

贝藻混养对舟山东极岛养殖海域二氧化碳的影响

吴杭纬^经, 赵泓睿, 彭苑媛, 赵晟* (浙江海洋大学, 浙江舟山 316000)

摘要 [目的]研究混合培养是否能够促进藻类更好地吸收二氧化碳,从而在养殖区域中降低海洋二氧化碳浓度。[方法]在舟山东极岛养殖区现场进行一场模拟围隔试验,将贻贝和龙须菜按照不同的比例进行培养,用于吸收海水中的二氧化碳。[结果]贝藻混合培养下对二氧化碳的去除效果优于贝藻单独培养时的去除效果。而当贝藻按照比例为 1.00:0.15 以及 1.00:0.30 混合下培养时,海水中的最终二氧化碳浓度分别为 1.00:0.45 比例下的 5.5 倍和 2.2 倍。[结论]选择 1.00:0.45 比例培养贝藻有助于对海水中二氧化碳的吸收。

关键词 贝藻养殖;二氧化碳浓度;pH;模型计算法;舟山东极岛

中图分类号 S913 文献标识码 A

文章编号 0517-6611(2019)15-0053-03

doi:10.3969/j.issn.0517-6611.2019.15.016

开放科学(资源服务)标识码(OSID):

Effect of Algae-shellfish Polyculture on CO₂ in the Aquaculture Zone Located at Dongji Island of ZhoushanWU Hang-wei^经, ZHAO Hong-rui, PENG Yuan-yuan et al (Zhejiang Ocean University, Zhoushan, Zhejiang 316000)

Abstract [Objective] The research aimed to study whether polyculture was able to promote algae to absorb CO₂ much better, thereby reducing the CO₂ concentration in the cultured area. [Method] A simulated enclosure experiment was performed in an aquaculture zone located at Dongji Island of Zhoushan. *Mytilus coruscus* and *Gracilaria lemaneiformis* were cultured in different proportions for the determination of CO₂ in seawater. [Result] The removal effect of CO₂ in algae-shellfish polyculture was better than that in monoculture. When the *Mytilus coruscus* and *Gracilaria lemaneiformis* were cultured in a ratio of 1.00:0.15 and 1.00:0.30, the final CO₂ concentration in seawater was 5.5 times and 2.2 times, respectively, at a ratio of 1.00:0.45. [Conclusion] It will help to absorb CO₂ in seawater by selecting the proportion of 1.00:0.45 in an algae-shellfish polyculture.

Key words Algae-shellfish polyculture; CO₂ concentration; pH; Model calculation; Dongji Island of Zhoushan

人类活动使大气中的二氧化碳浓度从工业前的 0.028% 增加到今天的 0.040%^[1]。到 2100 年,这种浓度预计将增加至 0.1%^[2]。这会导致温度上升,极端温度变化的放大可能造成比平均气温更严重的社会和健康影响^[3]。在哥本哈根世界气候大会上,中国承诺到 2020 年单位 GDP 二氧化碳排放将比 2005 年下降 40%~45%,非化石能源占一次性能源消费比重将达 15%左右^[4]。生物固碳就是一种安全高效、经济可行的固碳途径与固碳工程^[5]。

海洋生物的固碳引起更多关注,海洋碳不仅通过调控和吸收直接影响全球碳循环,还以其巨大的碳汇功能吸收了人类排放二氧化碳总量的 20%~35%,有效延缓了温室气体排放对全球气候的影响^[6-7]。根据联合国环境规划署《蓝碳》报告^[8],海洋生物(包括浮游生物、细菌、海藻、盐沼和红树林等)固定了全球 55% 的碳。海洋植物(海草、海藻、红树林等)的固碳能力极强、效率极高,其生物量虽然只有陆生植物的 0.05%,但两者的碳储量不相上下^[9]。海洋是地球上最大的碳库,达 39.1 万亿 t 碳,为大气储碳量的 53 倍,而渔业碳汇能通过渔业生产活动促进水生生物吸收水体中的 CO₂,并通过收获这些已经转化为生物产品的碳和移出水体的机制从而减少水体中的二氧化碳,其主要通过藻类养殖、贝类养殖、增殖放流以及捕捞业等方式来实现。

