

# 海水养殖自身污染的定量化研究

赵清, 张珞平

(厦门大学 环境科学研究中心, 厦门 福建 361005)

**摘要:** 叙述了国内外养殖自身污染的定量化研究, 总结了五类方法的研究现状和结果。其中“养殖区现场测定法”主要叙述贝类养殖中生物性沉积量及其中营养盐的研究结果; “基于现场测定的数学模型法”分析比较了竹内俊郎法、物料平衡法和化学分析法等估算方法; “养殖池中 N、P 收支的定量化研究”总结了投饵养殖中溶入水体的 N、P 占投饵 N、P 总量的比例, 其中虾类分别为 8%~12.8% 和 7.2%~40%, 鱼类分别为 49%~61% 和 16%~26%。此外还有对“室内模拟试验与测定法”以及“观测对照养殖区内外环境指标的研究”两种方法简单的分析和总结。

**关键词:** 养殖污染; 定量化方法; 海水养殖

**中图分类号:** X171; S96 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-6336(2004)03-0077-04

## Study on quantitative methods of self-pollution of mariculture

ZHAO Qing, ZHANG Luoping

(Environmental Science Research Center of Xiamen University, Xiamen 361005, China)

**Abstract:** Reviews of research advance on the quantitative methods of self-pollution of mariculture and summarizes five kinds of methods were made. From study of the spot mensuration method, quantitative results of seashell biologic sediment and nutrients were summarized. From research of the mathematic modeling method, three methods were analyzed, which are ZHU NEIJUN LANG method (Japan), chemical analysis method and material balance method. From summary of the nutrient budget method, proportion of soluble nitrogen (N) and phosphorus (P) loads accounting for total loads of N and P in feed were summarized: shrimp 8%~12.8% (N) and 7.2%~40% (P) and fish 49%~61% (N) and 16%~26% (P). And the other two methods were generally introduced, which are the indoor simulative experiment and antitheses of environmental index.

**Key words:** aquatic pollution; quantitative method; mariculture

近年来, 养殖产业规模不断扩大, 在水产养殖与环境的相互关系上, 人们较重视环境对养殖的影响, 而对水产养殖所产生的负面影响关注不够。养殖污染物的排放、沉积可引起水体富营养化, 造成水质恶化, 严重时导致养殖生态系统失衡、紊乱乃至完全崩溃, 养殖自身污染问题正逐渐显露且日益突出。本文将从养殖自身污染机制及其影响入手, 重点叙述养殖自身污染量化的国内外研究情况。

### 1 养殖自身污染的概念、机制及其对环境的影响

养殖自身污染是指由于养殖过程中固液态废物的排放, 而导致养殖水体及其邻近水域污染物含量超过正常水平, 使水体生态功能受到影响的状况。

目前世界上的海水养殖系统, 大多已进入半集约化或集约化养殖。非投饵集约化的养殖生态系

统常见的有海藻和贝类养殖系统; 投饵养殖主要有网箱和池塘养殖两种形式, 饵料的投入和残饵的生成是促成养殖自身污染的一个重要因素<sup>[1]</sup>。具体来看, 虾类养殖污染主要来自新生残饵溶出的 N、P 营养物质<sup>[2]</sup>, 以及养殖排海水中大量的硫化物、NO<sup>2-</sup>、NH<sub>4</sub> 和悬浮固体<sup>[3,4]</sup>, 鱼类除了残饵以外, 还包括鱼类的粪便及其排泄物, 这些物质中所含的营养物即 N、P 和有机质, 对水体和底泥将产生富营养化影响<sup>[5]</sup>。贝类养殖海区自身污染的形成主要是由于生物沉降作用和由此引起的养殖水域营养物质滞留, 造成该养殖区及近邻海域水体的底质缺氧、水质恶化, 同时养殖区筏架对海流的阻碍造成水体交换和物质循环减慢, 从而使局部污染加重, 并且增加了赤潮产生的水动力条件<sup>[1]</sup>。总体来说, 养殖自身污染属于有机污染, 其形式主要是增加了 N、P 的环境负荷量。

