

Doi :10.11840/j.issn.1001-6392.2014.03.016

# 近海双壳类筏式养殖对大型底栖动物群落影响综述

韩庆喜, 刘东艳

(中国科学院海岸带环境过程与生态修复重点实验室(烟台海岸带研究所) 山东省海岸带环境过程重点实验室  
中国科学院烟台海岸带研究所, 山东 烟台 264003)

**摘 要:** 近海的双壳类筏式养殖, 通过对海域水文、物理、化学条件的改变, 从在对海岸带水域的生态系统产生影响。滤食性双壳类能够摄食有机质颗粒和浮游植物, 产生的粪便或假粪能够加剧生物沉降, 造成有机质在海底表面的大量聚集, 造成养殖海域的有机质污染。养殖设施也会引起当地水文状况和海流的改变。双壳类养殖筏架对大型底上动物来说, 可起到人工鱼礁相似的作用, 为众多生物提供了栖息场所和庇护场所, 增加了大型无脊椎动物和底层鱼类可利用的饵料数量, 保护底上动物免受渔业捕捞等强烈扰动的影响, 提高底栖鱼类和大型无脊椎动物的丰度和生产力。而对于底内动物来说, 双壳类养殖对底栖群落的结构和组成的影响与海流的强度呈负相关, 当养殖海域的海流强度达到一定程度, 大量有机质将会被带走, 对底内群落的影响将可以忽略不计, 但在海流能量较小的情况下, 有机质的富集将会造成底栖群落多样性和丰度的降低。正确的养殖选址结合科学的生态容量评估, 以及多营养层次的综合养殖是维持双壳类养殖健康可持续发展的重要保证。

**关键词:** 双壳类养殖; 底上群落; 底内群落

中图分类号: S917

文献标识码: A

文章编号: 1001-6932(2014)03-0352-08

## Review on the effect of coastal bivalve raft mariculture on macrobenthic assemblages

HAN Qing-xi, LIU Dong-yan

(Key Laboratory of Coastal Environmental Processes and Ecological Remediation, Yantai Institute of Coastal Zone Research (YIC), Chinese Academy of Sciences (CAS); Shandong Provincial Key Laboratory of Coastal Environmental Processes, YICCAS, Yantai 264003, China)

**Abstract:** Coastal bivalve mariculture can exert adverse or positive effect to the coastal ecosystem through changing the hydrological, physical and chemical conditions of coastal area. Suspension feeding bivalves can feed the organic particulate and phytoplankton, and enhance the deposition of organic matter on the sea floor through the excretion of feces and pseudofeces. Meanwhile the mariculture structure can also affect the local hydrodynamics and current flow. The mariculture structure can act as artificial reef which provides various habitats and refuges and more available food to the epifauna. The demersal fishes and macroinvertebrates under the mariculture structure will benefit from it and have higher abundance and productivity with the protection from the fishery trawling. The effect of the bivalve mariculture on the structure and composition of the macrobenthic infauna is negatively correlated to the current or tidal flow strength. The negligible effect of the bivalve culture on the endobenthic community will occur with stronger current whilst the organic enrichment will result in the degradation of benthic diversity and abundance with slow current velocity. The suitable farm site selection, the evaluation of ecological carrying capacity and the integrated multi-trophic polyculture would be crucial to the healthy and sustainable development of bivalve mariculture.

**Keywords:** bivalve mariculture; epibenthic community; endobenthic community

收稿日期: 2013-12-31; 修订日期: 2014-02-19

基金项目: 国家自然科学基金(41006076); “中国科学院科技创新交叉与合作团队”项目。

作者简介: 韩庆喜(1982-), 男, 博士, 助理研究员, 主要从事底栖生态学研究。电子邮箱: hanqingxi@gmail.com。

通讯作者: 刘东艳, 博士, 研究员。电子邮箱: dyliu@yic.ac.cn。

<http://hytb.nmdis.gov.cn>

中国作为全球最大的海水养殖国家，早在 2008 年海水养殖即占据 62.3 % 的全球总产量和 51.4 % 的总产值，海水养殖产量在 1970 年至 2008 年间的年均增长率达到了 10.4 % (FAO, 2010)，海水养殖产量占世界海水养殖总产量的 80 % (国家海洋局海洋发展战略研究所课题组, 2013)，其中，2012 年的海水养殖产量为 1 643.81 万吨，总产值为 2 264.54 亿元，超过国民生产总值的 10 % (国家海洋局海洋发展战略研究所课题组, 2013)。贝类养殖作为我国海水养殖业的重要组成部分，2012 年年产量约 1 208 多万吨，超过海水养殖总产量的 73.5 % (农业部渔业司, 2013)。贝类养殖主要有三种形式，即潮间带和潮下带的底播养殖、潮间带插桩养殖和浅海筏式养殖 (杨红生等, 1998)。在海水养殖中，双壳类浅海筏式养殖的产量 (包括扇贝、牡蛎和贻贝) 达 613 万吨，占贝类养殖的 50.7 % (农业部渔业司, 2013)。国内筏式养殖的种类主要包括扇贝，贻贝和牡蛎，贻贝作为我国较早养殖的贝类品种之一，其养殖面积曾一度占据了浅海养殖的主导地位，随着 20 世纪 90 年代以栉孔扇贝为代表的贝类养殖的兴起，才逐渐衰落并由扇贝取代了其优势地位 (任宗伟, 2003)。

