

# 我国近海大型海藻生态修复策略与典型案例

何培民<sup>1,2</sup>, 段元亮<sup>1</sup>, 刘巧<sup>1</sup>, 刘金林<sup>1</sup>, 刘炜<sup>1</sup>, 张建恒<sup>1,2,3</sup>, 方建光<sup>4</sup>,  
蒋增杰<sup>4</sup>, 吴海龙<sup>5</sup>, 李信书<sup>5</sup>, 汤坤贤<sup>6</sup>, 李可俊<sup>1</sup>, 李娟英<sup>1,3</sup>,  
赵爽<sup>1</sup>, 常佳楠<sup>1</sup>, 张建琳<sup>1</sup>, 包炎琳<sup>1</sup>, 赵子滔<sup>1</sup>, 张梅菁<sup>1</sup>

(1. 上海海洋大学海洋生态与环境学院, 上海 201306;

2. 上海海洋大学水产种质资源发掘与利用教育部重点实验室, 上海 201306;

3. 自然资源部大都市区国土空间生态修复工程技术创新中心, 上海 200003;

4. 中国水产科学研究院黄海水产研究所, 山东 青岛 266000; 5. 江苏海洋大学, 江苏 连云港 222005;

6. 自然资源部第三海洋研究所, 福建 厦门 361005)

**摘要:**随着人类对海洋过度开发,我国近海环境问题日益突出,多处海域出现重度富营养化现象。目前,国内外不仅对海水富营养化现象日益关注,而且积极寻求有效的生态修复方案,其中应用大型海藻进行海洋生态环境修复得到普遍认可。大型海藻修复不仅有助于实现生态环境良性循环,构建稳定的海洋生态系统,还可使得经济发展与生态环境保护相协调。本研究基于我国近海生态环境问题以及相应的大型海藻修复策略展开综述,对现有的大型海藻生态修复特点及近海封闭海域、半封闭海域和开放海域生态修复工程案例进行总结,以期对我国近海富营养化海域生态修复起到一定的指导作用。

**关键词:**海洋生物学;近海环境;富营养化;大型海藻修复;修复案例

DOI: 10.3969/J.ISSN.2095-4972.2021.04.001

中图分类号:P735

文献标识码:A

文章编号:2095-4972(2021)04-0557-07

海洋生态系统(Marine Ecosystem)在维系自然界物质循环、净化环境、缓解温室效应等方面发挥着重要作用。21世纪是“海洋世纪”,但人类活动对海洋不合理开发使得海洋生态环境变得更为脆弱,海水污染、资源浪费、资源枯竭等海洋环境问题日益突出。2005年,国际千年生态评估计划报告指出,由于经济发展和生态资源过度开发,全球超过60%的海洋生态系统服务功能在退化,其中超过35%的红树林和超过20%的珊瑚礁被破坏,另有20%的珊瑚礁正逐步退化;部分地区海岸带湿地损失已超过30%<sup>[1]</sup>。至今全世界仍然有三分之一的海岸生态系统处于严重退化状态<sup>[2]</sup>。

我国近岸海域富营养化仍然比较严重,致使近海藻华生态灾害频繁发生。2000—2019年期间,我

国近海平均每年单细胞有害藻华事件达50~80次<sup>[3]</sup>,2007年起我国黄海已连续15a大规模暴发绿潮,且近年来金潮暴发正演变为我国新型海洋生态灾害。上述生态灾害严重威胁国家海洋生态安全,近海富营养化防治已刻不容缓。

本研究针对我国近海富营养化问题,分别介绍了近海生态修复工程技术及封闭海域、半封闭海域、开放海域水体生态修复效果,旨在为我国近海富营养化海域生态治理提供参考。

## 1 我国近海环境现状仍然十分严峻

随着国家和各级政府不断发力,近海生态环境整体趋好,环境恶化势头逐步遏制,但我国海洋生态环境现状仍然十分严峻,富营养化问题依旧突出。

收稿日期:2020-08-04

**基金项目:**国家重点研发计划资助项目(2018YFD0901500);国家科技支撑计划资助项目(2012BAC07B00);国家自然科学基金资助项目(41576163,31502172);上海市自然科学基金资助项目(21ZR1427400);自然资源部大都市区国土空间生态修复工程技术创新中心开放课题资助项目(CXZX202006);上海市海洋局资助项目(沪海科2015-02);农业部淡水水产种质资源重点实验室开放课题资助项目(A1-2037-17-000122)

**作者简介:**何培民(1959—),男,博士,教授;E-mail: pmhe@shou.edu.cn

## 1.1 我国近海陆源排污和水产养殖自身污染趋势

陆源污染物持续输入是导致我国近海富营养化加剧的主要原因。据报道,陆源排放对近岸海域的污染贡献占 70% 以上<sup>[4]</sup>。2007—2017 年期间,我国每年大约有 1 102~1 653 万吨化学需氧量(COD)、164~237 万吨硝态氮、15.0~60.7 万吨氨氮、5.0~7.6 万吨亚硝态氮、18.0~35.9 万吨总磷等通过河流直接排入近海。其中 2010—2017 年期间,直排海污染源废水中硝态氮、亚硝态氮排放量总体不变,而氨氮、总磷、COD 分别下降 64.57%、42.64%、57.96%<sup>[5]</sup>。