收稿日期: 2003-10-27, 修改稿收到日期: 2003-11-10

作者简介: 赵清 (1979-), 女, 江西省宜春人, 硕士研究生, 从事环境规划与管理的研究。

## 2 养殖自身污染定量化研究

养殖自身污染的定量化研究方法主要包括养殖区现场测定法、基于现场测定的数学模型法、养殖池中N、P的收支定量化研究、室内模拟试验与测定法和对养殖区内外环境指标进行观测与对照的研究。研究内容主要是对养殖过程中产生的颗粒有机物及其中的营养盐的定量化研究。

### 2.1 养殖区现场测定法

养殖区现场测定的方法能真实反映养殖区污染产生量的情况,数据获得直接,因此在各种养殖污染的定量研究中使用最为广泛,它对于其他定量研究方法往往必不可少。但由于现场测定的过程较繁琐,测定指标选取的科学性以及测定过程中对

环境动态的考虑都直接影响测定的结果。关于现场测定的研究,Foy和Roseu测定池塘生产1t虹鳟,发现池塘总N和总P负载分别为124.2kg和25.6kg<sup>[6]</sup>;Penczak等的测定结果表明每生产1t虹鳟,总C、总N和总P负荷分别为750kg、100kg和23kg<sup>[7]</sup>,可以看出Foy和Roseu与Penczak等的结果相近。此外还有对贝类的生物沉积中颗粒物及其中的营养盐含量的测定研究<sup>[8~14]</sup>,见表1和表2。从表1中可以看出,贝类养殖过程中产生的有机颗粒量的研究对象主要为贝类的粪便量,从研究的结果看,由于统计方法的不同,表中的数据难以统一到同一的标准下进行比较。从表2中可以看出,文献[9]和[11]关于贝类生物性沉积物中的C/N值范围研究结果相近。

表1 贝类生物沉降中有机颗粒量的研究

Tab.1 Research of organic matter in seashell sedimentation

养殖种类	养殖地区	研究情况	文献
牡蛎	广岛湾	在9个月的养殖期内,420000个牡蛎能产生16t的粪便和假粪。	[8]
长牡蛎 <i>Crassostrea gas</i>	日本	10个月的养殖周期内,1台筏(长200m)将产生193t干重的粪便物。	[9]
自然种群贻贝 <i>Mytilusedulis</i>	日本	每年每g干重贻贝产生粪便量为1.76g干重物。	[10]
栉孔扇贝	山东省桑沟湾	排粪量65.88kg/(hm <sup>2</sup> ·d)(干重);年产生粪便量18520t(干重)。	[12]
扇贝(筏式养殖)	胶州湾	废物排泄量约8.2~12.0kg/(hm <sup>2</sup> ·d);全湾年产生废物量4000~6000t(养殖面积为1333.3hm <sup>2</sup> ,6000笼/hm <sup>2</sup> ,270个贝/笼)。	[14]
扇贝 <i>Placopecten magellanicus</i>	四十里湾	全海区日排泄总量5.5~3t(湿重),年排泄物总量2000~2500t,如加上海鞘等附着生物的排泄,总量高达4000t。	[14]

表2 贝类养殖中关于营养盐的研究

Tab.2 Research of nutrition in seashell aquaculture

养殖种类	养殖地区	研究情况	文献
长牡蛎 <i>Crassostrea gas</i>	日本	养殖筏架中粪便C/N值处在6~10间。	[9]
自然种群贻贝 <i>Mytilusedulis</i>	日本	1.76g干重粪便物中含C0.13g、N0.0017g和P0.00026g。	[10]
贻贝(筏式养殖)	Killary港(爱尔兰)	每年每m <sup>2</sup> 筏产生的粪便中含C8.5kg和含N1.1kg,其C/N值约为8。	[11]
<i>Cardium edu</i> 和 <i>Mya arenaria</i> 两种滤食性贝类	瑞典	生物性沉积N的量为2000t/a;年平均C沉积率为29g/m <sup>2</sup> 。	[12]

### 2.2 基于现场测定的数学模型法

基于现场测定的数学模型方法,既存在现场测定方法的优缺点,借助数学模型,又可使污染估算简单化,但模型中经验参数的选取易受人为主观因素影响而产生波动,从而影响估算结果。该方法以估算养殖有机污染中的N、P负荷量为主<sup>[8,14,16,19,20]</sup>,也有对养殖产生的固态颗粒<sup>[13]</sup>的测定与定量计算。