双壳类的浅海筏式养殖无需任何额外饵料即能获得较好的生长效果和收益，因而很受欢迎 (杨红生等, 1998；da Costa et al, 2006；Gibbs, 2007；Fabi et al, 2009)。然而，长时间大规模养殖双壳类，不仅有可能引起其遗传品质的下降，也可能对海岸带水域的生态系统健康带来不良影响，因此，越来越多的研究关注到双壳类养殖引起的生态和环境效应 (Borja et al, 2009；Cranford et al, 2009；Fabi et al, 2009)。例如：尽管国外的水产养殖的规模和强度远逊于中国，但欧盟已经启动多个计划，如 ECASA 计划 (Ecosystem Approach for Sustainable Aquaculture) 和 WFD (European Water Framework Directive) 计划 (Devlin et al, 2007)，致力于保护和改善水环境及生态环境的状况，为科学的发展和作用起到了良好的引导作用。

已有的研究结果显示，双壳类筏式养殖会对海洋浮游动植物、海水中悬浮物含量、海底有机质含量、水文、营养盐循环等产生影响。浅海筏式养殖中的双壳类作为滤食动物，能够滤食水体中绝大多数的小有机颗粒物 (Dame, 1993；杨红生等,

1998)、浮游植物 (Lam-Hoai et al, 1997；Lam-Hoai and Rougier, 2001；王俊等, 2001)、典型的浮游动物和鱼类的浮游阶段幼体 (Gibbs, 2004)，甚至更大的底栖和浮游生物 (Davenport et al, 2000；Lehane et al, 2002)。贝类滤食的这些有机碎屑与生物中，相当一部分会通过粪便或假粪的形式排出，并通过生物沉降作用沉淀到海底底质中 (Gilbert et al, 1997；da Costa et al, 2006)，将海洋中的营养物质富集到局部养殖海区，造成有机质在底质表面的大量聚集 (郑向荣等, 2008；Mirto et al, 2000)，从而导致贝类养殖系统的自身污染，并可能改变海洋底部环境状态，进而影响底栖环境质量。

养殖的双壳类也会影响养殖系统中营养盐的循环。一方面，滤食性双壳类可向水体中直接排泄无机营养盐 (如氮等)，另外它排放于海底的粪和假粪，在微生物的作用下经矿化作用和再悬浮作用，又可重新进入水体进行物质循环 (杨卫华等, 2007)，在合适的氧化还原条件下，贻贝养殖区的氨氮释放速率能达到非养殖区的 5~10 倍 (Prins et al, 1994)，磷酸盐的释放速率也明显较高 (Strang, 2003)。另一方面，可通过滤食水体中的营养颗粒物，将其包装成粪便和假粪，可有效降低水体中的氮等营养物质的浓度 (Lindahl et al, 2005；张继红, 2008)。

除养殖贝类以外，养殖设施 (如绳子、浮标、网箱、架子、网袋等) 会直接影响所在海域的水文，降低当地海域的海流状况，加剧有机物的富集和溶氧降低。筏式养殖的筏架和吊绳通过阻挡海流或潮汐而降低流速 36%~63% (Plew et al, 2005)。

大型底栖生物作为海岸带生态系统的重要组成部分，在碎屑的分解、物质循环和能量流动中扮演着重要角色 (沈国英等, 2002)。底栖生物具有相对稳定的生活环境和较差的运动性，因而对海底环境的扰动敏感而深刻，是监测海岸带环境的良好的指示生物 (Elias et al, 1994；Gesteira et al, 2003)，是研究环境压力对生态系统综合影响的最佳选择 (Lim et al, 1994；Nipper, 2000；Shin et al, 2004)，在水环境质量的检测和评价的应用中，取得了一系列具有借鉴意义的成果 (孙刚等, 2013)。

海洋污染的生物评估最先是从小头虫的污染指

示 (Warwick, 1986) 开始的, 后来底栖群落的生态指数 (包括香农指数、丰富度指数、均匀度指数等) 在污染评价中获得广泛应用 (Warwick et al, 1987; 蔡立哲, 2003)。以 Caswell (1978) 的中度干扰模型和 Pearson 等 (1978) 的有机质富集模型为基础, 利用底栖生物的各种类群或特定类群对环境压力的不同响应, 并将生态指数整合进来, 发展了多种生物指数, 使得底栖生物对环境变化评价的准确性达到了新的高度, 从而使得底栖生物在环境评价中获得了更广泛的应用 (Borja et al, 2000; Simboura et al, 2002; Rosenberg et al, 2004; Dauvin et al, 2007; Muxika et al, 2007; Borja et al, 2009; Weise et al, 2009)。

## 1 双壳类筏式养殖对于大型底栖动物的影响

### 1.1 双壳类筏式养殖对大型底上群落的影响

双壳类养殖通过养殖筏架、养殖生物本身、养殖排泄物等对周围生态环境产生影响, 进而对较大的和运动能力较高的底上动物 (如大型无脊椎动物和鱼类) 产生直接或间接影响。