由于海水贝藻养殖固碳提出的“碳汇渔业”理念尚处于

研究的初级阶段,在过程与机制方面的基础研究多比较分散,尚存在很多不足的问题。该研究选择浙江典型的海水养殖海域为研究地点,以典型的养殖贝类厚壳贻贝为研究对象,对其固碳相关生理生态学环节进行研究。比起贝藻单养,贝藻混养能够更有效地吸收利用 CO₂,进而能够有效调节全球海-气 CO₂ 交换。我国学者在山东桑沟湾对栉孔扇贝与海带、龙须菜混养研究证实了这一点,但对于贝、藻混合比例未给出具体的最佳混养比例,对于浙江海域典型的厚壳贻贝及其与相关海藻混养促进碳汇研究鲜见报道。笔者以厚壳贻贝和龙须菜为材料,通过围隔试验比较研究,预期给出具体的混养比例,提出最佳的扩增碳汇途径,为“碳汇渔业”理论提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 材料 该试验采用东极养殖区的厚壳贻贝 *Mytilus coruscus* (重量约为 100 g,尺寸为长 12 cm、宽 4 cm,误差为正负 0.5 cm) 和龙须菜 *Gracilaria lemaneiformis* (烘干称重,测量重量约为 30 g) 作为研究对象。通过实际养殖海域的跟踪监测和典型养殖实验基地的现场围隔试验进行分析。

1.2 方法 试验中的试验模型如图 1 所示,整个试验模型分为 2 个部分。水面上有 4 个浮球和 2 个长线筏,水下挂着一个网。浮子的直径约为 22 cm,这 4 个浮子的存在确保了整个模型完全浸没在水中并且没有下沉。长线筏可以固定浮子和模型,以防止它漂移。网内有填充海水的塑料袋,其中包含贻贝和龙须菜的试验样本。

在该试验中,根据 0:0(对照)、1:0(M₁)、0:1(M₂)、1:0.15(P₁)、1:0.30(P₂)、1:0.45(P₃) 的比例将贻贝和龙须菜分为 6 组。每 2 h 测量盐度、DO 浓度和 pH,作为连续测量。通过特定的专用仪器在现场进行盐度、pH 和 DO 的测

基金项目 NSFC-浙江两化融合联合基金项目(U1609204);浙江省自然科学基金项目(LY15D060006);国家重点研发计划支持项目(2017YFA0604902);舟山市科技局科技计划项目(2016C41017)。

作者简介 吴杭纬(1994—),男,浙江湖州人,硕士研究生,研究方向:海洋碳循环。*通信作者,教授,博士,硕士生导师,从事海洋生态学研究。

收稿日期 2019-03-07

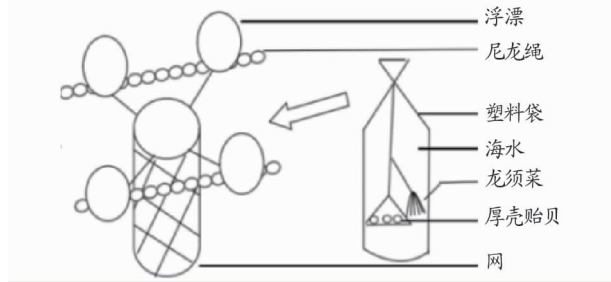


图1 试验培养模型

Fig.1 The experimental culture mode

定。每组每次在测量时将每组取出 50 mL 的水样装在白色塑料瓶,并在试验结束后返回实验室进行溶解无机碳。整个试验进程温度控制在 24~25 °C。通过模型法计算水中的 CO₂ 浓度 (10⁻³ mol/L),其公式如下:

$$c_{\text{water}}[\text{CO}_2] = \frac{\text{DIC}}{1 + \frac{K_1}{c(\text{H}^+)} + \frac{K_1 \cdot K_2}{c(\text{H}^+)^2}}$$

