

# 海水网箱养殖对环境的影响\*

徐永健<sup>1\*\*</sup> 钱鲁闽<sup>1,2</sup>

(<sup>1</sup> 厦门大学环境科学中心, 海洋环境科学教育部重点实验室, 厦门 361005; <sup>2</sup> 国家海洋局第三海洋研究所, 厦门 361005)

**【摘要】** 综述了近 20 年来国内外关于网箱养殖对环境影响的研究动态和成果, 包括网箱养殖碳、氮、磷和悬浮物输出造成水体的污染及对沉积物的影响、养殖过程中使用化学药品的污染、养殖鱼类逃逸对渔场生态环境的影响以及外来种、定向育种生物甚至转基因生物养殖所造成的基因污染, 以及导致了养殖海区各类生物多样性的改变等. 并对海水网箱养殖的可持续发展提出了一些看法和建议.

**关键词** 海水网箱养殖 富营养化 海洋环境污染

**文章编号** 1001-9332(2004)03-0532-05 **中图分类号** X145 **文献标识码** A

**Impacts of cage culture on marine environment.** XU Yongjian<sup>1</sup>, QIAN Lumin<sup>1,2</sup> (<sup>1</sup> Environmental Science Research Center, Marine Environment Laboratory of the Ministry of Education, Xiamen University, Xiamen 361005, China; <sup>2</sup> Third Institute of Oceanography, SOA, Xiamen 361005, China). -Chin. J. Appl. Ecol., 2004, 15(3): 532 ~ 536.

The increasing production of sea food mainly depends on the developing mariculture. Cage culture is intensive culture and affects enormously their ambient waters. During the past 20 years, cage culture expended very rapidly, and the marine environment of cage area was worsen. This article reviews the impacts of cage culture on the aquatic environment, using studies published in the last 20 years. The impacts are numerous, including water pollution, impact on the sediment, genetic pollution, chemical pollution, and their resulting impacts on biodiversity in coastal sea. We present that we should give priority to study on the aquaculture and environment capacity in cage areas, and through utilizing the integrated culture restore the deteriorated culture environment.

**Key words** Marine Cage Aquaculture, Eutrophication, Marine environmental pollution.

## 1 引言

目前, 全球范围内海洋捕捞产量急剧下降, 海产品的增长在更大程度上依靠迅速发展的海水养殖业. 在 1986 ~ 1996 年间, 全球的养殖产量增加了一倍多, 人类消费的水产品 1/4 以上是养殖生产的<sup>[44]</sup>. 据 FAO 统计, 1997 年世界鲑鱼养殖产量为 644 000 t, 价值超过 20 亿美元<sup>[14]</sup>, 主要由海水网箱养殖生产. 中国海水网箱养殖始于 20 世纪 80 年代初. 近几年, 由于育苗技术的突破, 海水网箱养殖发展迅速. 据中国渔业统计年鉴<sup>[15]</sup>, 1999 年全国海水鱼类养殖产量为 33.88 × 10<sup>4</sup> t, 是 1989 年的近 10 倍; 其中海水养殖网箱数量由 1994 年的 16 万只, 增至 2000 年的 70 多万只, 养殖种类近 40 种, 年产量超过 14 × 10<sup>4</sup> t.

网箱养殖在对人类提供蛋白质的同时, 也破坏了沿岸和海洋资源和环境<sup>[43]</sup>. 本文综述了近 20 年来国内外关于海水网箱养鱼对环境影响的研究概况, 包括网箱养鱼对养殖海区水体的污染、对沉积物的影响、逃逸鱼的影响及可能造成的基因污染、养殖过程中使用化学药品污染以及养殖活动导致海区生物多样性改变等, 并对今后的研究和生产提出建议.

## 2 网箱养殖对养殖区水体的污染

### 2.1 碳

一般情况下, C 不是水生生物生长的限制性因素. Hall 等<sup>[22]</sup>经过 6 年全面研究后发现, 每生产 1 t 鱼就有 878 ~ 952

kg 的 C 进入水柱中, 约合 C 总输入量的 75% ~ 78%; 也有报道为 750 kg, 或 561 kg<sup>[46]</sup>不等. 上述的研究者都认为大部分的 C 以溶解态形式进入水体; 但也有人认为仅 40% 以溶解态形式, 而 44% 以颗粒态形式 (如残饵和粪便等) 进入水体<sup>[21]</sup>. 水柱中 C 的另一个来源是鱼类的呼吸, 可导致网箱周围水体中 CO<sub>2</sub> 含量升高<sup>[57]</sup>. 水体中 C 的负荷大小与水体的 C 输入、输出过程有关, 如沉积、再悬浮、生物扰动、细菌降解及摄食等.

水柱中 C 增加的影响有正负两方面. 初期将会促进底栖生物群落的发展; 但长期的高 C 负荷会引起高的细菌丰度, 即养殖区水柱中的大量有机物质的存在会造成生物分解的加剧, 导致水体中溶解氧下降<sup>[50]</sup>. 不管养殖时间长短, 养殖区水体中的溶氧及化学耗氧量都会受到一定程度的影响<sup>[26]</sup>. 当水体中的溶氧达到临界浓度 (< 4 mg L<sup>-1</sup>) 以下时, 就会抑制生物的生长. 可以认为, 水体中有机物浓度的升高导致异养生物耗氧量增加的问题是养殖生产中必需要考虑的问题.