(1) 双壳类养殖筏架可起到人工鱼礁相似的作用, 它的立体结构 (如绳索, 锚, 浮标, 网笼或网袋) 改变了周围的环境, 为海洋生物提供了复杂的三维生境, 为众多生物提供了栖息场所和庇护场所 (Costa-Pierce et al, 2002; McKindsey et al, 2006; Powers et al, 2007), 增加了鱼类和大型无脊椎动物的生产力, 起到了如海草床等自然界复杂生境相似的作用 (Clynick et al, 2008)。天然的复杂生境, 如海草床、红树林等, 由于提供了植被等初级生产者, 使得进入食物网的食物来源增加 (Lubbers et al, 1990); 这些人工鱼礁等复杂生境亦为鱼类和其它无脊椎动物提供庇护场所, 以逃避捕食的危险并最终促进了这些动物生产力的提高 (Carss, 1990; Irlandi et al, 1995; Dempster et al, 2002; Boyra et al, 2004; Brickhill et al, 2005)。但也有研究显示 (Clynick et al, 2008) 桁杆拖网采得的大型底上动物, 在养殖区与非养殖区的并无明显差别, 但这可能是由于很多大型鱼类靠近养殖装置生活, 桁式拖网很难采集得到 (D' Amours et al, 2008), 因为 SCUBA 潜水采样和观察的结果显示贻贝养殖对这些底上生物的影响非常显著, 养殖区

的生物丰度明显要高于养殖区外围 (D' Amours et al, 2008)。

养殖设施的存在, 保护底上动物免受渔业捕捞等强烈扰动的影响。软泥质群落盛产甲壳动物、鲆鲽等底层鱼类, 因而底层拖网是目前中国附近海域软底质群落扰动主要来源, 高强度的渔业拖网严重改变了底栖动物群落结构 (Jennings et al, 2001), 过度捕捞使得扰动敏感种消失, 而杂食性的机会性物种依靠改变食物来源, 如食用丢弃或拖网杀死的有机体而存活 (Bergmann et al, 2002)。渔业养殖本身的养殖设施, 杜绝了渔业拖网等对大型底栖动物的影响, 保护了对拖网敏感的大型底栖动物种类, 对于保护大型底栖动物的物种多样性和物种丰富度都具有一定的积极作用 (韩庆喜等, 2011)。

除养殖筏架外, 养殖过程中产生的死壳也会对某些生物的生存起到庇护作用, 如牡蛎的死壳即能为鲆鱼或鰕虎鱼提供避难区或筑巢区 (Breitburg, 1999)。

(2) 养殖筏架及养殖双壳类增加了大型无脊椎动物和底层鱼类可利用的饵料数量。第一, 双壳类能够提供新的或增加的饵料, 尤其是它们从养殖筏架上脱落至海底, Magdalen Islands 岛的贻贝养殖区, 每天脱落的活贻贝达  $130 \text{ g/m}^2$  (Leonard, 2004), 从而导致养殖区捕食性种类 (石蟹、龙虾及海星) 生物量显著增加 (McKindsey et al, 2006); 第二, 污损生物在掉落双壳类上的生长, 同时增加了饵料的丰度和多样性 (D' Amours et al, 2008), 这些养殖设施被污损生物附着之后, 能为底上捕食者提供更多的猎食机会。筏式贝类养殖设施上能附着大量污损生物, 不仅种类繁多, 而且生物量也很大。在牡蛎养殖筏架上出现了 45 种附着的多毛类和软体动物 (O'Beirn et al, 2004), 贻贝养殖设施仅一个养殖袋上的附着生物干重就达  $20 \text{ g}$  (Leblanc et al, 2003), 污损生物的生物量有时能达到养殖筏架总生物量的 75% 以上 (Stenton-Dozey et al, 1999), 这些大量的附着生物为鱼类和大型无脊椎动物提供了食物和饵料来源, 促进它们在养殖区或养殖设施附近的聚集 (Carbines, 1993; Brooks, 2000; Brehmer et al, 2003)。第三, 生物沉积能够提高沉积食性的多毛类的生物量 (Stehlik and Meise 2000; Mattsson and Lindén,

1983), 同样提供更多的饵料生物, 促进底栖鱼类的生物量和产量。第四, 由养殖贝类产生的大量有机质生物沉降, 也为海参等沉积食性的动物提供了更加充足的营养和食物 (Kang et al, 2003; 袁秀堂等, 2008)。

鱼类和大型无脊椎动物会被养殖设施提供的饵料吸引 (Morrisey et al, 2006), 从而影响周围地区鱼类和无脊椎动物的时空分布和食物组成 (Inglis et al, 2003; D' Amours et al, 2008)。尤其是海盘车 *Asterias sp.* 和黄道蟹 *Cancer irroratus* 丰度的增加 (D' Amours et al, 2008)。群落贻贝养殖区与养殖区外围明显不同, 群落在外围明显较养殖区及附近 (<50 m), 研究结果表明贻贝养殖对于大型无脊椎动物和底栖鱼类 (包括一些重要的生态和经济种) 具有积极的正面影响 (D' Amours et al, 2008)。例如, 作为捕食者的海盘车, 养殖区内的平均密度是非养殖区的 39 倍, 海盘车在养殖区高度密集, 彼此之间的距离约为 2 m, 而非养殖区的海星相当分散, 每个海盘车占据了 180 m<sup>2</sup> 的海底面积 (Inglis et al, 2003)。