式中, $K_1 = 4.45 \times 10^{-7}$; $K_2 = 4.69 \times 10^{-11}$ 。

2 结果与分析

2.1 pH 的变化趋势分析

从图 2 可看出,培养前后海水的 pH 保持在 8.0 和 9.0。在该研究中,对照组中仅温度和微生物对 pH 具有弱的影响,并且在培养期间 pH 几乎恒定,仅为 7.87~7.99。与对照组相比, M₁ 比例为 1:0 的 pH 呈下降趋势,最低 pH 为 7.51,显著低于对照组。M₁ 主要是通过贻贝的单次呼吸来产生 CO₂^[10]。当比例为 0:1 时, M₂ 的 pH 增加,表明只有当含有龙须菜时,阳光才能被叶绿素吸收,并且海水中的二氧化碳被吸收用于光合作用,从而降低了海水的酸度^[11],最终的 pH 为 8.41。增加二氧化碳和降低 pH 对浮游植物生理学的影响,特别是呼吸和光合作用的速度,可能导致相反的生长反应,其中一种或另一种占主导地位,这取决于其他条件^[12-13]。如图 2 所示,由于龙须菜的光合作用高于贻贝的呼吸作用,因此藻类-贝类混养的 3 组 pH 较高。P₁、P₂ 和 P₃ 组具有相似的趋势,先增加后减小至平缓,最后再增加。pH 的第一次增加是由于龙须菜的光合作用,而减少的原因是日落 after 贻贝和龙须菜的呼吸作用,产生大量的二氧化碳,导致海水酸度的增加和 pH 下降。pH 的后期增加是由于龙须菜重新启动光的协同作用。尽管趋势相似,但变化的幅度仍然不同,最终的 pH 为 P₃>P₂>P₁。P₃ 的最终 pH 为 8.99。这一结果表明藻类的含量越多,能够产生更活跃的生物活性^[14]。具有适当比例的混养将比藻类或贝类单一栽培更好地控制海水中的 CO₂。在该研究中,当比例为 1:0.45 时,海水中 CO₂ 的吸收是最好的。

2.2 DO 的变化趋势分析

从不同比例的藻类-贝类混养中 DO (溶解氧) 的变化趋势(图 3)可看出,在对照组中,DO 的趋势是稳定的,浓度几乎不变且保持在约 10 mg/L。由于贻贝的呼吸作用,培养期间 M₁ 中比例为 1:0 的 DO 持续降低。在培养结束时,浓度降至 3.89 mg/L 的低水平,这是初始值的 39.3%,与 pH 一样低^[15]。

