中国近海养殖环境碳汇形成过程与机制

张永雨^{1,2*}, 张继红³, 梁彦韬¹, 李鸿妹¹, 李刚^{1,2}, 陈晓⁴, 赵鹏⁵, 蒋增杰³, 邹定辉⁶, 刘晓勇⁷, 刘纪化^{2,4}

1. 中国科学院青岛生物能源与过程研究所, 青岛 266101;
2. 青岛海洋科学与技术国家实验室微生物海洋学联合实验室, 青岛 266237;
3. 中国水产科学院黄海水产研究所, 青岛 266071;
4. 山东大学海洋研究院, 青岛 266273;
5. 国家海洋信息中心, 天津 300171;
6. 华南理工大学环境与能源学院, 广州 510006;
7. 山东海之宝海洋科技有限公司, 威海 264300

* E-mail: zhangyy@qibebt.ac.cn

收稿日期: 2017-10-12; 接受日期: 2017-11-16; 网络发表日期: 2017-12-07

国家重点研发计划项目(编号: 2016YFA0601402)、青岛海洋科学与技术国家实验室开放基金项目(编号: QNLM2016ORP0311)和山东省重点研发计划项目(编号: 2015GSF115036)资助

摘要 中国是世界上海水养殖规模最大的国家, 通过开展近海养殖增加海洋碳汇(亦称蓝碳)是应对全球气候变化和促进低碳发展的一条新的科学途径. 蓝碳是“蓝色粮仓”建设的重要内容之一, 通过提高贝藻等的养殖产量, 增加可移出的碳汇, 是近海蓝碳开发的一部分. 而微型生物蓝碳、溶解有机碳(主要指惰性溶解有机碳)、颗粒碳的沉积等都是养殖碳汇的重要组成部分, 是以往被遗漏的碳汇部分. 从不同角度全面揭示近海养殖环境的碳汇形成过程与机制, 科学评估近海养殖碳汇功能, 不仅可为渔业经济可持续发展和生态文明建设提供重要的理论与技术支撑, 并可能在未来碳市场中创造新的经济价值.

关键词 贝藻养殖, 海洋碳汇, 微型生物, 惰性溶解有机碳, 碳沉积

1 引言

中国作为世界上碳排放量最大的国家, 为应对气候变化新形势, 国家正加快推动低碳循环发展, 主动控制碳排放. 在面临国家经济下行和节能减排双重压力下, 努力探求增汇途径是当前新形势下的一项重要创新性举措. “建立增加海洋碳汇的有效机制”与“探索开展海洋等生态系统碳汇试点”已成为中国《生态文明体制改革总体方案》和《“十三五”控制温室气体排

放工作方案》的重要内容. 中国科学家前期亦自发成立了全国海洋碳汇联盟和中国未来海洋联盟, 并适时推出了中国蓝碳计划. 海洋具有地球上最大的碳汇功能, 在调节全球气候变化中发挥重要作用. 中国管辖海域300万平方公里, 边缘海海域总面积470多万平方公里, 在深入研究和了解海洋碳汇机制及其调控因素的基础上, 研发海洋增汇技术将具有十分广阔的前景. 目前已知的海洋碳汇机制主要包括物理泵/溶解泵和生物驱动的碳泵两种形式. 由于物理泵主要受自然过

中文引用格式: 张永雨, 张继红, 梁彦韬, 李鸿妹, 李刚, 陈晓, 赵鹏, 蒋增杰, 邹定辉, 刘晓勇, 刘纪化. 2017. 中国近海养殖环境碳汇形成过程与机制. 中国科学: 地球科学, 47: 1414–1424, doi: 10.1360/N072017-00344

英文引用格式: Zhang Y Y, Zhang J H, Liang Y T, Li H M, Li G, Chen X, Zhao P, Jiang Z J, Zou D H, Liu X Y, Liu J H. 2017. Carbon sequestration processes and mechanisms in coastal mariculture environments in China. Science China Earth Sciences, 60: 2097–2107, doi: 10.1007/s11430-017-9148-7

程影响,通过人为调控实现增汇的空间不大.生物驱动的海洋碳泵是蓝碳的主体,鉴于生物活动的可调控性,使得蓝碳具有极大的开发潜力.生物驱动的海洋碳泵中,生物泵(Biological carbon pump, BP)与微型生物碳泵(Microbial carbon pump, MCP)是目前已知的两种重要的生物储碳机制. BP是基于浮游植物初级生产、消费、传递、沉降和分解等一系列生物学过程构成的颗粒碳从表层向深层的转移和储存(Longhurst和Harrison, 1989). MCP是一种不依赖于颗粒碳沉降的储碳机制,通过微型生物新陈代谢活动将活性有机碳转化为惰性有机碳,以溶解态的形式长久(长达五千年)地将碳封存于海洋中(Ogawa和Tanoue, 2003; Jiao等, 2010). 鉴于MCP的重要作用,其被称为海洋中“巨大碳库的幕后推手”(Stone, 2010). 目前,基于BP与MCP的生物储碳机制,在探索增汇技术方面已取得了一些较好进展,例如渔业增汇(Tang, 2014; 唐启升和刘慧, 2016)和陆海统筹海洋增汇(Jiao等, 2011a)等方案的提出为蓝碳开发提供了一条新的科学途径.

中国是世界上海水养殖规模最大的国家,实施生物固碳/储碳战略,大力发展碳汇渔业,在应对气候变化,发展低碳经济中具有重要作用.传统意义上的碳汇渔业是指通过渔业生产活动促进生物吸收水体中的二氧化碳,并通过收获把这些碳移出水体的过程和机制,是一种可移出的碳汇.然而,随着研究的不断深入,目前对碳汇渔业有了更深入全面的认识.除了养殖环境中可移出的碳汇外(如贝藻养殖生物体收获),微生物作用下驱动形成的海水溶解有机碳库(dissolved organic carbon, DOC)和惰性溶解有机碳库(refractory dissolved organic carbon, RDOC)以及碳的沉积等都是渔业碳汇的重要部分.由于这部分蓝碳研究难度大,之前还无统一的计量标准,为此在计量渔业碳汇时,一直被忽视或遗漏,而目前越来越多研究揭示这部分遗漏的碳汇在养殖蓝碳中占据了相当高的比重.

本文针对近海渔业养殖环境碳汇研究的现状、意义进行了概述,并对养殖环境蓝碳形成过程与机制研究进展进行了阐述,同时对养殖碳汇产业的未来发展进行了展望.

2 近海养殖蓝碳开发的重要意义

气候变化正严重威胁着世界各国的可持续发展.