### 1.2 双壳类筏式养殖对大型底内群落的影响

双壳类养殖通过改变海洋底部环境状态, 进而影响底栖群落的结构和组成。各种双壳类筏式养殖均能增强养殖海域附近区域有机质的生物沉降速率 (Dahlbäck et al, 1981; Hatcher et al, 1994; Grant et al, 1995)。这些有机质在海底底质中的大量聚集, 会引起底栖群落的演替, 使得底栖种类的丰富度、多样性等发生改变 (Pearson et al, 1978), 底质变动也会改变群落摄食功能群的变化, 并最终导致底栖群落整体的群落组成和结构发生变化, 如不稳定的底质和水体扰动将会对悬浮物摄食者不利, 滤食者将会对底质进行改造, 而管栖的多毛类将会稳定底质, 并为其它生物提供一个庇护所 (Ong and Krishnan, 1995)。密集的双壳类养殖能够在养殖区下方的海底产生大量的有机质积累 (Mirto et al, 2000; Grant et al, 2012), 并造成溶氧的降低 (Kaiser, 2000), 并且经由粪和假粪的生物沉降会对底栖群落产生不良的影响 (Gilbert et al, 1997; da Costa et al, 2006; Fabi et al, 2009)。

按照 Caswell (1978) 的中度干扰模型和 Pearson 等 (1978) 的有机质富集模型, 有机质的富集程度的不同会对底栖群落产生完全不同的影

响, 低水平的有机质富集扰动将会提高有机体的生长速率, 某些竞争能力强的物种将会在底栖群落中占据优势地位, 使得群落的多样性降低; 中等程度的干扰情况下, 没有物种能够占据优势地位, 从而使得群落的多样性较高, 而随着扰动程度的进一步增加, 过量的生物沉降会在缺乏扩散的条件下造成底质环境的缺氧以及硫化物的聚集, 从而强烈改变大型底栖群落结构 (Dubois et al, 2007), 造成多毛类的聚集, 并对养殖区底栖群落组成和营养结构产生深刻影响 (Dubois et al, 2007; Cranford et al, 2009), 使其丰度和物种多样性减少, 群落多样性和丰富度降低, 仅余少量的有机质耐受种 (Smith et al, 2004; da Costa et al, 2006), 从而机会性的食碎屑底内动物将会在海底的底内生物群落中占据优势地位 (Smaal, 1991; Stenton-dozeey et al, 1999; Fabi et al, 2009), 使得养殖区种类将以有机质污染的指示种或初级演替的先锋种为主 (Smaal, 1991; Fabi et al, 2009), 最极端的情形, 海底将变成无生命区 (Grall et al, 1997; Callier et al, 2008), 但此极端情况多发生于投饵强度较大的鱼类的网箱养殖之中, 大量的有机质富集由于饵料的不充分利用, 而引起的网箱底部富集 (高爱根等, 2005; 杨俊毅等, 2007; 黄洪辉等, 2005; 许巧情等, 2009), 而双壳类养殖对则没有类似的报道。

受多种环境因素和养殖技术因素综合和交叉影响, 贝类筏式养殖也可能对底栖环境和生物无负面影响 (da Costa et al, 2006; Fabi, 2009) 或具有相当有限的影响 (Chamberlain et al, 2001; Crawford et al, 2003)。通过这些研究证实, 贝类养殖对底栖环境的影响远较鲑鱼养殖为小, 甚至不必对贝类养殖造成的环境影响进行检测 (Crawford et al, 2003), 对底栖生物的影响也基本可以忽略 (Han et al, 2013); 水产养殖活动仅对养殖区下的大型底栖生物存在影响, 而对养殖区周围一定范围内的底栖生物则只具有有限的影响 (Fabi et al, 2009); 甚至在某些贻贝筏式养殖区中, 大型底栖生物多样性明显高于对照区的多样性, 但在个体丰度水平上, 对照区较之养殖区更高, 得出筏式养殖对底栖环境无负面影响 (da Costa et al, 2006)。上述研究结论的得出, 应该与当地有限的养殖规模和养殖强度、以及较强的海流水文条件密切相关, 因

为站位、水深、养殖产量、海流速度等都会影响有机质的富集,养殖规模和养殖强度直接影响有机质的富集量,在较高的养殖密度之下,海流则与有机污染的运输息息相关 (Borja et al, 2009; Han et al, 2013),与有机质沉降速率呈负相关 (Hartstein et al, 2005),亦即海流的强度与海水养殖带来的影响呈负相关 (Borja et al, 2009; Han et al, 2013)。在较高的海流或潮流 (平均流速为 10 cm/s 以上,最大流速超过 30 cm/s) 海域 (da Costa and Nalesso, 2006; Cranford et al, 2009; Fabi et al, 2009; Han et al, 2013) 海域或开阔海域 (Crawford et al, 2003),水交换能力较大,有机物沉降并未给底质带来明显变化或影响 (Anderson et al, 2003),该区域的有机质含量维持在一个较低的水平,而总有机质 (TOC) 对大型底栖生物产生毒害的阈值为 35 mg/g (Hyland et al, 2005; Han et al, 2013),按照 Pearson 等 (1978) 的有机质富集模型中,在阈值之上物种丰富度和多样性会随着有机质聚集的增加而降低,而在 10 mg/g 的有机质含量浓度之下,底栖群落不表现明显改变 (Hyland et al, 2005; Han et al, 2013)。

尽管双壳类筏式养殖能明显增加有机质的生物沉降,养殖区的生物沉降速率可达到非养殖区域的 1~2.46 倍 (Graf et al, 1997; Zhou et al, 2006; Han et al, 2013),由高密度养殖带来的有机质,应该足以对养殖区域的大型底栖动物产生不良影响。但这类情形仅发生于较低的海流强度之下,在双壳类养殖对大型底栖群落产生明显不良影响的养殖海域,海域的平均流速仅为 3.16~10.21 cm/s (Hartstein et al, 2004) 或 5 cm/s (Callier et al, 2008)。鉴于较高的海流是控制有机质生物沉降的关键因素,在较高海流或潮汐流的海域进行双壳类养殖活动,在双壳类养殖的选址上,能将双壳类养殖带给大型底栖群落的影响降至最低 (Han et al, 2013)。