我国近海水产养殖投喂饵料造成的污染不容忽视。由于海水网箱养殖过程中大量投喂野杂鱼,饵料系数最高可达 1:7,这对附近海域造成巨大营养负荷<sup>[6-7]</sup>。徐楠楠等(2008)<sup>[8]</sup>曾对象山港网箱养殖区调查发现,网箱中心区营养状态指数(E)超标 31 倍。海水网箱养殖每养成 1 吨鱼类,向环境输入氮、磷分别高达 161 kg 和 32 kg<sup>[9]</sup>。挪威峡湾地区大西洋鲑(*Salmo salar*)网箱养殖环境监测数据显示,每生产 1 吨大西洋鲑,则向环境中排放 11 kg 溶解无机氮和 1.81 kg 溶解无机磷<sup>[10]</sup>。我国是海水养殖大国且养殖产量逐年递增,2019 年我国海水养殖产量为 2 065.33 万吨,其中鱼类养殖产量已达 160.58 万吨。如果平均按照 1:3 饵料系数计算,大约使用了 480 万吨饵料投喂,这相当于有 320 万吨饵料直接进入海水,使近海富营养化进一步加剧。

## 1.2 我国近海富营养化依然严重,赤潮、绿潮、金潮三潮齐发

2010—2019 年夏季我国近海未达到 I 类水质海域约为  $9 \times 10^4 \sim 18 \times 10^4$  km<sup>2</sup>,呈现逐年下降趋势,这说明水质在逐渐变好。2019 年夏季我国近海未达到 I 类水质海域面积最低,总面积为 89 670 km<sup>2</sup>,其中 II 类、III 类、IV 类、劣 IV 类水质海域面积分别为 34 330、18 440、8 560、28 340 km<sup>2</sup>。2012—2019 年夏季,我国近海富营养化面积约为  $5 \times 10^4 \sim 10 \times 10^4$  km<sup>2</sup>,总体亦呈下降趋势,特别是轻度富营养化面积下降更为明显。2019 年夏季我国近海富营养化海域总面积为 42 710 km<sup>2</sup>,与 2012 年相比,下降 60% 左右<sup>[11]</sup>,其中东海富营养化海域面积最大,为 32 190 km<sup>2</sup><sup>[5]</sup>,占我国近海富营养化海域总面积 75.4%,应列为重点防控区。

近年来,由微藻和大型藻类形成的有害藻华事件持续增加。2007—2019 年,我国近海每年赤潮暴发数量和面积分别为 35~82 次、1 991~14 102 km<sup>2</sup>,总体呈下降趋势<sup>[11]</sup>。自 2007 年以来,我国黄海连

续每年暴发绿潮,2007—2019 年间我国黄海每年绿潮暴发涉及面积为 1 500~58 000 km<sup>2</sup>,最大覆盖面积为 21~2 100 km<sup>2</sup>,每年对山东、江苏省近海生态、渔业和旅游业造成重大影响<sup>[12]</sup>。2020 年自然资源部在江苏辐射沙洲紫菜养殖筏架海区开展绿潮源头防控试验,防控效果显著,黄海绿潮暴发最大面积与 2019 年相比约减少了 60%,这为今后黄海绿潮防控与治理工作奠定了坚实基础。此外,2012 年上海海洋大学何培民教授团队在长江口附近海域发现大规模金潮,面积超过 400 km<sup>2</sup>;2017 年初,金潮铜藻侵袭江苏省辐射沙洲条斑紫菜(*Neoporphyra yezoensis*)养殖区,造成经济损失约 5 亿元<sup>[13-15]</sup>。

## 2 我国近海富营养化海域生态修复方法与策略

### 2.1 生态修复定义与主要方法

生态修复(Ecological Remediation/Restoration)是指协助受损和退化的自然生态系统进行恢复、重建和改善的过程。具体说,生态修复是在生态学原理指导下,以生物修复为基础,结合物理修复、化学修复及工程技术措施,通过优化组合,使之达到最佳效果和最低耗费的一种综合修复污染环境的方法<sup>[16]</sup>。国内外治理海域污染采用的方法主要有:物理方法、化学方法、生物方法等 3 类。其中物理方法成本较高;化学方法易造成二次污染,多应用于局部海域突发事件;而生物方法成本低、对环境友好、易规模化,被科研人员广泛应用于多种场合<sup>[17]</sup>。

### 2.2 近海富营养化海域生态修复策略

我国近海海域面积辽阔,而近海环境最突出的问题是氮、磷浓度超标<sup>[17]</sup>。因此,开展海洋生态修复工作迫在眉睫。近海海域生态修复是利用生物本身的生理特性治理水体富营养化,目前主要有植物修复、动物修复、微生物修复等方式。其中,水生植物修复是治理富营养化水体氮、磷污染的重要手段,用于海域生态修复的海洋水生植物主要有红树、滨海盐沼植物、海草、大型海藻、浮游植物等,其中红树林、滨海盐沼植物、海草场、海藻场为降低海洋富营养化做出了重大贡献。

大型海藻栽培已被国内外公认为近海富营养化海域生态修复的最佳途径之一,也是现阶段应用于海洋生态系统修复最多的生物<sup>[8]</sup>。开展大型海藻栽培可一举多得<sup>[18-19]</sup>:①通过海上人工大规模栽培生产大量海藻生物质,加工为海藻健康食品或工业原料,获得巨大经济效益;②大型海藻栽培大量吸收海水中的无机氮、磷等物质,显著缓解海区富营养化