根据研究,减排和增汇是应对气候变化的两大重要途径.中国目前是世界上最大的碳排放国,为积极应对气候变化,中国在“国家自主贡献”文件中承诺碳排放量于2030年达到峰值,并于2017年全面启动了碳交易市场,推动低碳经济或碳汇产业的快速发展.但是,当前国家经济增长速度已持续减缓,因此仅依靠减排可能会进一步加重对国家经济的负面影响,这是一条不可持续之路.海洋是地球上最大的碳库,在全球的碳循环中起着重要作用.全球每年通过光合作用捕获的碳即“绿碳”中,超过一半的碳被海洋生物捕获,这部分由海洋生物捕获的碳被称为蓝碳,亦被称蓝色碳汇(Nelleman等, 2009).遍布全球沿海的红树林、盐沼和海草床等生境中的植被是重要的海岸带蓝色碳汇.海洋中养殖生物、浮游植物、微生物等亦是重要的蓝碳.而经过生物转化(尤其是通过微型生物转化)形成的可长久储存的惰性溶解有机碳(refractory dissolved organic carbon, RDOC)以及由生物活动形成、沉降并长久埋藏在沉积环境中的有机碳是海洋中长久稳定碳库的重要存在形式.

目前中国正积极引领国际社会共同应对气候变化,鉴于海洋在应对和减缓气候变化中具有重要的开发潜力,2017年6月国家发展改革委、国家海洋局联合发布的《“一带一路”建设海上合作设想》中,明确提出了将“加强海洋领域应对气候变化合作”、“加强蓝碳国际合作”作为未来“一带一路”国家开展国际合作的重点之一,增加海洋碳汇,共走绿色发展之路.

中国是世界第一海水养殖大国,为适应新形势下中国国情和世界经济发展,将碳汇渔业和海上粮仓建设合为一体是近年来探索出的一条科学发展之路.通过改善近海海洋环境质量,恢复和提升自然海域植物的碳捕获能力(如海草床修复系统建设),调整海水养殖模式促进渔业增汇(例如,鼓励开发以海藻养殖为主体的生态牧场建设)等,旨在增加近海碳汇并实现低碳经济创收,是一条双赢之路.近海养殖蓝碳开发是中国政府兑现对国际社会承诺,为应对和减缓气候变化进行的重要实践之一,也是推进中国海洋生态文明建设和渔业经济可持续发展的内在需求.另外,将来海洋碳汇有望加入到中国乃至国际碳交易市场体系,近海养殖环境蓝碳的研究与蓝碳评估技术开发可为未来碳交易市场的正常运转保驾护航,使渔业碳汇或养殖碳汇业可能成为一个新的经济增长点.

3 中国海水养殖现状及其碳汇功能

自20世纪60年代以来, 中国海水养殖产量呈逐年递增态势(图1)。其中, 2016年中国海水养殖总产量达 1.96×10^3 万吨, 比2005年总产量增加约42%(农业部渔业渔政管理局, 2006~2017)。中国是世界海水养殖大国, 无论养殖面积还是总产量均居世界首位。至2014年, 中国渔业养殖总产量占世界总产量的62%(FAO, 2016)。中国海水养殖种类以贝藻为主, 约占中国海水养殖产量的85%以上(农业部渔业渔政管理局, 2006~2017)。大型海藻通过光合作用可将海水中的溶解无机碳和 CO_2 转化为有机碳(Li等, 2007; Zou和Gao, 2014; Ji等, 2016), 同时在藻类生长过程中吸收溶解在海水中的硝酸盐、磷酸盐等营养物质(Xu等, 2010; Xu等, 2011; Xu和Gao, 2012), 使得海水碱度不断升高, 降低海水中 CO_2 分压, 进而促进海水对空气中 CO_2 的吸收, 实现海洋碳汇功能。贝类通过摄食活动去除海水中的颗粒有机碳, 并形成以碳酸钙为主成分的贝壳, 在海洋碳循环中发挥重要作用。

海水养殖活动固定的碳主要以四种形式存在: 固定在海洋养殖动植物体内, 可从海水中收获移出的碳, 被称为可移出碳汇; 以颗粒有机碳(particulate organic carbon, POC)和可溶性有机碳(DOC)等形式留存在海水中的碳(纪建悦和王萍萍, 2015), 以及埋藏在沉积物中的碳。图2为大型养殖海藻的碳汇与碳输出示意图。

国内外学者围绕海水养殖碳汇潜力的测算和评估开展了大量研究, 但目前主要偏重于贝藻类的可移出碳汇。以2005~2012年的中国海水养殖数据为参考, 运用物质质量评估法估算出中国海水养殖的年均碳汇能力

达到100万吨碳以上(纪建悦和王萍萍, 2015)。海藻养殖在养殖碳汇中具有重要作用。以大型海藻为例, 据估测全球大陆架海域大型藻类每年可固碳7亿吨(0.7Gt)(何培民等, 2015)。中国的海藻养殖种类丰富, 其中对碳汇能力起主要作用的是海带, 其碳汇贡献率达73%左右, 其次是裙带菜、紫菜、江蓠, 这四类海藻的产量占海水养殖藻类总产量的97%以上(纪建悦和王萍萍, 2015)。

事实上, 海水养殖碳汇中除了这些可移出碳汇外, 养殖活动中产生和增加的微型生物(浮游植物、细菌、古菌、原生生物等)、海洋溶解碳库(含RDOC)、颗粒碳库以及沉积碳库等亦是养殖碳汇中的重要部分。例如, 处于食物网基础地位的浮游植物是海洋初级生产力的主要贡献者, 其生产的有机碳经食物网传递到各渔业生物过程中, 根据各营养之间的生态转化效率, 最终归结到不同量级的渔业碳汇中, 浮游植物生物碳汇量对整个渔业碳汇量的值具有重要影响(孙军, 2013)。海洋微型生物作为微食物网的重要组成, 是海洋生物地球化学循环和海洋碳汇功能的重要驱动者。在 CO_2 升高引起的全球变暖、海洋酸化、富营养化引起的近海低氧区或无氧区形成等会对渔业资源造成严重不利影响的背景下, 海洋微型生物在驱动海洋碳汇形成过程中扮演的角色将愈加重要, 为“蓝碳”的重要贡献者。

海水养殖过程中会有大量DOC和POC释放到海水当中, 这些有机碳物质一部分可被微生物快速利用, 转变为微生物自身生物量, 并通过微食物环和食物链向原生动、浮游动物、鱼虾等各营养级进行传递, 最终成为可移出碳汇的一部分; 一部分未被利用的POC(包括微型生物或藻类残体、碎屑、鱼虾贝死亡后的尸体等)可沉降到海底, 构成养殖环境沉积碳库的重要组成; 还有相当一部分DOC和POC会在微生物作用下转变为 CO_2 , 重新排放到大气中; 与此同时, 微生物的新陈代谢活动, 如通过MCP机制还会产生大量的RDOC, 该部分碳具有较强的生物惰性, 可在海水中长久储存, 构成养殖碳汇中稳定的惰性溶解碳库(图2)。