## 2 未来展望

对于双壳类养殖来说,它带给生态系统的影响不仅仅包含大型底栖生物,也包括中小型底栖生物,浮游动物,浮游植物,以及对环境条件包括水文、光照、透明度、营养盐、颗粒搬运等各个因素

的影响,对这些方面的综合研究,可以为正确评估、评价贝类养殖活动对生态环境的影响或压力提供科学依据,正确的养殖选址结合科学的生态容量评估,是保证双壳类浅海筏式养殖健康可持续发展的重要先决条件。除此之外,多营养层次的综合养殖 (张继红等, 2009) 也是未来集约化养殖的一个发展趋势。不同食性养殖对象的混养 (例如投饵类的鱼类和虾类、滤食性的贝类、植食性的海蜇类、沉积食性的海参以及大型藻类等),减轻养殖带来的生态压力,提高生态和经济效益,保证海水养殖的可持续发展 (董贯仓等, 2007; 袁秀堂等, 2008)。在混养模式下,饵料甚至养殖生物排泄物都能得到充分利用,可将营养损耗及潜在的经济损耗降低到最低,从而使系统具有较高的容纳量和经济产出,从而有效降低养殖活动对海域环境及底栖生物的压力 (张继红等, 2009)。

## 参 考 文 献

- Anderson M R, Stirling C, Roy A, et al, 2003. Assessing potential for habitat modification under longline mussel farms using multibeam acoustic surveys. In Report of the National Science Workshop, Edited by Stirling C H, 2003. Fisheries and Oceans Canada, St. John's, Newfoundland, Canadian Technical Report of Fisheries and Aquatic Sciences, 2530: 1-58.
- Bergmann M, Wiczorek S K, Moore P G, et al, 2002. Discard composition of the Nephrops fishery in the Clyde Sea area, Scotland. Fisheries Research, 57: 169-183.
- Borja á, Franco J, Pérez V, 2000. A Marine Biotic Index to Establish the Ecological Quality of Soft-Bottom Benthos within European Estuarine and Coastal Environments. Marine Pollution Bulletin, 40 (12): 1100-1114.
- Borja á, Rodríguez J G, Black K, et al, 2009. Assessing the suitability of a range of benthic indices in the evaluation of environmental impact of fin and shellfish aquaculture located in sites across Europe. Aquaculture, 293(3-4): 231-240.
- Boyra A, Sanchez-Jerez P, Tuya F, et al, 2004. Attraction of wild coastal fishes to an Atlantic subtropical cage fish farms, Gran Canaria, Canary Islands. Environmental Biology of Fishes, 70: 393-401.
- Brehmer P, Gerlotto F, Guillard J, et al, 2003. New applications of hydroacoustic methods for monitoring shallow water aquatic ecosystems: the case of mussel culture grounds. Aquatic Living Resources, 16: 333-338.
- Brickhill M J, Lee S Y, Connolly R M, 2005. Fishes associated with artificial reefs: attributing changes to attraction or production using novel approaches. Journal of Fish Biology, 67: 53-71.
- Brooks K M, 2000. Literature review and model evaluation describing the