状态,并抑制赤潮发生;③大型海藻通过光合作用大量吸收 CO<sub>2</sub>和碳酸盐(碳汇),并提高海水 pH 值,防止海洋酸化;④海藻叶片可为海洋动物提供优质隐蔽的栖息地、产卵地及繁殖地,并可提供天然饵料。2019年,我国大型海藻总产量为 254 万吨<sup>[20]</sup>,按照藻体中氮、磷、碳元素平均含量计算<sup>[21]</sup>,我国仅大型海藻栽培产业,就直接从近海富营养化海水中移出 57.6 万吨碳、11.52 万吨氮、5 760 吨磷。焦念志(2021)<sup>[22]</sup>估算我国大型海藻初级生产力(固碳量)为 3.52 Tg/a,其中移出碳通量 0.68 Tg/a。

### 2.3 近海富营养化海域生态修复发展趋势

将海洋水生植物、海洋动物修复和微生物修复方法相结合,通过生态系统和食物链等人工操纵手段,以期达到更好的生态修复效果。目前国内外在大型海藻规模化栽培和海藻场基础上,构建了近海海域多营养层级综合养殖系统(Integrated Multi-trophic Aquaculture, IMTA)、海洋牧场(Marine Ranching),利用“藻-贝-鱼”人工生态系统净化和修复近海生态环境,并通过海洋生物资源增殖,进一步保护和养护海洋生物栖息地,在保护生态环境前提下实现经济效益最大化,这有望成为近海生态修复的主流模式。

## 3 近海海域大型海藻生态修复基本模式

近海海域大型海藻生态修复基本模式主要有大型海藻栽培、构建海藻场 2 种模式。

### 3.1 大型海藻栽培生态修复模式

我国是大型海藻栽培大国,大型海藻栽培产量一直位居世界之首。我国沿海主要栽培海带(*Saccharina japonica*)、裙带菜(*Undaria pinnatifida*)、羊栖菜(*Hizikia fusiforme*)、鼠尾藻(*Sargassum thunbergii*)、铜藻(*Sargassum horner*)、条斑紫菜、坛紫菜(*Neoporphyra haitanensis*)、龙须菜(*Gracilaria lemaneiformis*)、真江蓠(*Gracilaria verruco*)、麒麟菜属(*Eucheuma*)、石花菜(*Gelidium amansii*)、红毛菜(*Bangia atropurpurea*)、石莼(*Ulva lactuca*)、礁膜属(*Monostroma*)、浒苔(*Ulva prolifera*)等种、属<sup>[19]</sup>。我国已形成了山东省海带和裙带菜、江苏省条斑紫菜、福建省和广东省龙须菜等大规模人工栽培藻场,区域内每年很少发生赤潮灾害<sup>[23-24]</sup>,栽培期间海区水质甚至可高达 I—II 类<sup>[25]</sup>,可见生态修复效果十分明显。其中,桑沟湾海带栽培海区研究表明,海带产量以 8.45 万吨计算,每年可移出 2.8 万吨碳和 1 538 吨氮<sup>[26]</sup>;江苏省辐射沙洲条斑紫菜栽培区研究结果表明,266.6 km<sup>2</sup>条斑紫菜栽培和收获可移除

3 688.15 吨氮和 105.61 吨磷<sup>[27]</sup>。江苏省连云港海州湾紫菜养殖区研究显示,2018 年江苏省海州湾 2.7 × 10<sup>8</sup> m<sup>2</sup>紫菜养殖区年产条斑紫菜 1.05 万吨,可固氮量约为 569.1 吨<sup>[28]</sup>。半封闭海湾象山港海带栽培海区研究表明,每年象山港可移除 297 吨氮和 42 吨磷<sup>[29]</sup>;南澳深澳湾龙须菜栽培海区研究表明,15 km<sup>2</sup>的龙须菜栽培和收获可移除 2 212 吨氮、174 吨磷和 1.33 万吨碳,并释放氧气 3.47 万吨<sup>[24]</sup>。

### 3.2 海藻场生态修复模式

海藻场(Seaweed Bed,也称海藻床)生态系统是一种以大型底栖藻类为主,辅以其他浮游生物、游泳动物、底栖动物等生物群落共同构成,位于水深 20~30 m 以内的硬质底质上的海洋生态系统<sup>[30-31]</sup>。该生态系统是海洋中初级生产力最高的区域之一,其初级生产力占全球海洋初级生产力的 10%~30%,在海岸带海域发挥着重要的生态功能:减缓水流、形成鱼虾贝类生息场所、吸收氮磷等营养盐、固定 CO<sub>2</sub>等<sup>[31-33]</sup>。因对海藻场保护不太重视,全球海藻场退化十分严重。我国海藻场研究起步相对较晚,2017—2019 年上海海洋大学章守宇教授团队对我国沿海从南到北(海南 10 个、广西 4 个、广东 3 个、福建 6 个、浙江 8 个、江苏 1 个、山东 10 个、河北 3 个、辽宁 7 个)共 52 个区域的 40 个海藻场进行了实地调查,发现最高平均生物量可达 30 kg/m<sup>2</sup>,主要优势种为铜藻、海带、裙带菜、海黍子(*Sargassum miyabei*)、海蒿子(*Sargassum pallidum*)、瓦氏马尾藻(*Sargassum vachellianum*)、亨氏马尾藻(*Sargassum henslowianum*)和匍枝马尾藻(*Sargassum polycystum*)等<sup>[31]</sup>。