### 2.2 氮

N 是生物所必需的元素, 也是海洋生态系或富营养生态系的限制性元素之一. 国外许多的研究涉及到网箱鱼类 N 排放量问题, 如 Folke<sup>[16]</sup>报道每生产 1 t 鲑鱼产生 52 kgN · yr<sup>-1</sup>, 或 78 kgN · yr<sup>-1</sup><sup>[17]</sup>; 有的估计稍高为 104 kgN · yr<sup>-1</sup><sup>[46]</sup>; Hall 等<sup>[23]</sup>调查指出, 每生产 1 t 鲑鱼, 溶失到环境中的 N 有 92 ~

\* 福建省科技攻关重大资助项目 (2002 Y005).

\*\* 通讯联系人.

2003-01-24 收稿, 2003-04-28 接受.

102 kg, 占总输入 N 量的 72% ~ 79%, 而以溶解性无机氮为主, 占总输入 N 的 58% ~ 78%; 养殖鱼类也分泌大量 N, 据统计, 生产 1 t 鱼可直接向养殖水体中分泌 40 kg 溶解态氮<sup>[23]</sup>。对于不同的饲料质量, 鱼类所分泌的氮量不同, 对环境造成的影响也不相同。近年来, 由于饲料加工技术的改进和养殖技术的提高, 输入 N 的利用率有所提高。该研究在国内较少。

由于大量的溶解态氮输入, 造成养殖渔场水柱中的 N 含量很高, 如我国广东大鹏湾南澳网箱养殖区水体中  $\text{NO}_3^-$ -N 含量最高时达  $10.29 \mu\text{mol L}^{-1}$ ,  $\text{NH}_4^+$ -N 达  $4.92 \mu\text{mol L}^{-1}$ <sup>[58]</sup>; 水柱中有丰富的  $\text{NO}_3^-$ -N 和  $\text{NH}_4^+$ -N, 促进浮游植物生长旺盛<sup>[23]</sup>。它又是造成赤潮危害的物质基础之一。Wu<sup>[57]</sup>认为, 除非导致了藻华(赤潮)的发生, 否则水柱中高的  $\text{NO}_3^-$ -N 和  $\text{NO}_2^-$ -N 不会对养殖生物构成很大威胁; 只有鱼类分泌的以 UA 形式的  $\text{NH}_4^+$ -N 大量存在, 才会对水生生物和鱼类产生很强的毒性<sup>[31]</sup>。

### 2.3 磷

在水生生态系统中, P 以颗粒态及溶解态两种形式存在。生物一般只利用溶解态的磷酸盐, 但在水体中的浓度很低。网箱养殖中, P 的来源主要是饲料及粪便, 高密度的鱼类养殖常造成环境中 P 浓度的净增加。

在瑞典 Gullmar 湾, 每 1 000  $\text{m}^2$  网箱的平均鱼产量在 1.7 ~ 2.3 t, 投入的总 P 中有 78% ~ 81% 进入到环境中, 其中颗粒态形式的大部分 P 最终沉积到水底<sup>[30]</sup>; 也有报道认为大约有 77% ~ 88% 的输入 P 进入到环境中<sup>[38, 46]</sup>; 其中仅有 27% ~ 32% 的输入 P 以溶解态存在于水体中<sup>[55]</sup>。统计认为, 每产出 1 t 鱼, 每年环境中的 P 负荷就增加 19.6 ~ 22.4 kg<sup>[30]</sup>, 但随养殖鱼种类的不同而有所不同, 如每养殖 1 t 的虹鳟鱼, 每年有 40 ~ 45 kg 的 P 进入到环境中, 而每生产 1 t 鲑鱼环境的 P 仅增加 9.0 ~ 9.5 kg<sup>[16, 17]</sup>。输入的大部分 P 最终都进入到沉积物中, 意味着沉积物是水生生态系统中的磷汇。P 在沉积物中可以被底栖生物利用或重新悬浮进入水柱中而再被生物利用, 但所占比例很少<sup>[56]</sup>, 剩下大部分的 P 积累于海底。

Folke 等<sup>[16]</sup>估计, 每年输出 50 t P 的养殖场相当于一个能处理 7 000 人的污水处理厂的年排 P 量。1986 年瑞典的网箱养殖排放的 N、P 分别为 260 t 和 35 t, 占当年该国向海域排放 N、P 总量(包括大气沉降)的 0.2% 和 0.6%<sup>[36]</sup>; 1987 年芬兰的养殖排放 952 t N 和 14 t P, 占其同期向海域排放 N、P 量的 2% 和 4%<sup>[33]</sup>; 挪威海水养殖排放的 N、P 占该国 N、P 排放总量的 8% 和 14%<sup>[21]</sup>; 与其它人类活动对海洋的污染相比, 目前网箱养殖的排污量并不算大, 但在局部区域中(如挪威的一些海区), 网箱养殖营养物排放量占总排放量的 40%<sup>[21]</sup>。这些 N、P 对沿岸生态环境产生了明显的影响, 如造成环境水体富营养化、改变水柱氮磷比等, 常导致养殖区发生赤潮。

### 2.4 悬浮颗粒

网箱养殖的残饵和鱼类的粪便将增加水柱中悬浮物的量。据估计, 每生产 1 t 虹鳟鱼约有 150 ~ 300 kg 的残饵(约合投饵量的 1/3)及产生的 250 ~ 300 kg 粪便<sup>[46]</sup>; Soble<sup>[51]</sup>估计, 每生产 1 t 鱼将产生 1.36 t 的颗粒物。悬浮颗粒物一般都沉积