4 近海养殖环境碳汇的不同形成过程与机制及其碳汇能力

海洋碳源汇形成过程错综复杂, 揭示其形成机制

图1 2005~2016年中国海水养殖总产量及贝藻产量(万吨)

图2 大型藻类(如海带)养殖环境的碳储存与输出途径

参照2016年中国养殖藻类产量和养殖面积, 计算获得2016年中国大型养殖藻类的初级生产力(即固碳量)约为352万吨, 可移出碳量67.7万吨, 输入到海水中的DOC量约为82.2~91.5万吨, 形成的POC量约为99.4万吨, 形成的沉积碳量为>14万吨, 通过微型生物碳泵(MCP)形成的RDOCt为>60万吨

不仅需要海陆空全方位立体研究, 还需要物理海洋学、生物海洋学、大气学等多学科与技术交叉。就养殖碳汇而言, 虽然人们已深刻认识到近海贝藻类养殖以及渔业捕捞活动均为移出碳汇, 可以增加海洋碳汇效应, 并进而提出了碳汇渔业的新概念; 但是, 对养殖碳汇形成、养殖增汇或渔业增汇中的过程与机理还有待进一步深入解析。近海养殖碳汇除了贝藻等可移出碳汇, 还涉及养殖区域海-气界面 CO_2 交换通量、微生物驱动的海洋储碳、养殖水体溶解有机碳库、碳的沉积等多个方面(图2)。其中不仅包括碳固定和碳储存过程, 还有碳释放过程。因此, 不仅应注重宏观尺度上可移出碳汇的研究, 还应该在微观尺度上从微生物以

及有机物组分和性质等多角度对海洋碳汇形成机理进行深入研究。对养殖碳汇各个关键过程和参数的全面深入了解, 是实现近海养殖环境碳汇过程与潜力进行科学、客观、合理评价的前提和基础。

4.1 近海养殖贝藻可移出碳汇

养殖贝藻可移出碳汇主要是指对藻类和贝类等养殖产品收获的生物量碳。对藻类可移出碳汇而言, 主要是通过光合固碳生长所形成的生物量碳; 对贝类可移出碳汇而言, 主要是指贝类生长过程中形成的碳酸钙贝壳。目前可移出碳汇的量是根据养殖产量和养殖生物体内碳含量来计算。据计算, 1999~2008年间, 通过

收获养殖海藻, 每年从中国近海移出的碳量为30~38万吨, 平均34万吨, 10年合计移出342万吨; 而通过收获养殖贝类, 每年从中国近海移出的碳量为70~99万吨, 平均86万吨, 其中67万吨碳以贝壳的形式被移出海洋, 10年合计移出862万吨。贝藻合计, 1999~2008年间, 中国海水贝藻养殖每年从水体中移出的碳量为100~137万吨, 平均120万吨, 相当于每年移出440万吨CO₂; 10年合计移出1204万吨, 相当于移出4415万吨CO₂。如果按照林业使用碳的算法计量, 中国海水贝藻养殖每年对减少大气CO₂的贡献相当于造林50万多公顷所能固碳的碳量(张继红等, 2005; Tang等, 2011)。宋金明(2011)估算, 中国近海养殖的经济海藻每年可固定约40万吨的碳, 并且如果海藻养殖产量每年增加5%, 则到2020年, 其固碳量可到达93万吨/年。

随着科学认知和评估技术手段的提高, 关于养殖大型藻类产生的颗粒有机碳、溶解有机碳开始得到广泛的关注。严立文等(2011)在综合考虑藻类产量和形成的POC、DOC的基础上, 估算出中国和世界的养殖海藻的固碳总量分别为每年78.38和127.25万吨。

贝类的碳汇功能目前尚有争议, 究其原因, 主要是因为贝类呼吸和钙化作用中, 会释放部分的二氧化碳。但是, 对于贝类的固碳功能, 应该从整个养殖系统来看。养殖贝类通过两种途径利用海洋中的碳, 一种途径是吸收海水中的HCO₃⁻(碳酸氢根)形成CaCO₃(碳酸盐)躯壳(俗称贝壳), 其反应式如下: $\text{Ca}^{2+} + 2\text{HCO}_3^- = \text{CaCO}_3 + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$, 虽然该过程每形成1mol的碳酸钙会释放1mol的CO₂, 但是可以从海水中吸收2mol的碳酸氢根; 另一种途径是通过滤食摄取水体中的悬浮颗粒有机碳(包括浮游植物和颗粒有机碎屑等)促进贝类个体软组织的生长。贝类软组织形成过程中呼吸释放的碳量大小以及收获后软组织不同处理或加工方式是衡量其碳汇功能的重要参数。同时, 贝类生活过程中形成的粪便和假粪生物性沉积物沉降, 可加快碳的垂直输运, 促进沉积碳库的形成。从1999~2014年, 通过贝类养殖, 每年有(0.90±0.10)Mt C a⁻¹从海域中移除, 其中, 贝壳固碳(0.69±0.06)Mt C a⁻¹。

从碳汇渔业的角度来看, 通过比例合理的贝藻综合养殖体, 藻类可吸收贝类释放的N、P和二氧化碳, 而贝类可吸收藻类产生的碎屑POC, 贝藻的相互作用、相互促进, 增强了综合养殖系统的碳汇功能。唐启升等(2013)将多营养层次综合养殖与单养的碳汇量

进行了比较研究, 分别单养海带和鲍可移出碳量为4387.5和1808.3kg (hm² a)⁻¹, 而将两者进行综合养殖后, 可移出的碳量则达到12311.9kg (hm² a)⁻¹。可见, 贝藻养殖是实现生物碳汇扩增有效技术途径之一, 可操作性和潜力巨大。

4.2 养殖区域海-气界面CO₂交换通量

海-气界面CO₂的源和汇主要由表层海水CO₂分压的分布变化引起, 并受水体动力学过程、海水温度、酸碱度、生物活动等物理、化学及生物因素的影响(Takahashi等, 2002; Sabine等, 2004; 鲁中明和戴民汉, 2006)。准确估算海-气界面CO₂气体交换通量是评价海洋CO₂源/汇特征的一项重要指标。随着近几年碳汇渔业的兴起, 近海养殖环境海-气界面CO₂气体交换通量开始受到关注。据报道, 在典型贝藻养殖区域(如桑沟湾)每年的净吸收无机碳的量高达13.9万吨(Jiang等, 2015)。对山东俚岛湾大型藻类养殖水域海-气界面CO₂交换通量的研究表明, 与非养殖区相比, 一年四季中海藻养殖区域均表现出了极显著的碳汇特征, 但夏季养殖区水体对CO₂的吸收能力显著弱于秋、冬及春季, 主要是因为夏季大部分海带已收获完毕, 大型藻类的生物量处于全年最低时期(蒋增杰等, 2013)。然而基于海-气界面CO₂交换通量特征显示, 贝类养殖区域的碳汇特征远低于大型藻类养殖区(蒋增杰等, 2012), 这充分证明大型海藻养殖在碳汇渔业中的重要作用。另外, 对中国乳山公家岛以东牡蛎养殖水域秋季海-气界面CO₂交换通量研究揭示养殖区与对照区海-气界面CO₂交换通量差异不显著, 表明牡蛎呼吸、钙化生理活动释放的CO₂对海-气界面CO₂的交换影响不大(蒋增杰等, 2012)。