为防止海藻场的继续衰退,我国在山东、浙江、福建、广东等沿海省份均实施了不同规模的海藻场修复工作<sup>[34-37]</sup>。其中,山东省长岛已投入大量资金构建海藻场,通过改善水质以吸引海参和海胆等珍贵海洋动物栖息,提高渔民经济收入。浙江省南麂列岛先后开展铜藻、羊栖菜、鼠尾藻、海带等大型海藻场建设,涉及海域面积 150 hm<sup>2</sup>,核心区面积 30 hm<sup>2</sup>;浙江省枸杞岛铜藻场达 1.5 × 10<sup>4</sup> m<sup>2</sup>、瓦氏马尾藻场达 2 × 10<sup>4</sup> m<sup>2</sup>,福建省平潭坛紫菜海藻场达 5 000 m<sup>2</sup><sup>[38]</sup>。此外,中国水产科学研究院南海水产研究所黄洪辉研究员团队在深圳和惠州大亚湾分别构建了 1 600 m<sup>2</sup>和 8 500 m<sup>2</sup>的马尾藻场。

## 4 大型海藻生态修复案例

### 4.1 上海市金山城市沙滩封闭海域生态修复案例

2004—2006 年,上海市金山区政府在杭州湾北岸建设了封闭海域城市沙滩,面积为 1.75 km<sup>2</sup>,水源

取自杭州湾海域。围隔堤坝合拢时水体为劣 IV 类海水,富营养化十分严重,浮游植物密度几乎达到赤潮暴发临界水平。

2006—2008 年,上海海洋大学何培民教授团队在城市沙滩围隔海区首次使用大面积栽培大型海藻真江蓠的方法进行生态修复,发现大型海藻栽培对富营养化封闭海区具有显著生态修复效果。2006 年 9 月开始大规模栽培真江蓠,1 个月后与非修复区相比,修复区水体活性磷几乎检测不出,无机氮已达到 I 类水质标准,修复区氨态氮、硝态氮、亚硝态氮、活性磷分别降低了 92.0%~92.8%、34.7%~78.7%、46.5%~88.3%、49.8%~100.0%,高锰酸盐指数(COD<sub>Mn</sub>)、5 日生化需氧量(BOD<sub>5</sub>)、叶绿素 a(Chl a)含量分别降低了 19.4%~28.9%、18.0%~39.4%、22.6%~70.3%,溶氧(DO)含量比对照区增加 6.8%~19.4%,水体透明度增加 2.7%~12.6%。修复区海水水质自 2006 年 11 月起均转变为 I~II 类,其中 2006 年 12 月至 2007 年 2 月间均为 I 类海水。2006 年 10 月至 2007 年 5 月间营养状态指数均小于 1。6 个月后水体中已检测不出氨态氮,透明度由原先的 0.5 m 提升至 3.0~6.0 m。栽培真江蓠后,整个封闭海域浮游藻类密度一直控制在  $1 \times 10^7$  个/m<sup>3</sup> 以下。封闭海域大型海藻生态修复匹配模式估算表明,维持 1.72 km<sup>2</sup> 封闭海域常年处于 II 类均值水质,需栽培真江蓠 18.0 吨,维持海区常年处于 I 类均值水质,需栽培真江蓠 21.8 吨<sup>[8]</sup>。

## 4.2 山东省半封闭海域桑沟湾多营养层级生态养殖生态修复案例

桑沟湾是位于我国山东半岛的半封闭海湾,面积约 144 km<sup>2</sup>,是我国重要的规模化海水养殖海湾。该湾自 20 世纪 50 年代开始就开展了海带筏式养殖,目前主要养殖种类为海带、长牡蛎(*Crassostrea gigas*)、栉孔扇贝(*Azumapecten farreri*)、刺参(*Oplopanax elatus*)、皱纹盘鲍(*Haliotis discus*)等,其中海带年产量约 8 万吨(干重),长牡蛎产量 6 万吨,栉孔扇贝 1.5 万吨。多年来,桑沟湾海带养殖一直处于主体地位,随着养殖种类多样化,逐步实践并发展了大型海藻、贝类、海参、鱼类等多种多营养层次生态养殖模式,其中以“海带-鲍-海参”、“海带-牡蛎-海参”等形式的筏式多营养层级生态养殖模式,以及鳗草(*Zostera marina*)床海区海珍品底播生态养殖模式的应用最为广泛,并取得了显著的经济、生态、社会效益<sup>[39-41]</sup>。以“海带-鲍-海参”多营养层级生态养殖模式为例,每个养殖单元(4 条浮梗)可增加产值 1.68 万元,综合效益提高 30% 以上,所提供