在离网箱不远处(一般为 100 m 左右), 使受影响的水质和沉积物具有区域性<sup>[5, 56]</sup>。水柱悬浮颗粒的增加, 导致水体透明度的下降, 影响鱼类的视觉反映, 而鱼类的弱视觉反过来又可能导致残饵量增加并产生更多的悬浮物质; 另一影响是悬浮物可能会阻塞养殖鱼类的呼吸系统。

网箱养殖过程中产生的 C、N、P 及悬浮颗粒的污染, 对水域生态系直接的影响就是导致水体中溶解氧(DO)的下降, 使网箱养殖海湾内水体中的 DO 含量明显低于湾外自然水体<sup>[25]</sup>; 另外网箱养殖鱼类将直接消耗水体中 60% ~ 74% 的氧气<sup>[3]</sup>; 仅鱼类耗氧就可能使水柱  $10 \text{ mg L}^{-1}$  DO 下降到  $2.5 \text{ mg L}^{-1}$ 。调查还发现, 在离网箱 3 m 处 DO 的饱和度仅有 35% ~ 70%, 到 15 m 处升为 50% ~ 85%<sup>[6]</sup>。在低 DO 情况下, 一些耐污生物将发展成优势种群, 并产生一个还原性的生物群落结构, 水柱中的营养盐化学价态的转化也会被中断。在低 DO 的水域, 渔获量会大大降低, 如美国长岛湾 DO 含量 3 ~ 4  $\text{mg L}^{-1}$  的水域, 捕获量减少了 20% 以上<sup>[32]</sup>。

## 3 网箱养殖对沉积物的影响

### 3.1 溶解氧

残饵、粪便等有机物质在沉积物中的堆积促使底栖生物和分解有机物质的微生物群落的迅速增长, 导致沉积层中的耗氧大大增加<sup>[3]</sup>, 网箱下部沉积物中其耗氧率比对照区要高 2 ~ 5 倍<sup>[57]</sup>。很多研究发现, 养鱼网箱附近富含 C、N、P 的沉积物中存在着缺氧、无氧状态区<sup>[5]</sup>。

### 3.2 硫化物

微生物的活动加强, 造成沉积物层的缺氧, 而沉积层的无氧或缺氧又促进了微生物的脱氮和硫还原反应<sup>[34]</sup>, 沉积物中硫酸盐还原菌作用使沉积物发黑、发臭鸡蛋味, 并具有毒性<sup>[6, 31]</sup>。有些养殖区沉积物中硫化物含量比自然海区中的含量要高 10 倍多<sup>[25]</sup>; 粤东柘林湾网箱养殖区表层沉积物的硫化物含量也比对照区高 6.7 倍, 其含量分别为我国海岸带底质背景参考标准和日本渔业底质标准的 1.6 倍和 2.4 倍<sup>[19]</sup>; 表层沉积物中硫化物含量高是渔场老化的主要表现<sup>[18]</sup>。

### 3.3 磷酸盐

在网箱养殖区沉积物中的 P 随着沉积物的积累而浓度逐渐升高, 这可作为网箱养殖中沉积物积累的最好的指标<sup>[30]</sup>。据调查, 珠江口牛头岛深湾网箱养殖区的上覆水与底质中磷酸盐含量相差很大, 水柱中平均为  $0.94 \mu\text{mol L}^{-1}$ , 而沉积物溶液中平均达  $126.52 \mu\text{mol L}^{-1}$ , 两者相差两个数量级<sup>[55]</sup>。瑞典的网箱养殖海区的调查也发现, 每 1 000  $\text{m}^2$  的网箱下面沉积物中平均净积累 1 300 kg P, 相当于总输入 P 的 51% ~ 57%, 不包括由于生物的扰动而重新回到水柱的 2.5% ~ 4.0% 部分<sup>[30]</sup>; 但有人认为, 由于养殖活动造成水体富营养化而导致沉积物无氧状况, 微生物的活动可加速无机盐从底质向上覆水的释放, 加快了水体营养盐的循环速度<sup>[34]</sup>, 颗粒 P 重新悬浮的比例还要高一些, 尤其在污染严重的养殖区<sup>[11]</sup>; 如经过一段时间的无氧状态后, 沉积物溶解态 P 的释放可以提高上覆水水柱中 18% 的 P 水平<sup>[3]</sup>。通过比较网箱下面柱状沉

物与对照区沉积物释 P 研究表明, 养殖区底泥释放 P 的速率比对照区高一个数量级, 且所释放大部分 P 都为生物可利用的形式<sup>[36]</sup>.

### 3.4 其它营养盐

N 也会在沉积物中积累, 但仅有总输入 N 的 12% ~ 20% 在底泥中积累<sup>[23]</sup>; N 在沉积物中的污染也具有区域性<sup>[23, 57]</sup>, 在离网箱 200 m 处 N 的沉积率仅为网箱下方的 1/10; 微生物的活动导致氮在沉积物中积累, 而且是底质溶液中无机氮的主要存在形态<sup>[55]</sup>. 对间隙水的氮浓度分析表明, 网箱下面大大高于其它区域<sup>[23]</sup>.