4.3 近海养殖水体溶解有机碳库

溶解有机碳(DOC)和颗粒有机碳(POC)是海水中有有机碳的主要存在形式。近海渔业养殖水体中有机质的含量显著高于自然水体, 其在养殖环境内的能量代谢和物质循环中发挥着重要作用。近海贝藻养殖区的有机碳库研究对于人类探索浅海“遗漏的碳汇”问题显得格外重要(张继红等, 2005)。大型海藻通过光合作用能有效吸收海水中的CO₂, 合成自身物质, 并在生长过程中释放大量的DOC, 实现碳从大气向海水的输送(Li等, 2007; Zou和Gao, 2014; Krause-Jensen和Duarte,

2016). 据报道, 冬季桑沟湾中养殖海带是海水中DOC的一个重要来源, 养殖海带能以 $(64.81 \pm 40.86) \mu\text{mol L}^{-1} \text{ day}^{-1}$ 的速度向海水中释放DOC(Mahmood等, 2017). 海带生长过程中产生的有机碳会通过“微生物环”进一步被细菌分解转化(Mann, 2000; Ogawa等, 2001). 我们对威海爱莲湾海带养殖区进行调查发现养殖区的异养浮游细菌生物量显著高于非养殖区域, 这可能主要是由于海藻的光合作用产物、海藻向外释放的透明胞外聚合物以及降解产生的腐殖质等促进了细菌的新陈代谢和生长. 细菌生长代谢过程中通过MCP机制会产生并向外释放RDOC, 从而将一部分碳长期封存于海洋中(Vörös等, 2003; 刘卫云等, 2011). 与传统的渔业养殖中“可移出的碳汇”相比, 海藻养殖环境中的RDOC是海洋中“看不见的碳汇过程”之一. 有实验表明通过对海带幼苗3年的养殖, 海带生长过程中释放的DOC含量为 $1.29 \text{ kg C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$, 约占海带养殖总固碳量的26%(Abdullah和Fredriksen, 2004).

近海大型藻类养殖不但对近海碳汇具有重要贡献, 还通过沉降和漂浮作用对深海储碳贡献显著(Krause-Jensen和Duarte, 2016). 据估算, 全球大型海藻的年总储碳量达到 173 Tg C a^{-1} , 其中90%储碳量可被输送到深海, 而在近海和陆架海埋藏的大型藻类年储碳量为 20 Tg C a^{-1} . 大型海藻的主要储碳方式为通过DOC的输出将碳储存在混合层以下(年储碳量为 117 Tg C a^{-1}), 而以POC形式埋藏和输出形成的年储碳量为 49 Tg C a^{-1} . 中国藻类总产量216.93万吨每年, 养殖面积为140.82千公顷(中国渔业统计年鉴, 2017), 结合中国藻类养殖面积与文献报道的海藻养殖初级生产力($2.5 \text{ kg C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$; Whittaker, 1975), 估算中国藻类养殖总初级生产力(PP)约为352万吨, DOC按照PP的23~26%估算(Abdullah和Fredriksen, 2004; Krause-Jensen和Duarte, 2016), 得出中国大型藻类养殖每年向水体中释放的DOC约为 $82.2 \times 10^4 \sim 91.5 \times 10^4 \text{ t C a}^{-1}$ (图2). 这些输出的DOC大部分是经过微型生物利用、转化而较难在养殖区被利用的海藻养殖环境特异的RDOCt(Environmental context-specific RDOC, RDOCt)(Jiao等, 2014). 据报道中国东海和南海水体中除活性和半活性DOC外, RDOCt约占海区总DOC的77~94%(Gan等, 2016; 曹凤娇, 2017), 据此估算中国海藻养殖释放RDOCt的通量约 $>60 \times 10^4 \text{ t C a}^{-1}$ (图2), 可见海藻养殖向临近海域输出RDOCt的当量与海藻养殖可移出

的碳汇相当, MCP在海藻养殖碳汇中有着十分重要的贡献.

不仅大型藻类对海洋碳汇有突出贡献, 贝类养殖在近海碳循环中也发挥重要作用. 滤食性贝类通过摄食活动可将海水中的部分POC去除, 实现碳在食物链中的进一步传递和转化; 并且贝类排放大量的粪便, 这些粪便不仅大量堆积在养殖区底部, 还会向水体中释放DOC. 目前关于贝类对碳循环的贡献还缺乏较全面的认识. 不过最新研究表明贝类(如牡蛎和扇贝等)向海水中释放的DOC能够快速被重新吸收利用, 较难在海水中得到积累, 为此对海水DOC库的贡献甚微. 与其相比, 海带等藻类释放的DOC可能是由于惰性化程度更高的原因, 与非养殖对照, 能够在海水中不断得到积累, 呈现出了较高的DOC产率(Mahmood等, 2017).

4.4 微型生物储碳

海洋微型生物指个体小于 $20 \mu\text{m}$ 的微型浮游生物和小于 $2 \mu\text{m}$ 的超微型浮游生物, 包括各类自养、异养的真核和原核单细胞生物等. 现代海洋中, 微生物被认为是海洋元素循环和能量流动的主要驱动者和承担者, 海洋微型生物通过光合作用可产生人类呼吸需要的50%的 O_2 , 并将大气中相同比例的 CO_2 封存于海洋(Dubilier等, 2015). 近年来, 国内外围绕海洋碳元素生物地球化学循环的深入研究大大改变了以往对海洋生物储碳过程与机制的认识, 形成了一些新的概念和理论. 比如: MCP系统阐述了微型生物的碳转化效应, 解析了海洋中巨大的RDOC来源, 丰富了对传统的BP海洋固碳机理的认识, 尤为重要是认识到海洋固碳不等于储碳(Jiao等, 2010, 2014; 焦念志, 2012). 在健康的渔业养殖环境中, 浮游植物、微生物等通过光合作用或细胞代谢吸收海水中二氧化碳, 合成自身生源物质, 并直接或间接为鱼虾贝类等提供天然饵料, 有益于海洋生物资源的繁殖与养护, 避免近海渔业资源枯竭. 因此微生物蓝碳最终可归结到不同量级的渔业碳汇中, 对整个渔业碳汇量的值具有重要影响. 例如在渔业养殖生产活动中, 浮游植物是滤食性贝类的主要食物来源, 贝类等可移出的碳汇本质是来源于浮游植物等微型自养生物的光合固碳, 也正因如此, 有专家提出渔业碳汇是浮游植物碳汇过程的一个重要分支, 其碳汇测算等同于生态系统中关于浮游植物颗粒态有