的食物供给功能服务价值远高于鲍单养和海带单养,价值比分别为 2.06:1 和 9.83:1<sup>[42]</sup>。多营养层次生态养殖模式在提供优质蛋白、产生经济效益的同时,还兼具水质调控、气候调节等生态服务功能。据估算,桑沟湾海带养殖每年可移除 2.8 万吨碳和 1 538 吨氮<sup>[26]</sup>;年际尺度的溶解无机碳收支估算结果表明,桑沟湾整体表现为“碳汇”,固碳强度达  $1.39 \times 10^5$  吨/年<sup>[43]</sup>。国内外多种不同方法的研究均证实,桑沟湾规模化养殖虽已开展了 30 多年,但水质和沉积环境质量仍保持在 I 类水平<sup>[44-45]</sup>。近些年来,以多营养层级生态养殖模式为核心的“桑沟湾模式”在世界范围内得到了广泛认可<sup>[46]</sup>。2016 年,联合国粮农组织(FAO)和亚太水产养殖中心网络(NACA)将桑沟湾生态养殖模式作为亚太地区 12 个可持续集约化水产养殖的典型成功案例之一,并向全世界进行了推广<sup>[47]</sup>。

## 4.3 江苏省开放海域大型海藻栽培生态修复案例

江苏沿海辐射沙洲作为世界最大的潮间带辐射状水下沙脊,其滩涂面积日益淤积扩大,生态系统区域特色鲜明。然而,据海洋环境质量公报显示,陆上污染输入耦合内源养殖污染使该海域富营养化明显,环境质量退化严重。

自 20 世纪 80 年代初以来,辐射沙洲海域逐渐形成了以经济红藻条斑紫菜为主要栽培品种的海水养殖产业。随着人类对海藻食品和产品需求的日益提高,其栽培面积和产值也不断增加,已形成价值 200 亿的条斑紫菜行业经济产业链,且基于条斑紫菜生态修复潜力而建立的生态修复模式和牧场经济也逐步形成。因此,对辐射沙洲海域条斑紫菜栽培牧场生态修复能力和碳汇贡献的研究已成为在该海域建立生态修复手段和策略的重要基点。2013—2014 年上海海洋大学何培民教授团队对辐射沙洲海域开展的全年水质监测结果显示,辐射沙洲海域条斑紫菜核心栽培区(养殖面积约 133.3 km<sup>2</sup>)营养盐浓度显著低于非养殖区,通过栽培和采收每月可移除 8.04~1 495.72 吨氮和 0.19~43.86 吨磷,栽培季节总共移除 3 688.15 吨氮和 105.61 吨磷。栽培 133.3 km<sup>2</sup> 的条斑紫菜可使辐射沙洲离岸 5 km 至 100 km 海域水体氮指标达 III 类海水标准,磷达到 II 类标准。条斑紫菜栽培总产量约 5.895 万吨(干重),总销售额达 65.08 亿元<sup>[27]</sup>。

## 5 结论与展望

综上所述,大型海藻规模化栽培对富营养化海域具有十分显著的生态修复效果。我国近海富营养

化比较严重,频繁引起藻华灾害发生<sup>[48-49]</sup>,为此,我国更需要发展大型海藻栽培产业,并通过规范有序开展规模化大型海藻栽培和收获,有效控制和削减近海富营养化程度,最终抑制赤潮、绿潮、金潮等发生。同时,大型海藻也是一种健康海产品,具有较高的经济价值,目前我国海藻产业已达 2 000 多亿元,可见大型海藻栽培产业的发展不但可以治理近海富营养化环境问题,还可以带来巨大的经济效益和社会效益。美国前藻类学会主席 Charlie Yarish 教授

在 2014 年世界养殖大会上就提出应用大型海藻经营海洋污染物的理念,即通过大型海藻把海洋污染物转化为经济价值的产品,这与我国现在倡导的污染物资源化利用理念相一致。若我国能更好地发展多营养层次生态养殖、海洋牧场等模式,将会带来更大的经济效益。总之,研究人员需坚守“自然修复为主,人工修复为辅”的生态修复理念,在沿海富营养化海域治理过程中,上述生态修复工程技术有望得到广泛应用。