沉积物还积聚约 18% ~ 23% 的总输入的 C<sup>[22]</sup>. 在沉积物表层 3 cm 内含有有机碳 21% ~ 30%, 随着深度的增加略有增加. Wu<sup>[57]</sup> 发现, 饲料中 23% 的 C 沉积在底泥中, 也有报道仅是其的一半<sup>[21]</sup>. 与 NP 相似, C 的污染也存在着区域性, 沉积物中的 C 含量从 3 m 处的 9.35% 减少到 15 m 处的 3.99%<sup>[22]</sup>. 此外, 经微生物的活动, 沉积物中微量元素如 Fe、Mn 等将进一步释放到水柱. 这些微量金属元素含量的增加是导致养殖海区形成赤潮的重要原因<sup>[41]</sup>.

### 3.5 “海底”升高

尽管网箱下部沉积物代谢 10 倍于对照区<sup>[31]</sup>, 但底栖生物及微生物的活动, 分解不了全部的有机物. 鲑鱼养殖网箱下方沉积物中每年仅有 10% 的有机物分解<sup>[2]</sup>. 由于分解速率低, 导致养殖区的沉积物加厚, 长期性的沉积造成养殖渔场“海底上升”. 调查发现, 瑞典网箱养殖中产生的沉积物覆盖面积已达 3.8 个养殖场大小的区域<sup>[22]</sup>. 大部分的悬浮颗粒都沉积到离网箱 1 km 的范围内<sup>[57]</sup>; 在网箱正下方悬浮颗粒的沉积率为  $10 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{yr}^{-1}$ , 而在附近很快就减少为  $3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{yr}^{-1}$ <sup>[21]</sup>. 网箱养殖造成大量的物质沉积, 导致海底抬升, 也使渔场与外界海域水交换量减少, 养殖区富营养海水更难稀释.

## 4 网箱养殖中化学药品的污染

在水产养殖中已广泛使用的各种化学消毒剂、抗生素、激素、疫苗等化学药品用于防治病害、清除敌害生物、消毒和抑制污染性生物. 据报道, 1987 年挪威的水产养殖业使用了 48.5 t 抗生素类药物, 1990 年用量比种植业所用还要多; 英国水产养殖中常用的化学药物就有 23 种; 我国在养殖防病中, 曾使用过近 500 种中西药<sup>[42]</sup>. 在鲑鱼网箱养殖中, 最常用的抗生素为土霉素 (OTC), 常用的治疗剂有孔雀石绿、福尔马林、硫酸铜和敌百虫等, 由于这些药品的降解物质对生物有毒性<sup>[57]</sup>, 因此在许多国家被明令禁止使用<sup>[9]</sup>.

抗生素主要通过混入饲料或直接用于水体中<sup>[27]</sup>, 如对养殖动物药浴, 会有相当部分直接散失到环境中; 抗生素掺入饲料, 其散失率约 70%, 约 70% ~ 90% 添加的 OTC 溶入环境中<sup>[3]</sup>; 在虹鳟饲料中的氯霉素 90% 以上进入水体<sup>[8]</sup>. 按每获取 1 t 的鱼产品约使用 430 g 的抗生素, Wu<sup>[57]</sup> 统计, 从 20 世纪 80 年代末到 90 年代初, 就有 50 ~ 80 t 的抗生素进入水体<sup>[57]</sup>.

调查发现, 养殖区沉积物中也有大量的抗生素存在. 在 5

个养鱼网箱下面的底泥中, 四环素残留量达  $2.0 \sim 6.3 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ , 并持续 7 个月之久<sup>[21]</sup>. 沉积物中 OTC 的含量与使用浓度成正比<sup>[27]</sup>; 抗生素的使用剂量和使用频率是水体中微生物的抗药性强弱的关键控制因子<sup>[27, 37, 49]</sup>. 有人研究发现, 使用土霉素后立即在养鱼场附近的沉积物中找到抗 OTC 的细菌, 抗药性持续达 13 个月<sup>[49, 52]</sup>; 另一研究中发现, 离养殖场几百米处的非目标生物体内 OTC 的浓度在不断上升<sup>[5]</sup>.

海水养殖中的治疗药物和消毒剂等, 已成为影响海洋环境的重要因子. 抗生素造成沉积物中生物群落量和质的改变, 抑制沉积物的降解速率<sup>[5]</sup>, 如减弱水体降解有机碳的能力, 使生源要素的生物地化循环减缓或停止, 造成生态系统中物质循环和能量流动的不畅. 更为严重的是有些药物残留在养殖产品中, 必将影响到人类健康.

## 5 养殖鱼类的逃逸及基因污染

### 5.1 鱼类逃逸造成的影响

在养殖操作过程 (如换网、药浴、收获等) 中, 养殖鱼类的逃逸时有发生, 有的量还很大, 已引起了人们的关注<sup>[5, 33]</sup>. 大量养殖鱼类的逃逸, 必然会影响到渔场附近的生态环境<sup>[5]</sup>. 逃逸鱼与土著鱼竞争食物和生境, 极大地影响了土著鱼类<sup>[3]</sup>. 另外, 还可能造成鱼类病害的流行<sup>[33]</sup>; 更为严重的是, 很多鱼类寄生虫病是人畜互传的<sup>[45]</sup>, 对人类的健康将造成威胁.