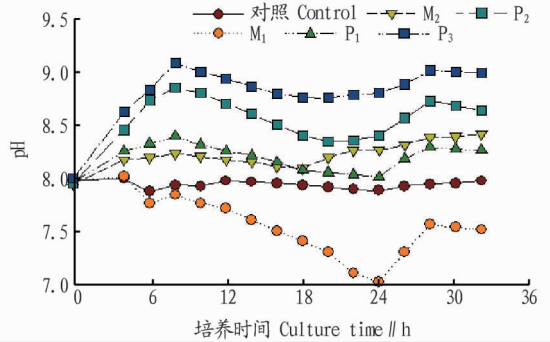


图2 pH在6组不同比例中的培养变化

Fig.2 Culture changes of pH in six groups

海水中的 DO 来自浮游植物的光合作用和来自大气的一部分的氧的溶解。消费的主要途径包括有机物质的降解和水生生物的呼吸,如大型无脊椎动物^[16-17]。如果水中的 DO 含量低于 5 mg/L,则会对水生生物的存活产生负面影响;当它低于 2 mg/L 时,会导致鱼类窒息死亡,大多数藻类不能同时存活^[18]。从图 3 可以看出,龙须菜中加入龙须菜可以有效防止 DO 的快速下降,保证贝类的正常生长。在其他组中,龙须菜的光合作用和贻贝的呼吸作用使得趋势一致,这与 pH 的变化非常相似。M₂、P₁、P₂、P₃ 的 DO 在 8~20 mg/L 处呈现连续下降趋势,这是由于夜间缺光。龙须菜和贻贝呼吸的需要消耗了大量的氧气。M₂ 仅含有龙须菜,因此浓度降低较少;并且 3 组多元培养物中的最终 DO 浓度为 P₃>P₂>P₁。P₃ 的比例为 1:0.45 的 DO 最高,最终浓度为 19.52 mg/L。国外相关研究表明,DO 受水温、浮游植物、pH、悬浮物浓度等因素的限制^[19]。有研究表明 DO 与 pH 线性相关^[20],pH 对 DO 的影响表现为生化过程。

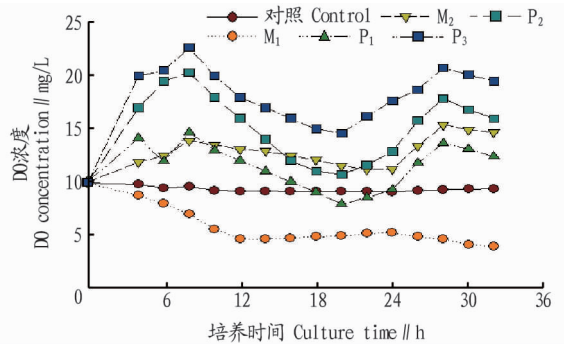


图3 DO在6组不同比例中的培养变化

Fig.3 Culture changes of DO in six groups

2.3 盐度的变化趋势分析

根据藻类-贝类混养的不同比例,记录了海水盐度的变化。从图 4 可以看出,盐度为 28~31;其他组的盐度最终浓度低于对照组 31,最低盐度 P₁ 为 29。有研究指出盐度与光合作用和呼吸密切相关^[21]。Shafer 等^[22]指出,北美 *Z. japonica* 光合特性种群最适应中度盐度,在盐度为 20 时显示出最小呼吸速率,较低的补偿辐照度、较高的饱和辐照度和较高的光饱和和光合速率,光合效率长期接触盐度为 5~35。因此,由于光合速率和呼吸速率,6 组中的盐度产生了变化。根据以上讨论,该试验中最合适的 P₃ 的平均盐度约为 30。

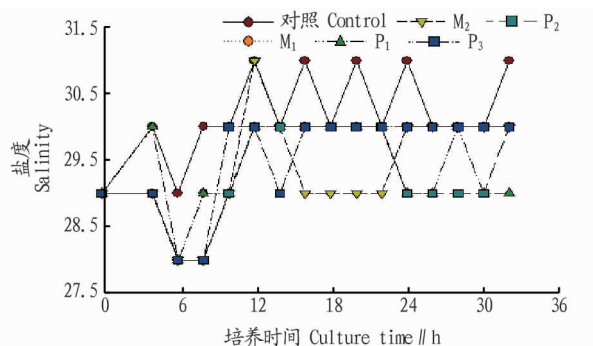
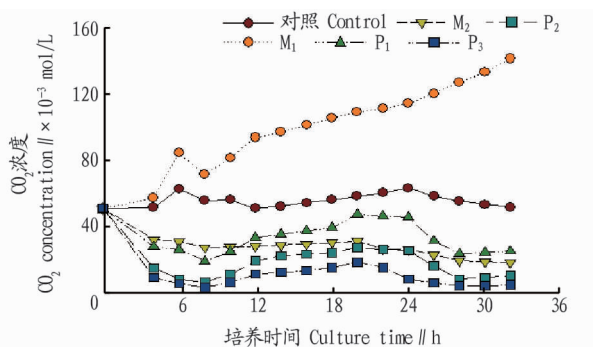