## 参考文献:

- [1] PROGRAM M E A. Ecosystems and human well-being: wetlands and water synthesis: a report of the Millennium Ecosystem Assessment[M]. Washington: World Resources Institute, 2005.
- [2] BLACK A N, SNEKSER J L, AL-SHAER L, et al. A review of the Leon springs pupfish (*Cyprinodon bovinus*) long-term conservation strategy and response to habitat restoration[J]. Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems, 2016, 26(2): 410-416.
- [3] 俞志明, 陈楠生. 国内外赤潮的发展趋势与研究热点[J]. 海洋与湖沼, 2019, 50(3): 474-486.
- [4] YU Z M, CHEN N S. Emerging trends in red tide and major research progresses[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2019, 50(3): 474-486.
- [5] 姚瑞华, 王金南, 王东. 国家海洋生态环境保护“十四五”战略路线图分析[J]. 中国环境管理, 2020, 12(3): 29-34.
- [6] YAO R H, WANG J N, WANG D. A roadmap analysis of national marine eco-environmental protection during the 14th five-year period[J]. Chinese Journal of Environmental Management, 2020, 12(3): 29-34.
- [7] 中华人民共和国自然资源部. 2000-2019 中国海洋环境质量公报[EB/OL]. [2020-08-04]. <http://www.mnr.gov.cn/sj/sjfw/hy/gbagg/zghyhjzlgbl/>.
- [8] Ministry of Natural Resources of the People's Republic of China. 2000-2019 China marine environmental quality bulletin [EB/OL]. [2020-08-04]. <http://www.mnr.gov.cn/sj/sjfw/hy/gbagg/zghyhjzlgbl/>.
- [9] 蒋增杰, 方建光, 毛玉泽, 等. 海水鱼类网箱养殖水域沉积物有机质的来源甄别[J]. 中国水产科学, 2012, 19(2): 348-354.
- [10] JIANG Z J, FANG J G, MAO Y Z, et al. Identification of aquaculture-derived organic matter in the sediment associated with coastal fish farming [J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2012, 19(2): 348-354.
- [11] GAO Q F, CHEUNG K L, CHEUNG S G, et al. Effects of nutrient enrichment derived from fish farming activities on macroinvertebrate assemblages in a subtropical region of Hong Kong[J]. Marine Pollution Bulletin, 2005, 51(8/9/10/11/12): 994-1 002.
- [12] 徐姗楠, 温珊珊, 吴望星, 等. 真江藻 (*Gracilaria verrucosa*) 对网箱养殖海区的生态修复及生态养殖匹配模式[J]. 生态学报, 2008, 28(4): 1 466-1 475.
- [13] XU S N, WEN S S, WU W X, et al. Bioremediation of caged fish aquaculture by the red alga *Gracilaria verrucosa* in an integrated multi-trophic aquaculture system[J]. Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(4): 1 466-1 475.
- [14] 林钦, 林海棠, 李纯厚, 等. 我国网箱养殖环境氮磷负荷量评估[C]//. 南海水产研究所. 海洋水产科学研究文集. 广州: 广东科技出版社, 1999: 217-225.
- [15] LIN Q, LIN H T, LI H C, et al. Assessment of nitrogen and phosphorus load in cage culture environment in China[C]//. South China Sea Fisheries Research Institute. Collected works of marine and fisheries scientific research. Guangzhou: Guangdong Science and Technology Press, 1999: 217-225.
- [16] HUSA V, KUTTI T, ERVIK A, et al. Regional impact from fin-fish farming in an intensive production area (Hardangerfjord, Norway)[J]. Marine Biology Research, 2014, 10(3): 241-252.
- [17] 中华人民共和国生态环境部. 2000—2019 中国近岸海域环境质量公报[EB/OL]. [2020-09-17]. <http://www.mee.gov.cn/hjzl/sthjzk/jagbl/>.
- [18] China Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China. 2000-2019 Bulletin of China marine ecological environment [EB/OL]. [2020-09-17]. <http://www.mee.gov.cn/hjzl/sthjzk/jagbl/>.
- [19] 何培民, 张建恒, 霍元子, 等. 中国绿潮[M]. 北京: 科学出版社, 2019.
- [20] HE P M, ZHANG J H, HUO Y Z, et al. Green tides of China[M]. Beijing: Science Press, 2019.
- [21] ZHUANG M M, LIU J L, DING X W, et al. *Sargassum* blooms in the East China Sea and Yellow Sea: formation and management[J]. Marine Pollution Bulletin, 2021, 162: 111 845.
- [22] DING X W, ZHANG J H, ZHUANG M M, et al. An increase in new *Sargassum* (Phaeophyceae) blooms along the coast of the East China Sea and the Yellow Sea[J]. Phycologia, 2019, 58: 374-381.
- [23] LIU J L, XIA J, ZHUANG M M, et al. Golden seaweed tides accumulated in *Pyropia* aquaculture areas are becoming a normal phenomenon in the Yellow Sea of China[J]. Science of the Total Environment, 2021, 774: 145 726.
- [24] 周启星, 魏树和, 张倩茹. 生态修复[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2006.
- [25] ZHOU Q X, WEI S H, ZHANG Q R. Ecological restoration[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2006.
- [26] 徐姗楠, 何培民. 我国赤潮频发现象分析与海藻栽培生物修复作用[J]. 水产学报, 2006, 30(4): 554-561.