### 5.2 基因污染

养殖鱼类逃逸的另一个影响是可能造成外源基因的污染 (包括外来种、转基因鱼及定向育种鱼等). 这些种类对丰富我国水产种质资源、增加养殖种类、调整产品结构、丰富水产品市场起到了积极的作用. 但这些种主要是以养殖生产为目的, 高生长率、低繁殖习性、低游泳能力<sup>[57]</sup>. 因此, 这些种类基因的变异性小、纯合性较高<sup>[5]</sup>, 有的甚至还带有插入的人工插入的外源基因 (GH gene, AFP gene). 如这些鱼逃逸到自然生境中, 将会与土著种进行种间杂交, 导致土著鱼群基因库的减少<sup>[57]</sup>, 降低土著种的遗传变异, 造成基因组成的均一化<sup>[29]</sup>. 这一结果使土著种群对细菌、病毒及环境突变抵抗力减弱, 造成土著种群的覆灭. 这已引起一些专家关注, 建议对其进行不孕不育处理, 以防止其对土著种基因库的影响<sup>[4, 28, 29]</sup>.

## 6 造成水生生物多样性的改变

### 6.1 底栖生物

海水网箱养殖中, 底栖生物群落随着沉积物中有机物质和营养盐含量的变化而发生变化. 初期, 底栖群落的丰度和生物量有所增加, 随后超负荷的反应表现出来, 多样性也可能改变. 如福建湄洲湾的海水养殖由滩涂逐渐转向浅海并进行网箱养殖后, 湾内底栖生物中棘皮动物、软体动物和甲壳类等敏感种类明显减少<sup>[40]</sup>; 对大连湾养鲍场的底栖生物调查时发现, 大个体的优势种消失, 小个体生活周期短的沉积食性和有机碎屑食性的种类在种数和个体数上占绝对优势<sup>[47]</sup>.

网箱养殖对底栖群落的改变是局部的, 根据养殖操作的不同, 在网箱周围 15 m 的范围内, 这种变化可能是永久性的.

在一个连续使用的养殖场中,网箱附近( $< 3\text{ m}$ )的底栖群落的多样性减少,而离网箱  $25 \sim 150\text{ m}$  地方的生物群落与对照区没有什么不同<sup>[56]</sup>;相同的结果见文献<sup>[6,48]</sup>。网箱附近低多样性的区域的优势生物都是一些机会种, $3 \sim 15\text{ m}$  的过渡区为生物的生长提供了丰富的食物和良好的生境,一般来说,离网箱  $15\text{ m}$  的地方,生物多样性最高,生物量和丰度也最大<sup>[6]</sup>。

间隙性的养殖场,底栖生物种类的丰度和多样性在收获后 7 周内都有所升高,同时,重新养殖后 7 周内底栖生物群落的变化<sup>[48]</sup>,暗示着海域环境对养殖操作能迅速作出反应。

## 6.2 浮游生物

一些研究揭示了网箱养殖活动与藻华形成的关系<sup>[7]</sup>。网箱养殖导致水体的富营养化,造成养殖区发生藻华。养殖海区不平衡的 NP 比例还会导致丝状藻类的大量形成,如在一个养殖网箱附近的水体中,总 NP 比为 7.5,而溶解性部分比例高达 28.1<sup>[17]</sup>。在这一比例下,蓝绿藻容易大量繁殖<sup>[3]</sup>。在网箱养殖的沿岸海域中,由于藻类密度的增加,造成水体中高叶绿素含量、高浑浊度、昼日溶解氧大幅度波动及水体中藻类毒素含量的升高<sup>[46]</sup>;室内研究也发现,在水体中添加生物素、 $V_{B12}$  及鱼类的粪粒等,某几种单胞藻数量疯长<sup>[56]</sup>。水柱中的浮游动物并不摄食这些低值的藻华,从而造成了浮游动物摄食者的减少。可以认为,赤潮的发生是浮游生物多样性极端降低的集中表现,尽管它是暂时性的。

## 6.3 野生鱼群

网箱养殖对养殖区自然鱼群的影响存在着正反两个方面。由于有丰富的食物,网箱附近有大量的捕食性和非捕食性的鱼类存在,海区野生鱼类的种群结构及生物量也发生了相应的改变。首先是提高了鱼类的补充率,其次野生鱼类的生长速度与养殖鱼类相差不多,养殖场附近的鱼类的平均大小也比其它沿海区的鱼类要大<sup>[46]</sup>。另外,大量的营养物质输入引起低营养级生物的生物量的变化,改变了种群的生物多样性。

在富营养的水体中,细菌性和真菌性的疾病存在更普遍,这往往与网箱养殖有关<sup>[24]</sup>。此外,网箱养殖的高密度,比自然环境中更易于病害的传播<sup>[42]</sup>;而某些养殖鱼类特有的病害,由于没有保护性的措施,也可能会感染野生种群,造成这些种类数量的减少,甚至导致某些种类的消亡<sup>[35]</sup>。

## 7 展 望

7.1 调查不同养殖海域的环境容量及养殖容量,在合理的范围内养殖生产。水产养殖生态系的不同养殖类型及其特征、池塘养殖及滩涂养殖模式的养殖容量研究途径已有报道<sup>[10]</sup>;方建光等<sup>[13]</sup>采用无机氮作为估算海带养殖容量的关键因子,通过无机氮的供需平衡估算了桑沟湾海带的养殖容量。网箱养殖渔场的养殖容量问题,目前研究报道很少。为了确定其养殖容量,了解网箱养殖对环境影响的效应,必须对养殖环境中的营养负荷、耗氧及土著生物的应答进行量化的研究。收集研究海域内不同鱼类的放养密度、鱼群的逃逸、饲料利用情况、鱼的规格大小等数据,分析得出合理的模型,如 OECD 模型;Ervik 等<sup>[11]</sup>曾提出过一个 MOM 的管理系统,根据养殖区环境