机碳通量的测算(孙军, 2013). 此外, 这些微型生物还是海洋水体的“清道夫”, 通过新陈代谢等可实现对近海污染物质(如石油、农药和除草剂等污染物)的降解与清除. 通过微型生物的生境修复作用, 减少近海污染对渔业资源的毒害, 有益于海洋渔业资源多样性保护和可持续利用(Radwan等, 2002). 更为重要的是, 微型生物自身就是养殖环境碳汇功能的主体之一. 微型生物作为海洋碳循环的重要驱动者, 尽管体积小, 但是丰度大、分布广, 其总量占海洋中现存生物量的比例可高达90%(Pomeroy等, 2007), 并贡献全球海洋总初级生产力的60%以上(>29.1Gt)(Uitz等, 2010). 即使在中国南黄海、珠江口等边缘海海域和近岸河口区域, 微型生物对总初级生产力的贡献也达到50%以上(黄邦钦等, 2005; 傅明珠等, 2009). 近些年来, 中国近海环境质量下滑, 富营养化、赤潮/绿潮、缺氧等环境灾害事件频发, 极大地影响了渔业养殖产品质量和产量, 同时削弱了近海的碳汇潜力. 在这一不利环境中微型生物蓝碳在渔业养殖碳汇功能中的贡献就更加凸显.

此外, 海洋微生物和大型藻类亦密不可分, 大型藻类在生长与死亡过程中释放的DOC和POC是微生物生长的重要碳源. 微生物生长过程中又可将有机物转化成无机营养物质, 并释放出微量元素, 有利于大型藻类的光合固碳. 此外, 大型藻类与养殖动物等生长过程中会释放大量的含碳有机质到海水环境中, 这些含碳有机质的相对生物活性较高, 极易被呼吸释放重返大气, 使得碳元素在海洋中的停留时间较短, 不能构成真正意义上的碳汇. 然而, 海洋环境中这些活性含碳有机质能被微生物快速吸收利用, 并经过一系列转化过程形成RDOC, 这些RDOC可在海水中储存几千年之久(Jiao等, 2010, 2015). 据报道, 海洋DOC库的95%是生物不能利用的RDOC(Hansell等, 2009; 焦念志等, 2011; Jiao等, 2015), 这一部分可长久储存的RDOC库是养殖碳汇功能的重要部分, 微型生物正是这一RDOC库的主要贡献者(Jiao等, 2010, 2011b, 2014). 微型生物通过一系列代谢活动过程固碳储碳, 形成了巨大的海洋有机碳库, 其中约97%以DOC的形式存在(Hansell等, 2009). 在这一碳汇形成过程中, 涉及复杂多样的微型生物代谢过程, 其中直接指向固碳储碳的关键过程主要为微型生物驱动的固碳作用和RDOC的产生/释放(张瑶等, 2017). MCP对整个海洋储碳的贡献可以达到 0.2Pg C a^{-1} , 与BP的贡献相当(Legendre等,

2015). 在养殖海藻碳汇中, 估算MCP驱动形成的RDOC与海藻可移出的碳汇量相当, 约>60万吨. 总之, 浮游植物和细菌等微型生物自身生物量即是养殖环境蓝碳的重要组成部分, 微型生物代谢活动所驱动形成的DOC(主要指RDOC)库亦是养殖环境看不见的蓝碳的重要贡献者.

4.5 碳的生物沉积

近海沉积物中的有机碳埋藏是海洋巨大碳库的重要组成部分之一, 养殖活动对于这一过程具有重要贡献(Krause-Jensen和Duarte, 2016). 发展碳汇渔业的重要理论基础之一即生物泵固碳, 是基于颗粒碳从表层向深层转移和储存的过程. 虽然在大洋环境中, 大部分颗粒有机碳在沉降过程中会被降解转化成 CO_2 , 极少部分进入沉积物, 致使生物泵固定的有机碳向深海的输出十分有限; 然而, 碳的沉积现象在陆架海区域却非常显著, 陆架海区水体较浅, 生物泵引起的碳沉降对沉积物中有机碳埋藏具有重要贡献. 根据报道的海带碎屑生产值(平均为 $706\text{g C m}^{-2} \text{a}^{-1}$)(Krumhansl和Scheibling, 2012), 结合2016年中国海藻养殖面积, 估算得到中国大型藻类养殖释放的藻类颗粒有机碳(POC)量约为99.4万吨. 另外, 因养殖海带收割时海带的固着器(根状)和部分茎部往往会残留在养殖筏架上, 后期脱落到水体当中, 亦可构成POC的重要部分, 为此养殖海带所生产的POC实际量要大于99.4万吨/年. 这部分POC中一部分在微生物降解下转化为DOC, 一部分未被降解和利用的可沉入海底. 此外, 在贝藻养殖环境中, 贝类大量摄食藻类和有机碎屑等后的未消化部分也以生物沉积物的形式沉降, 将大量有机碳输送至海底. 到达沉积物中的碳, 除了部分被再悬浮、分解和再利用外, 大部分被埋藏在海底, 从而促进了养殖环境的碳汇功能. 据报道, 桑沟湾养殖栉孔扇贝通过生物沉积作用每年有 $8.71 \times 10^4 \text{t}$ 碳被沉降到沉积物界面, 这些碳绝大部分被埋藏从而脱离了地球化学循环(张明亮等, 2011). 桑沟湾海带养殖海区5~7月期间的颗粒沉积速率约为 $273 \sim 279\text{g m}^{-2} \text{day}^{-1}$, 而海带收割后10~11月期间颗粒沉积速率大幅减少, 约为 $189\text{g m}^{-2} \text{day}^{-1}$, 不同时期的平均沉积速率为 $162.34\text{g m}^{-2} \text{day}^{-1}$ (蔡立胜等, 2003). 以桑沟湾海藻养殖区的平均颗粒沉积速率作为参考, 结合中国海藻养殖总面积以及养殖区沉积物有机碳含量百分比($0.17 \sim 0.87\%$)(Xia等,

2014), 估算中国海藻养殖区有机碳沉积通量为 $>0.14 \text{ Tg C a}^{-1}$. 由于可见, 除了可移出的碳汇外, 碳的生物沉积亦是养殖碳汇功能的重要部分, 同时这些沉积碳中的一部分在海底流等物理作用的驱动下可向大洋及深海输送(图2).