- XU S N, HE P M. Analysis of phenomena for frequent occurrences of red tides and bioremediation by seaweed cultivation[J]. Journal of Fisheries of China, 2006, 30(4): 554-561.
- [18] COTTIER-COOK E J, NAGABHATLA N, BADIS Y, et al. Safeguarding the future of the global seaweed aquaculture industry[M]. Oban; United Nations University (INWEH) and Scottish Association for Marine Science Policy Brief, 2016.
- [19] HE P M, XU S N, ZHANG H Y, et al. Bioremediation efficiency in the removal of dissolved inorganic nutrients by the red seaweed, *Porphyra yezoensis*, cultivated in the open sea[J]. Water Research, 2008, 42(4/5): 1 281-1 289.
- [20] 中华人民共和国农业农村部. 2020 中国渔业统计年鉴[M]. 北京: 中国农业出版社, 2020.  
Ministry of Agriculture and Rural Affairs of the People's Republic of China. 2020 China fishery statistical yearbook[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2020.
- [21] 柴召阳, 何培民. 我国海洋富营养化趋势与生态修复策略[J]. 科学, 2013, 65(4): 48-52.  
CHAI Z Y, HE P M. Trends of marine eutrophication in China and ecological restoration strategy[J]. Science, 2013, 65(4): 48-52.
- [22] 焦念志. 研发海洋“负排放”技术支撑国家“碳中和”需求[J]. 中国科学院院刊, 2021, 36(2): 179-187.  
JIAO N Z. Developing ocean negative carbon emission technology to support national carbon neutralization[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2021, 36(2): 179-187.
- [23] 汤坤贤, 游秀萍, 林亚森, 等. 龙须菜对富营养化海水的生物修复[J]. 生态学报, 2005, 25(11): 252-259.  
TANG K X, YOU X P, LIN Y S, et al. A study on bioremediation of eutrophication of mariculture waters by *Gracilaria lemaneiformis*[J]. Acta Ecologica Sinica, 2005, 25(11): 252-259.
- [24] 杨宇峰. 近海环境生态修复与大型海藻资源利用[M]. 北京: 科学出版社, 2017.  
YANG Y F. Coastal environmental bioremediation and seaweed resource utilization[M]. Beijing: Science Press, 2017.
- [25] HE P M, XU S N, ZHANG H Y, et al. Bioremediation efficiency in the removal of dissolved inorganic nutrients by the red seaweed, *Porphyra yezoensis*, cultivated in the open sea[J]. Water Research, 2008, 42(4/5): 1 281-1 289.
- [26] 毛玉泽, 李加琦, 薛素燕, 等. 海带养殖在桑沟湾多营养层次综合养殖系统中的生态功能[J]. 生态学报, 2018, 38(9): 3 230-3 237.  
MAO Y Z, LI J Q, XUE S Y, et al. Ecological functions of the kelp *Saccharina japonica* in integrated multi-trophic aquaculture, Sanggou Bay, China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(9): 3 230-3 237.
- [27] WU H L, HUO Y Z, ZHANG J H, et al. Bioremediation efficiency of the largest scale artificial *Pyropia yezoensis* cultivation in the open sea in China[J]. Marine Pollution Bulletin, 2015, 95: 289-296.
- [28] 王娟, 曹雷. 紫菜养殖对海州湾水质影响分析[J]. 环境科技, 2020, 33(5): 54-58.  
WANG J, CAO L. Effect of laver culture on water quality in Baizhou Bay[J]. Environmental Science and Technology, 2020, 33(5): 54-58.
- [29] JIANG Z B, LIU J J, LI S L, et al. Kelp cultivation effectively improves water quality and regulates phytoplankton community in a turbid, highly eutrophic bay[J]. Science of the Total Environment, 2020, 707(10): 135 561.
- [30] KAZUO O. Coastal environment and seaweed-bed ecology in Japan[J]. Kuroshio Science, 2008, 2(1): 15-20.
- [31] 章守宇, 刘书荣, 周曦杰, 等. 大型海藻生境的生态功能及其在海洋牧场应用中的探讨[J]. 水产学报, 2019, 43(9): 2 004-2 014.  
ZHANG S Y, LIU S R, ZHOU X J, et al. Ecological function of seaweed-formed habitat and discussion of its application to sea ranching[J]. Journal of Fisheries of China, 2019, 43(9): 2 004-2 014.
- [32] 许敏. 枸杞岛马尾藻海藻床生境特征的初步研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2011.  
XU M. The preliminary research of habitat characteristics of Sargassaceae kelp bed in Gouqi island[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2011.
- [33] 赵淑江. 海洋藻类生态学[M]. 北京: 海洋出版社, 2014.  
ZHAO S J. Marine algae ecology[M]. Beijing: Ocean Press, 2014.
- [34] 谭海丽. 无居民海岛潮间带大型海藻生态修复研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2012.  
TAN H L. The study about ecological remediation of intertidal macroalgae bed in the non-residents sea islands[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2012.
- [35] 于永强. 潮间带鼠尾藻床构建技术研究[D]. 烟台: 烟台大学, 2013.  
YU Y Q. Establishment of seaweed beds of *Sargassum thunbergii* in intertidal zone[D]. Yantai: Yantai University, 2013.
- [36] 曲元凯. 三种马尾藻的生长繁殖和人工藻场的构建[D]. 湛江: 广东海洋大学, 2015.  
QU Y K. The growth, reproduction and artificial seaweeds beds construction of three species of *Sargassum*[D]. Zhanjiang: Guangdong Ocean University, 2015.
- [37] 王惠, 谢恩义, 徐日升, 等. 碓洲马尾藻 *Sargassum naozhouense* 幼孢子体附着及原生态恢复[J]. 广东海洋大学学报, 2019, 39(1): 42-48.  
WANG H, XIE E Y, XU R S, et al. Attachment of young sporophores and restoration in natural rocky habitats of *Sargassum naozhouense*[J]. Journal of Guangdong Ocean University, 2019, 39(1): 42-48.
- [38] 何培民, 张泽宇, 张学成, 等. 海藻栽培学[M]. 北京: 科学出版社, 2018.  
HE P M, ZHANG Z Y, ZHANG X C, et al. Seaweed cultivation[M]. Beijing: Science Press, 2018.
- [39] FANG J G, ZHANG J, XIAO T, et al. Integrated multi-trophic aquaculture (IMTA) in Sanggou Bay, China[J]. Aquaculture Environment Interactions, 2016, 8: 201-205.
- [40] 唐启升. 环境友好型水产养殖发展战略: 新思路、新任务、新途径[M]. 北京: 科学出版社, 2017.  
TANG Q S. Environment-friendly aquaculture development strategy: new ideas, new tasks, new ways[M]. Beijing: Science Press, 2017.
- [41] JIANG Z J, FANG J G, HAN T T, et al. The role of *Gracilaria lemaneiformis* in eliminating the dissolved inorganic carbon released from calcification and respiration process of *Chlamys farreri*[J]. Journal of Applied Phycology, 2014, 26(1): 545-550.