容量来监测网箱养殖对本海区环境的影响,但由于养殖区独特的水动力条件及地形特征,该模型还有待于完善。

7.2 调整优化养殖结构,综合养殖研究,进行异养型养殖与自养型养殖<sup>[10]</sup>混养、套养,降低水体的营养负荷。目前已有贝藻混养<sup>[12]</sup>、虾藻混养<sup>[54]</sup>、鱼藻混养<sup>[20,53]</sup>等二元混养及鱼虾贝藻间多元混养的报道;对于海湾渔场的网箱养殖生态系统,Naylor 等<sup>[43]</sup>认为目前应首先扩展养殖低营养级鱼类;也有人提出发展海底增养殖,可降低底层的污染并有较好的经济效益<sup>[34]</sup>;但需对这些模式的机制方面进行详细的研究和完善。此外,作者认为提高饲料质量并改进投饵技术,也应是优化养殖结构的一个必需部分。网箱养殖过程中,残饵是主要的污染源之一,不可否认残饵减少了,对养殖环境的影响也必将大大减少,但目前这方面研究还不够深入。

7.3 网箱养殖与赤潮形成的关系,应扩大调查的范围;对不同的养殖模式下,分析赤潮形成的不同条件,从而得出养殖海域赤潮形成的一般性关系。同时对养殖渔场生态系中微生物的作用,也要进行充分的评估,既要肯定其有利的一方面,也对不利方面有充分的认识。

7.4 开展退化生态系统的修复技术研究。根据生态毒理学和营养动力学的基本原理,利用生物对恶化的养殖环境进行修复。如采用微生物修复养殖环境<sup>[39]</sup>,用沙蚕等耐污性生物作为修复生物;另外,还可利用植物修复环境,如采用大型海藻吊养在网箱间,用海藻提取养殖水体中的营养盐,国内外已做过一些研究,海藻吸取营养、放出氧气,改善了养殖环境,增产增收。但现有研究存在的缺陷是只进行一种海藻的养殖即只养殖一个季节。可选择两种或几种海藻搭配,实现全年不间断地对网箱养殖海区进行修复。植物修复已成为国际推崇的技术,研究的热点之一,也是难点,尤其从分子水平了解其机理,使修复技术和修复效率突破性发展。

7.5 制定网箱养殖的标准和法规,加强对海水网箱养殖环境和技术的管理,使我国的养殖业真正做到可持续发展。

致谢 国家海洋局第三海洋研究所张金标研究员提出意见。

## 参考文献

- 1 Ackefors H, Enell M. 1990. Discharge of nutrients from Swedish fish farming to adjacent sea areas. *Ambio*, **19**:28
- 2 Aure J, Stigebrandt A. 1990. Quantitative estimates of the eutrophication effects of fish farming on fjords. *Aquaculture*, **90**:135 ~ 156
- 3 Axler R, Tikkanen C, McDonald M, et al. 1996. Water quality issues associated with aquaculture: A case study in mine pit lakes. *Water Environ Res*, **68**:995 ~ 1011
- 4 Benfey TJ, 2001. Use of sterile triploid Atlantic salmon (*Salmo salar* L.) for aquaculture in New Brunswick, Canada. *ICES J Mar Sci*, **58**:525 ~ 529
- 5 Beveridge M, Ross LG, Kelly LA. 1994. Aquaculture and biodiversity. *Ambio*, **23**:497 ~ 502
- 6 Brown JR, Gowen RJ, McLusky DS. 1987. The effect of salmon fishing on the benthos of a Scottish sea loch. *J Exp Mar Biol Ecol*, **109**:39 ~ 51
- 7 Cembella AD, Quilliam MA, Lewis NI, et al. 2002. The toxigenic marine dinoflagellate *Alexandrium tamarense* as the probable cause of mortality of caged salmon in Nova Scotia. *Harmf Algae*, **1**(3):313 ~ 325
- 8 Cravedi JP. 1987. Digestibility of chloramphenicol, oxolinic acid and oxytetracycline in rainbow trout and influence of these antibiotics on lipid