图4 盐度在6组不同比例中的培养变化

Fig. 4 Culture changes of salinity in six groups

2.4 海水中二氧化碳浓度 根据 DIC 和公式计算 CO_2 浓度,得到不同藻类-贝类比例培养物中 CO_2 浓度的变化。从图 5 可看出,对照组的 CO_2 浓度在培养期间漂浮在 $50.44 \times 10^{-3} \sim 60.99 \times 10^{-3} \text{ mol/L}$ 。在培养期间, M_1 中 1:0 的 CO_2 浓度继续上升,在第 32 小时达到 $141.1 \times 10^{-3} \text{ mol/L}$ 。因此,当仅含有贻贝时,对贻贝呼吸产生的 CO_2 的增加没有限制。图 5 显示,海水中其他 CO_2 浓度在前 10 h 内迅速下降,然后由于夜间 CO_2 浓度略有增加,但最终在龙须菜的作用下降低。根据 M_2 中 CO_2 浓度低于 P_1 的数据,表明混合 P_1 吸收 CO_2 的效果不如藻类单一栽培效果好。当比例为 1:0.45 (P_3) 时,认为海水中 CO_2 浓度变化率最快,为 $1.446 \times 10^{-3} \text{ mol}/(\text{L} \cdot \text{h})$,最终 CO_2 浓度至少为 $4.504 \times 10^{-3} \text{ mol/L}$ 。从变异曲线可以看出龙须菜的光合速率高于呼吸速率。根据表 1,在 3 组藻类-贝类比例中, P_1 和 P_2 的最终 CO_2 分别是 P_3 的 5.5 和 2.2 倍。该研究表明, P_3 扩增了最多的碳汇,是最合适的培养比例。

图5 CO₂ 在6组不同比例中的培养变化Fig. 5 Culture changes of CO₂ in six groups

3 讨论

在国内外众多的学者研究中对于碳汇的计算方法有很多种,培养类型也数不胜数。在单一培养中,对于贝类碳汇计算最常见的方法就是利用贝类在生命活动中需要水体中的碳酸根离子来对海洋中的碳实现固定,所以可以从贝壳的碳的含量和贝壳的整体重量来粗略计算碳汇值。对于贝类的软组织来说,它把海洋中的微藻和一些有机颗粒作为食物,可以有效地固定这些食物中的碳。当海洋中的碳含量降低后,位于大气中的二氧化碳就会溶解于海水中,从而减少了大气中二氧化碳含量,这对于调节整个大气二氧化碳含量

起到非常重要的作用。对于藻类碳汇计算最常见的方法就是收获和捕获藻类之后通过质量分数计算碳汇值。但藻类除了自身能够贡献碳汇外,其生命活动可以直接吸收海洋中的二氧化碳,然后还可以影响海洋中二氧化碳的分压,使其降低,促进大气中的二氧化碳向海水中溶解。对于贝藻混养模式发展较缓慢,养殖户和学者近几年开始逐渐关注和研究。区别于投饵式水产养殖体例,浙江省海水养殖多以贝藻类综合养殖为主,多养分条理综合养殖不但可以有效地发挥养殖海区的空间利用本领,更能增进各养分有条理地配合养殖生物并且健康发展。而在海洋生物固碳这一方面,更是具有其奇特的优点。在贝类与海藻综合养殖的过程当中,贝类经由过程滤食净化海水的同时,无机氮氮及有机排泄物可以被大量产出,这些恰恰是可以提供海藻发展的营养物质;而海藻则经由光合作用过程,吸收大量二氧化碳发生大量的氧气,照顾到了贝类的正常代谢,被海藻自身排泄出来的消融有机颗粒,也可以成为贝类的食品。两者各自行使其固碳职能的同时,又达到了相互促进。通过收获养殖的贝类和藻类到岸上,使得大量的碳可以从海洋中移出,尤其是移出的贝壳中的碳可称为较为持久的碳汇,促进了海洋碳汇的功能。不管是养殖效率还是环保效率都比单一培养要高。最常见的贝藻综合培养碳汇的计算方式为贝类养殖的 CO_2 吸收量和藻类养殖的 CO_2 吸收量之和。

