmospheric Climate Change. In: Solomon, S., Qin, D., Manning, M., *et al.*, Eds., *Climate Change 2007: The Physical Science Basis, Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press, Langdon, 235-336.
- [3] Doney, S.C., Mahowald, N., Lima, I., *et al.* (2007) Impact of Anthropogenic Atmospheric Nitrogen and Sulfur Deposition on Ocean Acidification and the Inorganic Carbon System. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, **104**, 14580-14585. <https://doi.org/10.1073/pnas.0702218104>
- [4] 竇勇, 唐学玺, 杨震, 王悠. 山东近海黄海段营养盐结构对初级生产力的影响研究[J]. 海洋环境科学, 2011, 30(2): 177-181.
- [5] 肖钰霖, 高众勇, 孙恒. 南大洋表层海水酸化研究进展[J]. 极地研究, 2016, 28(3): 390-399.
- [6] 胡玮, 肖瑜, 彭雪妍, 张敏, 章波, 李中秋. 海洋酸化研究进展[J]. 水科学与工程技术, 2011(1): 19-21.
- [7] 汪燕敏, 祁第, 陈立奇. 南大洋酸化指标——海水文石饱和度变异的研究进展[J]. 地球科学进展, 2016, 31(4): 357-364.
- [8] 汪思茹, 殷克东, 蔡卫君, 王东晓. 海洋酸化生态学研究进展[J]. 生态学报, 2012, 32(8): 5859-5869.
- [9] <https://www.zybang.com/question/0d1a0e6c804304a6494a043ad3ee99a9.html>
- [10] 黄宝威, 袁翔城, 黄晖, 刘胜. 海水电沉积作用 CaCO_3 结晶与珊瑚骨骼晶体的比较[J]. 海洋科学, 2017, 41(7): 113-119.
- [11] 李艳红, 谢立全. 护岸造礁系统[P]. 201710012490.0.

知网检索的两种方式：

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择：[ISSN]，输入期刊 ISSN：2376-4260，即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入，输入文章标题，即可查询

投稿请点击：<http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱：ams@hanspub.org