- digestibility. *Aquaculture* ,**60**:133 ~ 141
- 9 Davies IM, Mckie JC. 1987. Accumulation of total tin and tributyltin in muscle tissue of farmed Atlantic salmon. *Mar Poll Bull* ,**18**:405 ~ 407
  - 10 Dong S-L (董双林), Li D-S (李德尚), Pan K-H (潘克厚). 1998. On the carrying capacity of mariculture. *J Ocean Univ Qingdao* (青岛海洋大学学报) ,**28**(2):253 ~ 258 (in Chinese)
  - 11 Ervik A, Hansen PK, Aure J, et al. 1997. Regulating the local environmental impact of intensive marine fish farming. The concept of the MOM system. *Aquaculture* ,**158**:85 ~ 94
  - 12 Fang J-G (方建光), Sun H-L (孙慧玲), Kuang S-H (匡世焕), et al. 1996. Mariculture status and optimizing measurements for the culture of scallop *Chlamys farreri* and kelp *Laminaria japonica* in Sanggou bay. *Mar Fish Res* (海洋水产研究) ,**17**(2):95 ~ 101 (in Chinese)
  - 13 Fang J-G (方建光), Sun H-L (孙慧玲), Kuang S-H (匡世焕), et al. 1996. Assessing the carrying capacity of Sanggou bay for culture of kelp *Laminaria japonica*. *Mar Fish Res* (海洋水产研究) ,**17**(2):7 ~ 17 (in Chinese)
  - 14 FAO. 1998. Aquaculture production statistics 1988 ~ 1997. FAO. Rome.
  - 15 Fishery Bureau of Agriculture Ministry, P. R. China (中华人民共和国农业部渔业局). 2000. Chinese Fishery Statistic Annals. 1980 ~ 2000 (in Chinese)
  - 16 Folke C, Kautsky N, Troell M, et al. 1997. Salmon farming in context: Response to Black. *J Env Manage* ,**89**:89 ~ 95
  - 17 Folke C, Kautsky N, Troell M. 1994. The costs of eutrophication from salmon fishing: Implications for policy. *J Environ Manage* ,**40**:173 ~ 182
  - 18 Gan J-L (甘居利), Jia X-P (贾晓平), Lin Q (林钦), et al. 2001. A Primary study on the risk evaluation of aged cage culture areas. *J Fish Sci Chin* (中国水产科学) ,**8**(3):86 ~ 89 (in Chinese)
  - 19 Gan J-L (甘居利), Lin Q (林钦), Li C-H (李纯厚), et al. 2000. Strength variation of environmental factors in different cage culture area of Zhelin Bay. *J Zhejiang Ocean Univ (Nat Sci)* (浙江海洋学院学报(自然科学版)) ,**20**(1):18 ~ 22 (in Chinese)
  - 20 Genn EP, Moore D, Brown JJ, et al. 1998. A sustainable culture system for *Gracilaria parvispora* (Rhodophyta) using sporelings, reef growout and floating cages in Hawaii. *Aquaculture* ,**165**:221 ~ 232
  - 21 Gowen RJ, Bradbury NB. 1987. The ecological impacts of salmonid farming in coastal waters: A review. *Oceanogr Mar Biol* ,**25**:563 ~ 575
  - 22 Hall PO, Anderson L G, Holby O, et al. 1990. Chemical fluxes and mass balances in a marine fish cage farm I. Carbon. *Mar Ecol Prog Ser* ,**61**:61 ~ 73
  - 23 Hall PO, Holby O, Kollberg S, et al. 1992. Chemical fluxes and mass balances in a marine fish cage farm. Nitrogen. *Mar Ecol Prog Ser* ,**89**:81 ~ 91
  - 24 Hastein T, Lindstad T. 1991. Diseases in wild and cultured salmon: Possible interaction. *Aquaculture* ,**98**:277 ~ 288
  - 25 He G-M (何国民), Lu W-X (卢婉娴), Liu Y-G (刘豫广), et al. 1997. Analysing on the degradational characteristics of caged fish culture of a bay. *J Fish Sci Chin* (中国水产科学) ,**4**(5):76 ~ 80 (in Chinese)
  - 26 He Y-Q (何悦强), Zheng Q-H (郑庆华), Wen W-Y (温伟英), et al. 1996. A study on seawater environment affected by cage mariculture in Daya bay. *Tropic Oceanol* (热带海洋) ,**25**(2):22 ~ 27 (in Chinese)
  - 27 Herwig RP, Gray JP, Weston DP. 1997. Antibacterial resistant bacteria in surficial sediments near salmon net-cage farms in Puget Sound, Washington. *Aquaculture* ,**149**:263 ~ 283
  - 28 Hew CL, Fletcher GL, Davies PL. 1996. Transgenic salmon tailoring the genome for fish production. *J Fish Biol* ,**47**(supp A):1 ~ 19
  - 29 Hindar K, Ryman N, Utter F. 1991. Genetic effects of aquaculture on natural fish populations. *Aquaculture* ,**98**:259 ~ 261
  - 30 Holby O, Hall PO. 1991. Chemical fluxes and mass balances in a marine fish cage farm. Phosphorus. *Mar Ecol Prog Ser* ,**70**:263 ~ 272
  - 31 Holmer M, Kristensen E. 1992. Impacts of marine cage farming on metabolism and sulphate reduction of underlying sediments. *Mar Ecol Prog Ser* ,**80**:191 ~ 201
  - 32 Huang X-H (黄晓航), Wu C-Y (吴超元), Cola J, et al. 1994. A review of anoxia and treatment countermeasure of Long Island in America. *Acta Oceanol Sin* (海洋学报) ,**16**(3):57 ~ 60 (in Chinese)
  - 33 ICES. 1997. Issues related to mariculture. In: ICES Cooperative Research Report (No. 222). Copenhagen (Denmark): ICES. 102 ~ 106