在贝藻养殖模式下,有很多不同的养殖模式,根据不同的贝类和藻类来定义。可以对于不同种类的贝类和藻类综合养殖来进行研究,比如扇贝和海带的混养、扇贝和紫菜的混养;也可以对于同一种混养而比例不同进行研究,如此次试验。通过观察上述研究数据可以清晰地得出结论, P_3 (1:0.45) 组的培养效果最好。此次试验的创新之处在于利用不同的思维模式,较好地掌握了碳汇的定义和概念,计算了水体中的二氧化碳浓度,间接地得出了最佳碳汇扩增的比例模型。与传统的计算方法和模型相比更便捷,也更简单。传统的计算方法需要大量的数据支撑,对于贝类的计算需要肉壳分离,分别检测和计算各自的碳汇值,而且对于养殖海域来说计算过程中会忽略表面海水沉入海底的有机碳。对于藻类来说不同的结构因素和产量因素都对碳汇起到了非常重要的作用。此次试验也存在不足之处,没有计算出具体的碳汇值,无法与传统方法一样客观地得到碳汇值的比较,未来需要研究出与之相结合的计算方法,可为日后的碳汇计算和碳汇扩增提供参考;由于海域条件的限制,混养比例组别不够多,无法完成更全面的对比,未来会在贝藻混养方面做更深入的研究,为渔民和大气环境做出贡献。

参考文献

- [1] GOTO D, MORIMOTO S, AOKI S, et al. Vertical profiles and temporal variations of greenhouse gases in the stratosphere over Syowa Station, Antarctica[J]. SOLA, 2017, 13: 224-229.
- [2] GOLDMAN J A L, BENDER M L, MOREL M M. The effects of pH and pCO_2 on photosynthesis and respiration in the diatom *Thalassiosira weissflogii* [J]. Photosynth Res, 2017, 132: 83-93.
- [3] MEEHL G A, COVEY C, TAYLOR K E, et al. The WCRP CMIP3 multimodel dataset: A new era in climate change research[J]. Bull Am Meteorol Soc, 2007, 88(9): 1383-1394.

影响十分显著。

(2) 2013—2018 年武进港氨氮年均浓度下降趋势明显。说明经过多年治理, 武进港氨氮污染状况得到明显控制, 水质状况有较大程度好转趋势。

(3) 武进港氨氮重污染区域主要集中在上游河段, 中天钢铁和慈渡桥断面氨氮污染严重, 需要重点关注。洛阳桥至姚巷桥断面, 氨氮污染下降趋势明显。

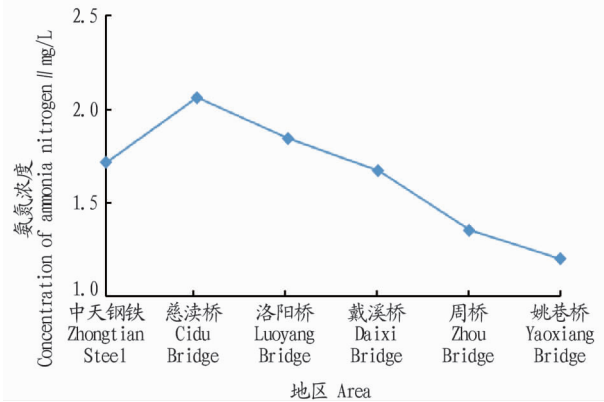


图 9 2013—2018 年武进港氨氮年均浓度沿程变化趋势

Fig. 9 Trend along the flow of annual average concentration of ammonia nitrogen in Wujingang River during 2013—2018