- environmental effects and carrying capacity associated with the intensive culture of mussels (*Mytilus edulis galloprovincialis*). Taylor Resources. Environmental impact statement, technical appendix, 1–128.
- Callier M D, McKindsey C W, Desrosiers G, 2008. Evaluation of indicators used to detect mussel farm influence on the benthos: Two case studies in the Magdalen Islands, Eastern Canada. *Aquaculture*, 278: 77–88.
- Carbines G D, 1993. The ecology and early life history of *Notolabrus celidotus* (Pisces: Labridae) around mussel farms in the Marlborough Sounds. Thesis (MSc), University of Canterbury, Canterbury, 1–134.
- Carss D N, 1990. Concentrations of wild and escaped fishes immediately adjacent to fish farm cages. *Aquaculture*, 90: 29–40.
- Caswell H, 1978. A general formula for the sensitivity of population growth rate to changes in life history parameters. *Theoretical Population Biology*, 14: 215–230.
- Chamberlain J, Fernandes T F, Read P, et al, 2001. Impacts of biodeposits from suspended mussel (*Mytilus edulis* L.) culture on the surrounding surficial sediments. *ICES Journal of Marine Science*, 58: 411–416.
- Clynick B G, McKindsey C W, Archambault P, 2008. Distribution and productivity of fish and macroinvertebrates in mussel aquaculture sites in the Magdalen islands (Québec, Canada). *Aquaculture*, 283: 203–210.
- Costa-Pierce B A, Bridger C J, 2002. The role of marine aquaculture facilities as habitats and ecosystems. In: Stickney RR, McVey JP (eds) *Responsible marine aquaculture*. CABI Publishing, Wallingford, 105–144.
- Cranford P J, Hargrave B T, Doucette L I, 2009. Benthic organic enrichment from suspended mussel (*Mytilus edulis*) culture in Prince Edward Island, Canada. *Aquaculture*, 292(3–4): 189–196.
- Crawford C M, Macleod C K A, Mitchell I M, 2003. Effects of shellfish farming on the benthic environment. *Aquaculture*, 224: 117–140.
- D'Amours O, Archambault P, McKindsey C W, et al, 2008. Local enhancement of epibenthic macrofauna by aquaculture activities. *Marine Ecology Progress Series*, 371: 73–84.
- da Costa K G, Nalesso R C, 2006. Effects of mussel farming on macrobenthic community structure in Southeastern Brazil. *Aquaculture*, 258(1–4): 655–663.
- Dahlbäck B, Gunnarsson L A H, 1981. Sedimentation and sulfate reduction under a mussel culture. *Marine Biology*, 63: 269–275.
- Dame R F, 1993. The role of bivalve filter feeder material fluxes in estuarine ecosystems. In: Dame, R.F.(ed.) *Bivalve filter feeders in estuarine and coastal ecosystem processes*, NATO, A. S. I. Series, Vol. G33. Springer-Verlag, Berlin, p. 245–269.
- Dauvin J C, Ruellet T, 2007. Polychaete/Amphipod ratio revisited. *Marine Pollution Bulletin*, 55(1–6): 215–224.
- Davenport J, Smith R J J W, Packer M, 2000. Mussels *Mytilus edulis*: significant consumers and destroyers of mesozooplankton. *Marine Ecology Progress Series*, 198: 131–137.
- Dempster T, Sanchez-Jerez P, Bayle-Sempere J T, et al, 2002. Attraction of wild fish to sea-cage fish farms in the south-western Mediterranean Sea: spatial and short-term temporal variability. *Marine Ecology Progress Series*, 242: 237–252.
- Devlin M, Best M, Haynes D, 2007. Implementation of the Water Framework Directive in European marine waters. *Marine Pollution Bulletin*, 55(1–6): 1–2.
- Dubois S, Marin-Léal, J C, Ropert M, et al, 2007. Effects of oyster farming on macrofaunal assemblages associated with *Lanice conchilega* tubeworm populations: A trophic analysis using natural stable isotopes. *Aquaculture*, 271(1–4): 336–349.
- Elias R, Bremec C S, 1994. Biomonitoring of water quality using benthic communities in Blanca Bay (Argentina). *Science of Total Environment*, 158: 45–49.
- Fabi G, Manoukian S, Spagnolo A, 2009. Impact of an open-sea suspended mussel culture on macrobenthic community (Western Adriatic Sea). *Aquaculture*, 289(1–2): 54–63.
- FAO, 2010. *The state of world fisheries and aquaculture*. Rome, 1–197.
- Gaudêncio M J, Cabral H N, 2007. Trophic structure of macrobenthos in the Tagus estuary and adjacent coastal shelf. *Hydrobiologia*, 587: 241–251.
- Gesteira J L G, Dauvin J C, Fraga, M S, 2003. Taxonomic level for assessing oil spill effects on soft-bottom sublittoral benthic communities. *Marine Pollution Bulletin*, 46: 562–572.
- Gibbs M T, 2004. Interactions between bivalve shellfish farms and fishery resources. *Aquaculture*, 240: 267–296.
- Gibbs T M, 2007. Sustainability performance indicators for suspended bivalve aquaculture activities. *Ecological Indicators*, 7: 94–107.
- Gilbert F, Souchu P, Bianchi M, et al, 1997. Influence of shellfish farming activities on nitrification, nitrate reduction to ammonium and denitrification at the water sediment interface of the Thau lagoon, France. *Marine Ecology Progress Series*, 151: 143–153.
- Graf G, Rosenberg, R. 1997. Bioresuspension and biodeposition: a review. *Journal of Marine Systems*, 11: 269–278.
- Grall J, Glémarec M, 1997. Using biotic indices to estimate macrobenthic community perturbations in the Bay of Brest. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 44(Supplement 1): 43–53.
- Grant C, Archambault P, Olivier F, et al, 2012. Influence of 'bouchot' mussel culture on the benthic environment in a dynamic intertidal system. *Aquaculture Environment Interactions*, 2: 117–131.
- Grant J A, Hatcher D B, Scott P, et al, 1995. A multidisciplinary approach to evaluating impacts of shellfish aquaculture on benthic communities. *Estuaries*, 18: 124–144.
- Han Q X, Wang Y Q, Zhang Y, et al, 2013. Effects of intensive scallop mariculture on macrobenthic assemblages in Sishili Bay, the northern Yellow Sea of China. *Hydrobiologia*, 718(1): 1–15.
- Hartstein N D, Rowden A A, 2004. Effect of biodeposits from mussel culture on macroinvertebrate assemblages at site of different hydrodynamic regime. *Marine Environmental Research*, 57: 339–357.
- Hartstein N D, Stevens C L, 2005. Deposition beneath long-line mussel farms. *Aquacultural Engineering*, 33: 192–213.