  - 34 Ji X-L (计新丽), Lin X-T (林小涛), Xu Z-N (许忠能), et al. 2000. Mechanism of mariculture self-pollution and its effects on environment. *Mar Environ Sci* (海洋环境科学) ,**19**(4):66 ~ 71 (in Chinese)
  - 35 Johnsen BO, Jensen AJ. 1986. Infestations of Atlantic salmon, *Salmo salar*, by *Gyrodactylus salaricus* in Norwegian waters. *J Fish Biol* ,**29**:233 ~ 241
  - 36 Kelly LA. 1992. Dissolved reactive phosphorus release from sediments beneath a freshwater cage aquaculture development in west Scotland. *Hydrobiologia* ,**235/236**:569 ~ 572
  - 37 Kerry J, Hiney M, Coyne R, et al. 1994. Frequency and distribution of resistance to oxytetracycline in microorganisms isolated from marine fish farm sediments following therapeutic use of oxytetracycline. *Aquaculture* ,**123**:43 ~ 54
  - 38 Kolke C, Kautsky N. 1989. The role of ecosystems for a sustainable development of aquaculture. *Ambio* ,**18**:234 ~ 243
  - 39 Li Q-F (李秋芬), Yuan Y-X (袁有宪). 2000. Outlook for bioremediation researches on marine aquacultural environment. *J Fish Sci Chin* (中国水产科学) ,**7**(2):90 ~ 92 (in Chinese)
  - 40 Li Y-F (李延凤). 1999. Relationship between the marine environment and fishery resources in Meizhou bay. *Mar Environ Sci* (海洋环境科学) ,**18**(4):52 ~ 56 (in Chinese)
  - 41 Lin Y-T (林燕棠), Li C-H (李纯厚), Yang M-L (杨美兰), et al. 1998. Discussion of the relationship between the feeding and red tide in cage culture area. *Fish Res Nanhai Sea* (南海水产研究) ,**16**:35 ~ 41 (in Chinese)
  - 42 Liu J-S (刘家寿), Cui Y-B (崔奕波), Liu J-K (刘健康). 1997. Advances in studies on the effect of cage culture on the environment. *Acta Hydrobiol Sin* (水生生物学报) ,**21**(2):174 ~ 184 (in Chinese)
  - 43 Naylor RL, Goldburg RJ, Primavera JH, et al. 2000. Effect of aquaculture on world fish supplies. *Nature* ,**405**:1017 ~ 1024
  - 44 New MB. 1997. Aquaculture are the capture fisheries. *World Aquac* ,**28**:11 ~ 30
  - 45 Ogawa K. 1996. Marine parasitology with special reference to Japanese fisheries and mariculture. *Veter Parasitol* ,**64**:95 ~ 105
  - 46 Phillips MJ, Beveridge MC, Ross L G. 1985. The environmental impact of salmonid cage culture on inland fisheries: Present status and future trends. *J Fish Biol* ,**27**(supp. A):123 ~ 137
  - 47 Ren Y-P (任一平), Zeng X-Q (曾晓起). 1998. Biological monitoring of organic pollution induced by marine abalone cage culture. *J Ocean Univ Qingdao* (青岛海洋大学学报) ,**28**(3):410 ~ 414 (in Chinese)
  - 48 Ritz DA, Lewis ME, Shen M. 1989. Response to organic enrichment of infaunal macrobenthic communities under salmonid cages. *Mar Biol* ,**103**:211 ~ 214
  - 49 Samuelson OB, Torsvik V, Ervik A. 1992. Long-range changes in oxytetracycline concentration and bacterial resistance toward oxytetracycline in a fish farm sediment after medication. *Sci Total Environ* ,**114**:25 ~ 36
  - 50 Silvert W, Sowles JW. 1996. Modelling environmental impacts of marine finfish aquaculture. *J Appl Ichthyol* ,**12**:75 ~ 81
  - 51 Solbe JF. 1988. Water quality. In: Laird L, Needham T, eds. Salmon and Trout Farming. Chichester: Ellis Horwood Ltd. 69 ~ 86
  - 52 Torsvik VL, R Sorheim, J Goksoyr. 1988. Antibiotic resistance of bacteria from fish farm sediment. Denmark: Copenhagen ICES.
  - 53 Troell M, Halling C, Nilsson A, et al. 1997. Integrated marine cultivation of *Gracilaria chilensis* and salmon cages reduced environmental impact and increased economic output. *Aquaculture* ,**156**:45 ~ 61
  - 54 Troell M, Ronnback P, Halling C, et al. 1999. Ecological engineering in aquaculture: Use of seaweeds for removing nutrients from intensive mariculture. *J Appl Phycol* ,**11**:89 ~ 97
  - 55 Wang X-P (王小平). 1998. The N and P in sediment interstitial water of cage cultural waters in the depth bay of Niutou Island. *J Fish Sci Chin* (中国水产科学) ,**5**(3):126 ~ 128 (in Chinese)
  - 56 Wu RS, Lam KS, Mackay DW, et al. 1994. Impact of marine fish farming on water quality and bottom sediment: A case study of the sub-tropical environment. *Mar Environ Res* ,**38**:115 ~ 145
  - 57 Wu RS. 1995. The environmental impact of marine fish culture towards a sustainable future. *Mar Poll Bull* ,**31**:159 ~ 166
  - 58 Yang M-L (杨美兰), Zhong Y (钟彦), Lin Y-T (林燕棠). 1998. Characteristics of nitrogen and phosphorus contents in Nan'ao waters of Daspeng bay. *Tropic Oceanol* (热带海洋) ,**17**(2):74 ~ 80 (in Chinese)

作者简介 徐永健,男,1975年生,博士生,主要从事海洋生态学研究,发表论文多篇。Tel: 0592-2185752, E-mail: yongjianxu@hotmail.com