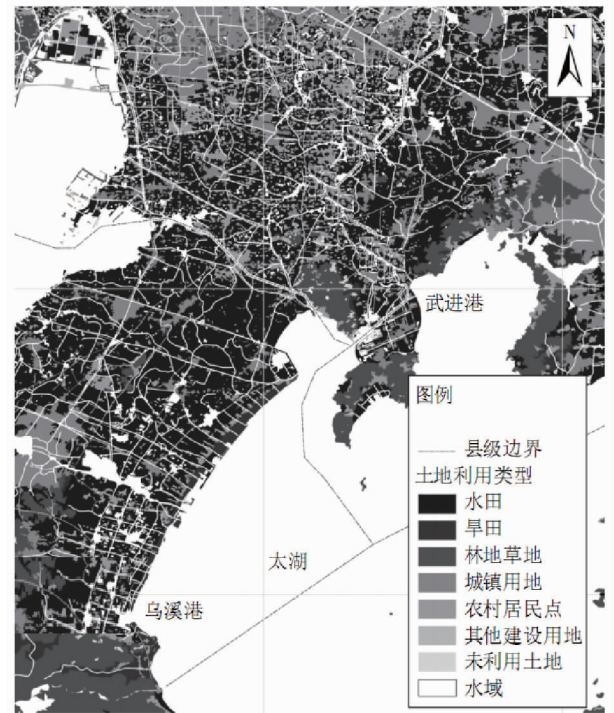


图 10 武进港流域土地利用类型

Fig. 10 Land use types in Wujingang River Basin

参考文献

[1] 龚蕾婷. 太湖流域典型入湖河流的健康评价[D]. 南京: 南京大学, 2012: 10.

[2] 吕学研, 张咏, 徐亮, 等. 典型入太湖河流夏-秋季氮素污染变化特征[J]. 水利水运工程学报, 2016, 10(5): 9-15.

[3] 张利民, 孙卫红, 程伟, 等. 太湖入湖河流环境综合治理[J]. 环境监测管理与技术, 2009, 21(5): 1-5.

[4] 许晨, 万荣荣, 马倩, 等. 太湖西北部湖区入湖河流氮磷水质标准修正方案研究[J]. 长江流域资源与环境, 2017, 26(8): 1180-1188.

[5] 易娟, 徐枫, 高怡, 等. 2007 年以来环太湖 22 条主要河流水质变化及其对太湖的影响[J]. 湖泊科学, 2016, 28(6): 1167-1174.

[6] 谢文理, 田颖, 祁红娟, 等. 太浦运河氨氮污染时空特征及来源研究[J]. 安徽农业科学, 2018, 46(22): 55-57.

[7] 张涛, 胡冠九, 范清华, 等. 太湖入湖河流总氮与氨氮相关性特征分析研究[J]. 环境科学与管理, 2015, 40(2): 21-23.

[8] 潘晨, 谢文理, 彭小明, 等. 典型入太湖河流总氮污染特征分析[J]. 安徽农业科学, 2013, 41(2): 751-753.

[9] 潘晨, 谢文理, 刘岩, 等. 太浦运河总氮污染物排放限值研究[J]. 环境保护科学, 2013, 39(3): 5-8.

[10] 於梦秋, 蔡颖, 刘华, 等. 太湖流域入湖河流土地利用类型对水质的影响: 以乌溪港、武进港为例[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(5): 1024-1032.

(上接第 55 页)

[4] SHIOGAMA H, CHRISTIDIS N, CAESAR J, et al. Detection of greenhouse gas and aerosol influences on changes in temperature extremes[J]. SOLA, 2006, 2: 152-155.

[5] WANG B, LI Y Q, WU N, et al. CO₂ bio-mitigation using microalgae[J]. Appl Microbiol Biotechnol, 2008, 79(5): 707-718.