4.6 微生物驱动的碳释放

对近海养殖环境蓝碳潜力进行全面评估, 不仅需综合考虑各种碳固定和碳储存途径, 还需考虑碳释放过程. 众所周知, 微生物呼吸作用是促进海洋中碳释放的关键因素, 尤其在近海富营养化环境中这一作用更加明显. 近海过高密度的养殖活动可限制养殖区与外部水体间的水体交换, 使养殖区域有机碳浓度远高于非养殖区, 同时富含有机物质的贝类粪便及藻类碎屑会大量沉积到海底(夏斌等, 2013). 在这一有机质极为丰富的环境中, 微生物代谢旺盛, 可将大量有机碳转化成 CO_2 释放到空气中去. 另外, 若有机质含量过于丰富, 刺激生物活动, 常造成养殖环境沉积物处于缺氧或厌氧状态, 厌氧微生物代谢活动急剧增强, 使沉积物中累计的有机碳以 CH_4 和 CO_2 的形式向外释放, 同时还伴有 SO_2 等有害气体的产生, 不仅危害养殖生物, 还削弱养殖环境的碳汇能力. 一项针对胶州湾养殖环境沉积物-水体的 CH_4 释放的研究发现, 在不同季节 CH_4 释放有所变动, 但就全年而言沉积物是 CH_4 的净源. 胶州湾沉积物向海水释放 CH_4 的年通量估计为 $1.0 \times 10^7 \sim 1.74 \times 10^7 \text{ mol a}^{-1}$ (杨晶, 2009). 在沉积物中厌氧产甲烷活性微生物代谢是有机碳转化为 CH_4 的重要驱动力. 微生物呼吸作用驱动的碳释放可在一定程度上抵消碳汇功能. 例如贝藻养殖过程中其向外释放的有机物质相当一部分会在微生物分解和呼吸作用下形成 CO_2 排放到空气中去, 目前对这一部分释放出的 CO_2 的定量研究还较缺乏.

4.7 碳的深远海输送

目前贝藻养殖主要分布在水深小于30~50m的陆架海浅海区域, 在黄海、渤海和东海区域养殖活动尤为密集, 养殖环境中无论是水体中的DOC和POC浓度, 还是沉积物厚度以及沉积物中有机碳的埋藏都远高于陆架海边缘及大洋区域. 然而由于这些陆架海区水动力状况复杂, 海洋环流、潮汐、潮流和波浪均会对陆架海浅海区域沉积碳的再悬浮以及水体中有机碳物质

的长距离输运产生影响, 实现浅海有机碳物质跨陆架输运到达大洋及深海(石学法等, 2016; 乔璐璐等, 2017). 例如, 近年来在东海大陆架海边缘的冲绳海槽海域以及西太马里亚纳海沟7000多米深的沉积物中均有发现陆源有机物质(乔璐璐等, 2017; Luo等, 2017). 近海养殖环境中的DOC、RDOC以及沉积碳作为养殖环境蓝碳的重要部分, 在复杂的水动力因素影响下, 很大一部分会向深远海输送, 实现在海洋中的长期储存. 据估算, 全球大型海藻的年总储碳量的90%可被输送到深海(Krause-Jensen和Duarte, 2016), 这部分长距离输送到深远海的有机碳亦是养殖蓝碳的重要部分和看不见的碳汇.

5 近海贝藻养殖蓝碳贡献的争论

对于近海大藻养殖碳汇目前还存在一定的争议. 例如联合国把一年生的植物没有列在碳汇清单里, 而大型养殖海藻一般都是年生海藻. 传统意义上认为的养殖海藻蓝碳主要是指收获的藻类生物量碳或“可移出的碳”部分, 主要争议点是这部分可移出碳的储存周期问题. 实际上对于养殖藻类可移出碳而言, 所收获藻类的不同处理或加工方式对可移出碳的储存周期具有重要影响, 若用于食用, 会很快重新转化为 CO_2 释放到大气, 无法构成长时间尺度上的碳汇. 但若用于生产燃料, 则可一定程度上减少化石燃料燃烧引起的碳排放, 是另一种形式的“减排”. 联合国之前没把一年生的养殖大藻列在碳汇清单中的原因, 归根结底是仅仅关注了养殖藻类的碳生物量, 而忽视了藻类生长过程中向海水释放大量有机碳, 且其中大部分会经MCP作用形成可在海洋中长久储存的RDOC, 其总量与可收获藻类总生物量碳相当, 同时还有相当一部分碳经沉降作用在沉积物中埋藏, 并向深远海输送. 事实上, 大型海藻养殖过程中产生的这些看不见的RDOC碳汇和沉积碳汇是养殖蓝碳的重要贡献者, 是毫无争议的碳汇.

此外, 对于贝类固碳争议较大, 主要是因为贝类呼吸和钙化作用中, 会释放部分的二氧化碳. 对于贝壳部分而言, 贝壳的钙化形成过程中每形成1mol的碳酸钙会释放1mol的 CO_2 , 这个过程可以从海水中吸收2mol的碳酸氢根, 相当于从海水不稳定的无机碳库中移出1mol的碳量, 转化为了稳定的蓝碳.

6 结语

近海海水养殖增汇是应对全球气候变化和促进低碳经济可持续发展的重要科学途径之一, 近海养殖蓝碳开发是中国农业现代化建设的重要战略之一, 中国在养殖增汇方面的发展潜力巨大. 深入研究和解析近海养殖环境中碳汇形成过程与机制是制定科学合理的蓝碳开发策略的基础. 目前, 人们已明确认识到贝藻养殖等活动在近海增汇中的重要作用, 并尝试对其碳汇功能进行了系列评估, 同时提出了推进以海藻养殖为主体的生态牧场建设、加快海草床生态系统修复等近海增汇的重要途径. 然而, 近海养殖碳汇除了贝藻等可移出的碳汇外, 那些被忽视的看不见的碳汇也是非常重要的组成部分. 养殖过程中贝藻死亡释放或自身分泌DOC和POC的过程与机制, 养殖环境中由微生物驱动的海洋储碳、碳的沉积埋藏、养殖水体RDOC库以及养殖环境有机碳的跨陆架深远海输送等都是对养殖碳汇定量评估的重要考虑因素. 将来随着国际和国内碳交易体系和制度规则的不断完善, 海洋碳汇将可能纳入未来碳市场. 与森林碳汇相似, 近海养殖蓝碳的开发将可能成为一个新的经济增长点. 通过深入研究, 全面揭示近海养殖环境碳循环关键过程与机制, 建立科学的养殖碳汇评估方法与技术体系, 优化兼顾环境与经济的养殖增汇模式, 是促进近海养殖业可持续发展的重要途径.

致谢 感谢厦门大学焦念志院士在文章写作过程中提供宝贵意见和建议. 感谢中国科学院青岛生物能源与过程研究所杨丽强与迟向群博士以及中国水产科学院黄海水产研究所康绪明博士在资料提供和图表绘制方面的帮助. 感谢两位审稿人提出的宝贵意见和建议.