- Hatcher A, Grant J, Schofield B, 1994. Effects of suspended mussel culture (*Mytilus* spp.) on sedimentation, benthic respiration and sediment nutrient dynamics in a coastal bay. *Marine Ecology Progress Series*, 115: 219–235.
- Hyland J, Balthis L, Karakassis I, et al, 2005. Organic carbon contents of sediments as an indicator of stress in the marine benthos. *Marine Ecology Progress Series*, 295: 91–103.
- Inglis G J, Gust N, 2003. Potential indirect effects of shellfish culture on the reproductive success of the benthic predators. *Journal of Applied Ecology*, 40: 1077–1089.
- Irlandi E A, Ambrose Jr W G, Orlando, B A, 1995. Landscape ecology and the marine environment: how spatial configuration of seagrasses influences growth and survival of the bay scallop. *Oikos*, 72: 307–313.
- Jennings S, Pinnegar J K, Polunin N V C, et al, 2001. Impacts of trawling disturbance on the trophic structure of benthic invertebrate communities. *Marine Ecology Progress Series*, 213: 127–142.
- Kaiser M J, 2000. Ecological effects of shellfish cultivation. In: Black, K. D. (Ed.), *Environmental impacts of aquaculture*. Sheffield Academic Press, Sheffield, UK, 51–75.
- Kang K H, Kwon J Y, Kim Y M, 2003. A beneficial coculture: *Charmablon* *Haliotis discus hannai* and sea cucumber *Stichopus japonicus*. *Aquaculture*, 216: 87–93.
- Lam-Hoai T, Rougier C, 2001. Zooplankton assemblages and biomass during a 4-period survey in a northern Mediterranean coastal lagoon. *Water Research*, 35: 271–283.
- Lam-Hoai T, Rougier C, Lasserre G, 1997. Tintinnids and rotifers in a northern Mediterranean coastal lagoon. Structural diversity and function through biomass estimations. *Marine Ecology Progress Series*, 152: 13–25.
- LeBlanc A R, Landry T, Miron G, 2003. Identification of fouling organisms covering mussel lines and impact of a common defouling method on the abundance of foulers in Tracadie Bay, Prince Edward Island. *Canadian Technical Report of Fisheries and Aquatic Sciences* 2477: vii + 18 p.
- Lehane C, Davenport J, 2002. Ingestion of mesozooplankton by three species of bivalve; *Mytilus edulis*, *Cerastoderma edule* and *Aequipecten opercularis*. *Journal of the Marine Biological Association of the UK*, 82: 615–619.
- Leonard, M. 2004. Evaluation et caractérisation de la chute de moules dans la lagune de Havre-aux-Maisons aux Iles-de-la-Madeleine, Québec. Thesis (BSc), ENITA Clermont-Ferrand, 1–63.
- Lim H S, Hong J S, 1994. An environmental impact assessment based on benthic macrofauna in Chinhae Bay, Korea. *Bulletin of Korean Fisheries Society*, 27: 659–674.
- Lindahl O, Hart R, Hernroth B, et al, 2005. Improving marine water quality by mussel farming: a profitable solution for Swedish society. *Ambio*, 34: 131–138.
- Lubbers L, Boynton W R, Kemp W M, 1990. Variations in structure of estuarine fish communities in relation to abundance of submersed vascular plants. *Marine Ecology Progress Series*, 65: 1–14.
- Mattsson J, Lindén O, 1983. Benthic macrofauna succession under mussels, *Mytilus edulis* L. (*Bivalvia*), cultured on hanging long-lines. *Sarsia*, 68: 97–102.
- McKindsey C W, Anderson M R, Barnes P, et al, 2006. Effects of shellfish aquaculture on fish habitat. Fisheries and Oceans Canada Science Advisory Secretariat Research Document 2006/011. [www.dfo-mpo.gc.ca/csas/Csas/DocREC/2006/RES2006\\_011\\_e.pdf](http://www.dfo-mpo.gc.ca/csas/Csas/DocREC/2006/RES2006_011_e.pdf).
- Mirto S, Rosa T L, Danovaro R, et al, 2000. Microbial and Meiofaunal Response to Intensive Mussel-Farm Biodeposition in Coastal Sediments of the Western Mediterranean. *Marine Pollution Bulletin*, 40 (3): 244–252.
- Morrisey D J, Cole R G, Davey N K, et al, 2006. Abundance and diversity of fish on mussel farms in New Zealand. *Aquaculture*, 252: 277–288.
- Muxika I, Borja ú, Bald J, 2007. Using historical data, expert judgement and multivariate analysis in assessing reference conditions and benthic ecological status, according to the European Water Framework Directive. *Marine Pollution Bulletin*, 55(1–6): 16–29.
- Nipper M, 2000. Current approaches and future directions for contaminant-related impact assessments in coastal environments: Brazilian perspective. *Aquatic Ecosystem Health and Management*, 3: 433–447.
- O’Beirn F X, Ross P G, Luckenbach M W, 2004. Organisms associated with oysters cultured in floating systems in Virginia, USA. *Journal of Shellfish Research*, 23: 825–829.
- Ong B, Krishnan S, 1995. Changes in the macrobenthos community of a sand flat after erosion. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 40(1): 21–33.
- Pearson T H, Rosenberg R, 1978. Macrobenthic succession in relation to organic enrichment and pollution of the marine environment. *Oceanographic Marine Biology Annual Review*, 16: 229–311.
- Plew D R, Stevens C L, Spigel R H, et al, 2005. Hydrodynamic implications of large offshore mussel farms. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 30: 95–108.
- Powers M J, Peterson C H, Summerson H C, et al, 2007. Macroalgal growth on bivalve aquaculture netting enhances nursery habitat for mobile invertebrates and juvenile fishes. *Marine Ecology Progress Series*, 339: 109–122.
- Prins T C, Smaal A C, 1994. The role of the blue mussel *Mytilus edulis* in the cycling of nutrients in the Oosterschelde Estuary (The Netherlands). *Hydrobiologia*, 282/283: 413–429.
- Rosenberg R, Blomqvist M, Nilsson H C, et al, 2004. Marine quality assessment by use of benthic species-abundance distributions: a proposed new protocol within the European Water Framework Directive. *Marine Pollution Bulletin*, 49: 728–739.
- Shin P K S, Huang Z G, Wu R S S, 2004. An updated baseline of subtropical macrobenthic communities in Hong Kong. *Marine Pollution Bulletin*, 49(1–2): 128–135.
- Simboura N, Zenetos A, 2002. Benthic indicators to use in ecological quality classification of Mediterranean soft bottom marine ecosystems.