- [42] 刘红梅, 齐占会, 张继红, 等. 桑沟湾不同养殖模式下生态系统服务和价值评价[M]. 青岛: 中国海洋大学出版社, 2014.  
LIU H M, QI Z H, ZHANG J H, et al. Ecosystem service and value evaluation of different aquaculture mode in Sunggou Bay[M]. Qingdao: China Ocean University Press, 2014.
- [43] JIANG Z J, LI J Q, QIAO X D, et al. The budget of dissolved inorganic carbon in the shellfish and seaweed integrated mariculture area of Sanggou Bay, Shandong, China[J]. *Aquaculture*, 2015, 446: 167-174.
- [44] SHERMAN K, MCGOVERN G. Frontline observations on climate change and sustainability of large marine ecosystems[J]. *Large Marine Ecosystems*, 2012, 17: 132-199.
- [45] 方建光, 蒋增杰, 房景辉. 中国海水多营养层次综合养殖的理论与实践[M]. 青岛: 中国海洋大学出版社, 2020.  
FANG J G, JIANG Z J, FANG J H, et al. Theory and practice of integrated multi-trophic aquaculture (IMTA) in China[M]. Qingdao: China Ocean University Press, 2020.
- [46] 任黎华. 桑沟湾筏式养殖长牡蛎及其主要滤食性附着生物固碳功能研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2014.  
REN L H. Research on carbon sequestration of cultured oyster *Crassostrea gigas* and its fouling organisms in Sunggou Bay[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2014.
- [47] FAO. Sustainable intensification of aquaculture in the Asia-Pacific region. documentation of successful practices[R]. Bangkok: Regional Office for Asia and the Pacific, 2016.
- [48] 王广策, 王辉, 高山, 等. 绿潮生物学机制研究[J]. *海洋与湖沼*, 2020, 51(4): 789-808.  
WANG G C, WANG H, GAO S, et al. Study on the biological mechanism of green tide[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2020, 51(4): 789-808.
- [49] WANG H, WANG G C, GU W H. Macroalgal blooms caused by marine nutrient changes resulting from human activities[J]. *Journal of Applied Ecology*, 2020, 57(4): 766-776.

## Strategy of macroalgae eco-remediation with cases in nearshore China

HE Peimin<sup>1,2</sup>, DUAN Yuanliang<sup>1</sup>, LIU Qiao<sup>1</sup>, LIU Jinlin<sup>1</sup>, LIU Wei<sup>1</sup>, ZHANG Jianheng<sup>1,2,3</sup>,  
FANG Jianguang<sup>4</sup>, JIANG Zengjie<sup>4</sup>, WU Hailong<sup>5</sup>, LI Xinshu<sup>5</sup>, TANG Kunxian<sup>6</sup>, LI Kejun<sup>1</sup>, LI Juanying<sup>1,3</sup>,  
ZHAO Shuang<sup>1</sup>, CHANG Jia'nan<sup>1</sup>, ZHANG Jianlin<sup>1</sup>, BAO Yanlin<sup>1</sup>, ZHAO Zitao<sup>1</sup>, ZHANG Meijing<sup>1</sup>

(1. College of Marine Ecology and Environment, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;

2. Key Laboratory of Exploration and Utilization of Aquatic Genetic Resources, Shanghai Ocean University, Ministry of Education, Shanghai 201306, China; 3. Technology Innovation Center for Land Spatial Eco-restoration in Metropolitan Area,

MNR, Shanghai 200003, China;

4. Yellow Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Qingdao 266000, China;

5. Jiangsu Ocean University, Lianyungang 222005, China; 6. Third Institute of Oceanography, MNR, Xiamen 361005, China)

**Abstract:** Over-exploitation of marine resources and frequent anthropogenic activities have brought about problems in marine environment. It is becoming increasingly prominent in the coastal areas of China where severe eutrophication occurred in several areas. At present, more attentions have been paid to the seawater eutrophication around the world, ecological restoration was considered as one of the important strategies to prevent eutrophication. Macroalgae as a primary producer in marine ecosystem play a key role in ecological restoration. Macroalgae-remediation can not only help to achieve a beneficial cycle for a healthn ecosystem but also coordinates economic development and environment protection. In this review, based on the nearshore environment problems in China and the corresponding macroalgal restoration strategies, three cases of ecological restoration project in sea areas of different spatial scales, including inshore fully-enclosed sea area, semi-closed bay and open sea area, were summarized. Meanwhile, the ecological functions and effects of macroalgae during the restoration are revealed. This paper can be taken as reference for the marine ecological restoration in China.

**Key words:** marine biology; coast environment; eutrophication; macroalgae-remediation; restoration case

DOI: 10.3969/J.ISSN.2095-4972.2021.04.001