参考文献

- 蔡立胜, 方建光, 梁兴明. 2003. 规模化浅海养殖水域沉积作用的初步研究. 中国水产科学, 10: 305-310
- 曹凤娇. 2017. 南海细菌生产力, 对溶解有机碳的利用及控制因子研究. 硕士学位论文. 厦门: 厦门大学
- 傅明珠, 王宗灵, 孙萍, 李艳, 李瑞香. 2009. 南黄海浮游植物初级生产力粒级结构与碳流途径分析. 海洋学报, 31: 100-109
- 何培民, 刘媛媛, 张建伟, 吴海龙, 于克锋, 霍元子, 张建恒. 2015. 大型海藻碳汇效应研究进展. 中国水产科学, 22: 588-595
- 黄邦钦, 洪华生, 柯林, 曹振锐. 2005. 珠江口分粒级叶绿素 α 和初级

- 生产力研究. 海洋学报, 27: 180-186
- 纪建悦, 王萍萍. 2015. 我国海水养殖业碳汇能力测度及其影响因素分解研究. 海洋环境科学, 34: 871-878
- 蒋增杰, 方建光, 韩婷婷, 李加琦, 毛玉泽, 王巍. 2013. 大型藻类规模化养殖水域海-气界面 CO_2 交换通量估算. 渔业科学进展, 34: 50-56
- 蒋增杰, 方建光, 王巍, 李加琦, 孟伟, 谭林涛, 侯仕萱. 2012. 乳山宫家岛以东牡蛎养殖水域秋季海-气界面 CO_2 交换通量研究. 水产学报, 36: 1592-1598
- 焦念志. 2012. 海洋固碳与储碳——并论微生物在其中的重要作用. 中国科学: 地球科学, 42: 1473-1486
- 焦念志, 骆庭伟, 张瑶, 张锐, 汤凯, 陈峰, 曾永辉, 张永雨, 赵艳琳, 郑强, 李彦玲. 2011. 海洋微生物碳泵——从微生物生态过程到碳循环机制效应. 厦门大学学报: 自然科学版, 50: 387-401
- 刘卫云, 章守宇, 王凯, 陈清满. 2011. 枸杞岛海域春季异养浮游细菌和生态环境因子关系初步研究. 上海海洋大学学报, 20: 437-444
- 鲁中明, 戴民汉. 2006. 海气 CO_2 通量与涡动相关法应用研究进展. 地球科学进展, 21: 1046-1057
- 农业部渔业渔政管理局. 2016. 中国渔业统计年鉴. 北京: 中国农业出版社
- 乔璐璐, 王震, 刘世东, 李广雪, 刘雪, 黄玲玲, 薛文静, 仲毅. 2017. 从陆架海到西太平洋: 黄、东海悬浮体跨陆架输运通道与机制. 地学前缘, 24: 134-140
- 石学法, 胡利民, 乔淑卿, 白亚之. 2016. 中国东部陆架海沉积有机碳研究进展: 来源、输运与埋藏. 海洋科学进展, 34: 313-327
- 宋金明. 2011. 中国近海生态系统碳循环与生物固碳. 中国水产科学, 18: 703-711
- 孙军. 2013. 海洋浮游植物与渔业碳汇计量. 渔业科学进展, 34: 90-96
- 唐启升, 方建光, 张继红, 蒋增杰, 刘红梅. 2013. 多重压力胁迫下近海生态系统与多营养层次综合养殖. 渔业科学进展, 34: 1-11
- 唐启升, 刘慧. 2016. 海洋渔业碳汇及其扩增战略. 中国工程科学, 18: 68-73
- 夏斌, 陈碧鹃, 崔毅, 崔正国, 张旭志, 刘淮德, 丁东生, 蒋增杰. 2013. 夏季桑沟湾养殖水域有机碳的平面分布特征及其来源分析. 渔业科学进展, 34: 44-49
- 严立文, 黄海军, 陈纪涛, 杨曦光. 2011. 我国近海藻类养殖的碳汇强度估算. 海洋科学进展, 29: 537-545
- 杨晶. 2009. 胶州湾水体及沉积物中甲烷和氧化亚氮的生物地球化学研究. 硕士学位论文. 青岛: 中国海洋大学. 1-90
- 张继红, 方建光, 唐启升. 2005. 中国浅海贝藻养殖对海洋碳循环的贡献. 地球科学进展, 20: 359-365
- 张明亮, 邹健, 毛玉泽, 张继红, 方建光. 2011. 养殖栉孔扇贝对桑沟湾碳循环的贡献. 渔业现代化, 38: 13-16
- 张瑶, 赵美训, 崔球, 樊炜, 齐家国, 陈鹰, 张永雨, 高坤山, 樊景凤, 汪