在养殖有机污染中N、P负荷量的估算方法中,以竹内俊郎法<sup>[8]</sup>较为简便实用,即“从给饵的营养成分中,扣除蓄积在鱼体内的量,剩余的即环境负荷量”。计算方法如下:

$$N \text{ 负荷量: } FN = (C \times N_f - N_b) \times 10 \quad (\text{kg/t}),$$

$$P \text{ 负荷量: } FP = (C \times P_f - P_b) \times 10 \quad (\text{kg/t}).$$

式中:C为增肉系数;N<sub>f</sub>、P<sub>f</sub>为饵料中N、P含量(%);N<sub>b</sub>、P<sub>b</sub>为生物体内N、P含量(%).根据日本高知水产实验所试验结果,网箱养鱼的平均N负荷量和P负荷量分别为91kg/t和23kg/t。

黄小平和温伟英<sup>[16]</sup>在研究上川岛公湾海域环境对其网箱养殖容量的限制程度时,也提出了网箱(3m×3m×3m)养鱼的N、P污染负荷量F<sub>N</sub>、F<sub>P</sub>的估算模型,公式如下:

$$F_N = E \cdot E_N - Y \cdot Y_N \quad (\text{kg/t}),$$

$$F_p = E \cdot E_p - Y \cdot Y_p \quad (\text{kg/t})。$$

式中:  $E$  为相应产鱼量所需投饵量(产鱼量和投饵量之比为 12);  $Y$  为产鱼量;  $E_N$ 、 $E_p$  为饵料中含 N、P 含量, 饵料中蛋白质含 N 量平均为 30.87%, 饵料中 P 的含量为 0.70%;  $Y_N$ 、 $Y_p$  为鱼体内 N、P 含量, 鱼体内(湿重)蛋白质含量平均约 15%, 蛋白质中含 N 量约 16%, 鱼体内(湿重)的含 P 量 0.58%; 通过计算, 每个网箱的 N、P 污染物负荷量分别为 75 kg/t 和 8.2 kg/t。该结果均低于采用竹内俊郎法估算的平均 N 和 P 负荷量(91 kg/t 和 23 kg/t), 但与 Penczak 等人的测定结果十分相近。对比竹内俊郎法与黄小平和温伟英的数学模型可以发现, 前者的模型是从实际的增肉系数来考虑污染负荷的估算, 而后者直接给定产鱼量和投饵量的比值(12), 而实际海水养殖中的产鱼量与投饵量之比常常大于这个比值<sup>[17,18]</sup>, 因此使得其估算结果偏小。

化学分析法是对排出鱼塘的养殖污水进行水质分析(其中总 N 的测定一般采用凯氏定氮法, 总 P 的测定采用硫酸-高氯酸钼锑抗比色法<sup>[51]</sup>), 再根据鱼塘总排水量, 进行废物 N、P 估算, 其公式为  $P = Q(c_{out} - c_{int})$ ;  $P$  为污染物排放负荷量(t/a),  $Q$  为排出鱼塘水量( $\text{m}^3$ ),  $c_{out}$ 、 $c_{int}$  为出、进水的污染物浓度( $\text{mg/L}$ )。物料平衡法是根据食物用量、生物量和营养物在生物体内的总 N 含量来估算污染负荷的, 其公式为  $P = S - W$ ;  $P$  为排入环境的 N、P 负荷量(t/a),  $S$  为各种投喂食物中 N、P 负荷量(t/a),  $W$  为水产养殖收获生物体内 N、P 负荷量。张玉珍等运用竹内俊郎法、化学分析法和物料平衡法对福建省九龙江五小川流域水产养殖的 N、P 污染负荷的估算结果发现, N、P 污染负荷估算值大小次序为: 竹内俊郎法 > 物料平衡法 > 化学分析法。出现这种结果的原因, 主要是因为竹内俊郎法是从较保守角度来考虑污染负荷, 因此结果偏大; 化学分析法只包含 N、P 污染物的可溶态和悬浮态两者浓度之和, 而没有考虑底泥中 N、P 含量, 因此结果偏小; 而物料平衡法遵循输入鱼塘的总 N(总 P)量为投入中各种物质总 N(总 P)量与鱼体内 N(P)含量之和, 从理论上讲, 这种方法较符合实际, 因此介于竹内俊郎法与化学分析法之间<sup>[19]</sup>。