[6] BOUILLON S, RIVERA-MONROY V, TWILLEY R, et al. The management of natural coastal carbon sinks [M]//LAFFOLEY D, GRIMS DITCH G. The management of natural coastal carbon sinks. Gland, Switzerland: IUCN, 2009.

[7] HOOD M, BROADGATE W, URBAN E, et al. Ocean acidification: A summary for policymakers from the second symposium on the Ocean in a High-CO₂ World[R]. IOC, 2009.

[8] NELLEMAN C, CORCORAN E, DUARTE C M, et al. A rapid response assessment[R]. Nairobi: United Nations Environment Programme, GRID-Arendal, 2009.

[9] TANG Q S, ZHANG J H, FANG J G. Shellfish and seaweed mariculture increase atmospheric CO₂ absorption by coastal ecosystems[J]. Marine ecology progress series, 2011, 424: 97-104.

[10] RUGINIS T, ZILJUS M, VYBERNAITE-LUBIENE I, et al. Seasonal effect of zebra mussel colonies on benthic processes in the temperate mesotrophic Plateliai Lake, Lithuania[J]. Hydrobiologia, 2017, 802(8): 23-38.

[11] PORZIO L, BUIA M C, FERRETTI V, et al. Photosynthesis and mineralogy of *Jania rubens* at low pH/high pCO₂: A future perspective[J]. Science of the total environment, 2018, 628/629: 375-383.

[12] HOPKINSON B M, XU Y, SHI D L, et al. The effect of CO₂ on the photosynthetic physiology of phytoplankton in the Gulf of Alaska[J]. Limnology and oceanography, 2010, 55(5): 2011-2024.

[13] WU Y P, GAO K S, RIEBESELL U. CO₂-induced seawater acidification

affects physiological performance of the marine diatom *Phaeodactylum tri-cornutum*[J]. Biogeosciences discussions, 2010, 7(9): 2915-2923.

[14] ZHOU L H, ZHENG T L, WANG X, et al. Effect of five chinese traditional medicines on the biological activity of a red-tide causing alga *Alexandrium tamarense*[J]. Harmful Algae, 2007, 6(3): 354-360.

[15] 殷燕, 吴志旭, 刘明亮, 等. 千岛湖溶解氧的动态分布特征及其影响因素分析[J]. 环境科学, 2014, 35(7): 2539-2546.

[16] 杨丽娜, 李正炎, 张学庆. 大辽河近入海河段水体溶解氧分布特征及低氧成因的初步分析[J]. 环境科学, 2011, 32(1): 51-57.

[17] DING Y K, RONG N, SHAN B Q. Impact of extreme oxygen consumption by pollutants on macroinvertebrate assemblages in plain rivers of the Ziya River Basin, north China[J]. Environmental science & pollution research, 2016, 23(14): 14147-14156.

[18] CHAPMAN D V. Water quality assessments: A guide to the use of Biota, sediments and water in environmental monitoring [M]. London: Chapman & Hall, 1992.

[19] YAMADA Y, MITO Y, IGETA A, et al. Dissolved oxygen concentration in river sediment of the Lake Biwa tributaries, Japan[J]. Limnology, 2012, 13(1): 149-154.

[20] WUNGRAMPHA S, JOSHI R, SINGLA-PAREEK S L, et al. Photosynthesis and salinity: Are these mutually exclusive? [J]. Photosynthetica, 2018, 56(1): 366-381.

[21] MOHAMMADI M H, KHATAAR M, SHEKARI F. Effect of soil salinity on the wheat and bean root respiration rate at low matric suction[J]. Paddy & water environment, 2017, 15(3): 639-648.

[22] SHAFER D J, KALDY J E, SHERMAN T D, et al. Effects of salinity on photosynthesis and respiration of the seagrass *Zostera japonica*: A comparison of two established populations in North America[J]. Aquatic botany, 2011, 95(3): 214-220.