- 光义, 严重玲, 卢豪良, 罗亚威, 张子莲, 郑强, 肖伟, 焦念志. 2017. 近海生态系统碳汇过程、调控机制及增汇模式. *中国科学: 地球科学*, 47: 438–449
- Abdullah M I, Fredriksen S. 2004. Production, respiration and exudation of dissolved organic matter by the kelp *Laminaria hyperborea* along the west coast of Norway. *J Mar Biol Ass*, 84: 887–894
- Dubilier N, McFall-Ngai M, Zhao L. 2015. Microbiology: Create a global microbiome effort. *Nature*, 526: 631–634
- FAO. 2016. The State of World Fisheries and Aquaculture 2016. Contributing to Food Security and Nutrition for All. Rome: Food and Agriculture Organization. 200
- Gan S, Wu Y, Zhang J. 2016. Bioavailability of dissolved organic carbon linked with the regional carbon cycle in the East China Sea. *Deep-Sea Res Part II-Top Stud Oceanogr*, 124: 19–28
- Hansell D A, Carlson C A, Repeta D J, Schlitzer R. 2009. Dissolved organic matter in the ocean: A controversy stimulates new insights. *Oceanography*, 22: 202–211
- Ji Y, Xu Z, Zou D, Gao K. 2016. Ecophysiological responses of marine macroalgae to climate change factors. *J Appl Phycol*, 28: 2953–2967
- Jiang Z, Li J, Qiao X, Wang G, Bian D, Jiang X, Liu Y, Huang D, Wang W, Fang J. 2015. The budget of dissolved inorganic carbon in the shellfish and seaweed integrated mariculture area of Sanggou Bay, Shandong, China. *Aquaculture*, 446: 167–174
- Jiao N Z, Herndl G J, Hansell D A, Benner R, Kattner G, Wilhelm S W, Kirchman D L, Weinbauer M G, Luo T, Chen F, Azam F. 2010. Microbial production of recalcitrant dissolved organic matter: Long-term carbon storage in the global ocean. *Nat Rev Microbiol*, 8: 593–599
- Jiao N Z, Tang K, Cai H Y, Mao Y J. 2011a. Increasing the microbial carbon sink in the sea by reducing chemical fertilization on the land. *Nat Rev Microbiol*, 9: 75–75
- Jiao N Z, Herndl G J, Hansell D A, Benner R, Kattner G, Wilhelm S W, Kirchman D L, Weinbauer M G, Luo T, Chen F, Azam F. 2011b. The microbial carbon pump and the oceanic recalcitrant dissolved organic matter pool. *Nat Rev Microbiol*, 9: 555–
- Jiao N Z, Legendre L, Robinson C, Thomas H, Luo Y W, Dang H, Liu J, Zhang R, Tang K, Luo T W, Li C, Wang X X, Zhang C L. 2015. Comment on “Dilution limits dissolved organic carbon utilization in the deep ocean”. *Science*, 350: 1483–1483
- Jiao N Z, Robinson C, Azam F, Thomas H, Baltar F, Dang H, Hardman-Mountford N J, Johnson M, Kirchman D L, Koch B P, Legendre L, Li C, Liu J, Luo T, Luo Y W, Mitra A, Romanou A, Tang K, Wang X, Zhang C, Zhang R. 2014. Mechanisms of microbial carbon sequestration in the ocean—Future research directions. *Biogeosciences*, 11: 5285–5306
- Krause-Jensen D, Duarte C M. 2016. Substantial role of macroalgae in marine carbon sequestration. *Nat Geosci*, 9: 737–742
- Krumhansl K, Scheibling R. 2012. Production and fate of kelp detritus. *Mar Ecol Prog Ser*, 467: 281–302
- Legendre L, Rivkin R B, Weinbauer M G, Guidi L, Uitz J. 2015. The microbial carbon pump concept: Potential biogeochemical significance in the globally changing ocean. *Prog Oceanogr*, 134: 432–450
- Li J Y, Murauchi Y, Ichinomiya M, Agatsuma Y, Taniguchi K. 2007. Seasonal changes in photosynthesis and nutrient uptake in *Laminaria japonica* (Laminariaceae; Phaeophyta). *Aquac Sci*, 55: 587–597
- Longhurst A R, Glen Harrison W. 1989. The biological pump: Profiles of plankton production and consumption in the upper ocean. *Prog Oceanogr*, 22: 47–123
- Luo M, Gieskes J, Chen L, Shi X, Chen D. 2017. Provenances, distribution, and accumulation of organic matter in the southern Mariana Trench rim and slope: Implication for carbon cycle and burial in hadal trenches. *Mar Geol*, 386: 98–106
- Mahmood T, Fang J, Jiang Z, Ying W, Zhang J. 2017. Seasonal distribution, sources and sink of dissolved organic carbon in integrated aquaculture system in coastal waters. *Aquacult Int*, 25: 71–85
- Mann K H. 2000. Ecology of Coastal Waters: With Implications for Management. Oxford: Blackwell Science
- Nelleman C, Corcoran E, Duarte C M, Valdes L, Deyoung C, Fonseca L, Grimsditch G. 2009. Blue carbon: The role of healthy oceans in binding carbon. *Rev Bras Cienc Solo*, 32: 589–598
- Ogawa H, Tanoue E. 2003. Dissolved organic matter in oceanic waters. *J Oceanogr*, 59: 129–147
- Ogawa H, Amagai Y, Koike I, Kaiser K, Benner R. 2001. Production of refractory dissolved organic matter by bacteria. *Science*, 292: 917–920
- Pomeroy L, leB. Williams P, Azam F, Hobbie J. 2007. The microbial loop. *Oceanography*, 20: 28–33
- Radwan S S, Al-Hasan R H, Salamah S, Al-Dabbous S. 2002. Bioremediation of oily sea water by bacteria immobilized in biofilms coating macroalgae. *Int Biodeter Biodegr*, 50: 55–59
- Sabine C L, Feely R A, Gruber N, Key R M, Lee K, Bullister J L, Wanninkhof R, Wong C S, Wallace D W R, Tilbrook B, Millero F J, Peng T H, Kozyr A, Ono T, Rios A F. 2004. The oceanic sink for anthropogenic CO₂. *Science*, 305: 367–371
- Stone R. 2010. The invisible hand behind a vast carbon reservoir. *Science*, 328: 1476–1477
- Takahashi T, Sutherland S C, Sweeney C, Poisson A, Metzl N, Tilbrook

- B, Bates N, Wanninkhof R, Feely R A, Sabine C, Olafsson J, Nojiri Y. 2002. Global sea-air CO₂ flux based on climatological surface ocean pCO₂, and seasonal biological and temperature effects. *Deep-Sea Res Part II-Top Stud Oceanogr*, 49: 1601–1622
- Tang Q S. 2014. Management strategies of marine food resources under multiple stressors with particular reference of the Yellow Sea large marine ecosystem. *Front Agr Sci Eng*, 1: 85–90
- Tang Q S, Zhang J H, Fang J G. 2011. Shellfish and seaweed mariculture increase atmospheric CO₂ absorption by coastal ecosystems. *Mar Ecol Prog Ser*, 424: 97–104
- Uitz J, Claustre H, Gentili B, Stramski D. 2010. Phytoplankton class-specific primary production in the world's oceans: Seasonal and interannual variability from satellite observations. *Glob Biogeochem Cycle*, 24: GB3016–1696
- Vörös L, V.-Balogh K, Koncz E, Kovács A. 2003. Phytoplankton and bacterioplankton production in a reed-covered water body. *Aquatic Bot*, 77: 99–110
- Whittaker R H. 1975. *Communities and Ecosystems*. 2nd ed. New York: MacMillan Publ. Co
- Xia B, Cui Y, Chen B, Cui Z, Qu K, Ma F. 2014. Carbon and nitrogen isotopes analysis and sources of organic matter in surface sediments from the Sanggou Bay and its adjacent areas, China. *Acta Oceanol Sin*, 33: 48–57
- Xu D, Gao Z, Zhang X, Qi Z, Meng C, Zhuang Z, Ye N. 2011. Evaluation of the potential role of the macroalga *Laminaria japonica* for alleviating coastal eutrophication. *Bioresource Tech*, 102: 9912–9918
- Xu Z, Gao K. 2012. NH₄⁺ enrichment and UV radiation interact to affect the photosynthesis and nitrogen uptake of *Gracilaria lemaneiformis* (Rhodophyta). *Mar Pollut Bull*, 64: 99–105
- Xu Z G, Zou D G, Gao K S. 2010. Effects of elevated CO₂ and phosphorus supply on growth, photosynthesis and nutrient uptake in the marine macroalga *Gracilaria lemaneiformis* (Rhodophyta). *Botanica Marina*, 53: 123–129
- Zou D, Gao K. 2014. Temperature response of photosynthetic light- and carbon-use characteristics in the red seaweed *Gracilariopsis lemaneiformis* (Gracilariales, Rhodophyta). *J Phycol*, 50: 366–375