- tems, including a new biotic index. *Mediterranean Marine Science*, 3(2): 77–111.
- Smaal A C, 1991. The ecology and cultivation of mussels: new advances. *Aquaculture*, 94: 245–261.
- Smith J, Shackley S E, 2004. Effects of a commercial mussel *Mytilus edulis* lay on a sublittoral, soft sediment benthic community. *Marine Ecology Progress Series*, 282: 185–191.
- Stehlik L L, Meise C J, 2000. Diet of winter flounder in a New Jersey estuary: ontogenetic change and spatial variation. *Estuaries*, 23: 381–391.
- Stenton-dozey J M E, Jackson L F, Busby A J, 1999. Impact of Mussel Culture on Macrobenthic Community Structure in Saldanha Bay, South Africa. *Marine Pollution Bulletin*, 39(1–12): 357–366.
- Strang T J, 2003. Nutrient regeneration under mussel farms: the environmental effects of mussel aquaculture in coastal bays. Thesis (MSc), memorial University of Newfoundland, St. John's, 1–98.
- Warwick R M, 1986. A new method for detecting pollution effects on marine macrobenthic communities. *Marine Biology*, 92: 557–562.
- Warwick R M, Pearson T H, Ruswahyuni, 1987. Detection of pollution effects on marine macrobenthos: further evaluation of the species abundance/biomass method. *Marine Biology*, 95(2): 193–200.
- Weise A M, Cromey C J, Callier M D, et al, 2009. Shellfish-DEPOMOD: Modelling the biodeposition from suspended shellfish aquaculture and assessing benthic effects. *Aquaculture*, 288(3–4): 239–253.
- Zhou Y, Yang H S, Zhang T, et al, 2006. Influence of filtering and biodeposition by the cultured scallop *Chlamys farreri* on benthic-pelagic coupling in a eutrophic bay in China. *Marine Ecology Progress Series*, 317: 127–141.
- 蔡立哲, 2003. 大型底栖动物污染指数(MPI). *环境科学学报*, 23(5): 625–629.
- 董贯仓, 田相利, 董双林, 等, 2007. 几种虾、贝、藻混养模式能量收支及转化效率的研究. *中国海洋大学学报*, 37(6): 899–906.
- 高爱根, 陈全震, 胡锡钢, 等, 2005. 象山港网箱养鱼区大型底栖生物生态特征. *海洋学报*, 27(04): 108–113.
- 国家海洋局海洋发展战略研究所课题组, 2013. 中国海洋发展报告(2013). 北京: 海洋出版社, 1–403.
- 韩庆喜, 李宝泉, 韩秋影, 等, 2011. 渔业捕捞对威海港附近海域底上大型底栖群落结构影响的初步研究. *海洋通报*, 30(2): 121–126.
- 黄洪辉, 林钦, 林燕棠, 等, 2005. 大亚湾网箱养殖海域大型底栖动物的时空变化. *中国环境科学*, 25(4): 412–416.
- 农业部渔业司, 2013. 2013 中国渔业统计年鉴. 北京: 中国农业出版社, 1–145.
- 任宗伟, 2003. 贻贝浅海筏式养殖方法. *齐鲁渔业*, 20(3): 3.
- 沈国英, 施并章, 2002. 海洋生态学. 2, editor. 北京: 科学出版社, 1–446.
- 孙刚, 房岩, 2013. 底栖动物的生物扰动效应. 北京: 科学出版社, 1–222.
- 王俊, 姜祖辉, 董双林, 2001. 滤食性贝类对浮游植物群落增殖作用的研究. *应用生态学报*, 12(5): 765–768.
- 许巧情, 过龙根, 刘绍平, 2009. 网箱养殖对底栖动物丰度和生物量的影响. *长江大学学报*, 6(3): 35–38.
- 杨红生, 周毅, 1998. 滤食性贝类养殖对海区环境影响的研究进展. *海洋科学*, 22(2): 42–44.
- 杨俊毅, 高爱根, 宁修仁, 等, 2007. 乐清湾大型底栖生物群落特征及其对水产养殖的响应. *生态学报*, 27(1): 34–41.
- 杨卫华, 高会旺, 刘红英, 等, 2007. 胶州湾扇贝养殖对海域环境影响的初步研究. *海洋湖沼通报*, 2: 86–93.
- 袁秀堂, 杨红生, 周毅, 等, 2008. 刺参对浅海筏式贝类养殖系统的修复潜力. *应用生态学报*, 19(4): 866–872.
- 张继红, 2008. 滤食性贝类养殖活动对海域生态系统的影响及生态容量评估. 中国科学院研究生院(海洋研究所), 博士学位论文, 1–171.
- 张继红, 方建光, 王巍, 2009. 浅海养殖滤食性贝类生态容量的研究进展. *中国水产科学*, 16(4): 626–632.
- 郑向荣, 孙桂清, 杨金晓, 等, 2008. 昌黎县扇贝养殖区营养盐调查及水质评价. *河北渔业*, (2): 43–45.

(本文编辑:袁泽轶)