在杨红生<sup>[13]</sup>的文中提到有研究者采用沉积物捕集器法现场测定了地中海贻贝养殖区的生物性沉积, 并提出根据颗粒有机物和水流速度计算生物粪便和假粪沉积及总生物性沉积的经验公式。

### 2.3 养殖池中 N、P 收支的定量化研究

养殖池中 N、P 收支的定量化研究遵循物质守恒规律, 与物料平衡法类似, 一般是将养殖水体看作封闭性的箱式模型, 研究其中的 N、P 收支情况, 由于虾池(塘)相比其他养殖方式更符合封闭“箱式”的要求, 因此该类研究方法较多的集中在对虾类养殖系统的研究上<sup>[21~23]</sup>, 也有涉及到鱼场中的营养盐研究<sup>[24]</sup>。目前国内外从虾类和鱼类养殖的营养盐收支研究来看, 营养盐收入都主要来自饵料(包括肥料), 支出主要包括三项: 生物体收获、颗粒物沉积和溶于水中, 养殖自身污染主要来源于第三项, 即溶入水体的营养盐和有机质。其中虾类养殖中, 以虾体收获的 N、P 占投饵 N、P 总量的 5.8%~40% (其中大多数研究主要落在 18%~23% 的范围内) 和 3.02%~6.1%; 颗粒沉降的 N、P 占投饵 N、P 总量的 19.4%~68% 和 21.7%~95.9%; 溶入水体 N、P 占投饵 N、P 总量的 8%~36.1% (其中大多数研究主要落在 8%~12.8% 的范围内) 和 7.2%~40%。<sup>[20]</sup> 鱼类养殖中, 鱼体收获的 N、P 占投饵 N、P 总量的 19%~28% 和 15%~30%; 颗粒沉降的 N、P 占投饵 N、P 总量的 20%~28% 和 51%~59%; 溶入水体 N、P 占投饵 N、P 总量的 49%~61% 和 16%~26%。<sup>[11]</sup> 从这些数据可以看出, 由于养殖品种、方式、养殖环境、投饵量等的不同, 导致数据变动范围较大。

### 2.4 室内模拟试验与测定法

室内模拟实验可以弥补现场测定繁琐的缺陷, 但室内实验只是几个因素的可控环境, 无法模拟自然环境中养殖生物之间的相互作用, 并且对于动态环境也难以做到完全模拟, 从而试验结果出现偏颇。关于这方面的研究, Timothy 等<sup>[27]</sup> 研究发现双壳硬壳蛤随着壳长由 3.0~12.6 mm 变化, 每天每克蛤排出的  $\text{NH}_4\text{-N}$  范围为 20.0~89.4  $\mu\text{g}$ ; 养殖池中  $\text{BOD}_5$  的负荷变化范围为 0.05~0.32  $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ , 变化范围较大。

### 2.5 观测对照养殖区内外环境指标的研究方法

近年来, 国内外对海水网箱养殖的自身污染问题的一些研究主要集中在养殖区内外环境指标的对照观测及分析上。该研究方法可以直观的反映相比非养殖区的养殖区污染情况, 从而发现养殖污染因子, 并通过测定分析得出具体的污染因子数据, 为养殖污染的定量化提供依据。吴庆龙等<sup>[15]</sup> 研究了大水面网围精养对水质的影响, 试验结果表明围养的 N、P 污染相当一部分以残饵、粪便等悬

浮物形式进入水体,养鱼区 COD<sub>Cr</sub> 比网外高 26%, 比对照点高 30%; BOD<sub>5</sub> 比网外高 44.3%, 比对照点高 31%。

### 3 结论和建议

根据对养殖污染定量化研究方法的分析,笔者认为养殖污染的定量化可以考虑将养殖区内外环境指标的对照观测及分析方法、现场测定法及室内模拟法结合起来,在研究特定水域的水动力发展规律的基础上,通过对照分析,选取现场测定中的环境因子,提出该特定区域及特定养殖生物的数学模型,比如对于养殖投饵方式单一的养殖区,可以考虑竹内俊郎法,对于相对封闭的养殖区,可以考虑物料平衡法及养殖池中 N、P 收支的定量化研究,对于水流扰动较大的区域,可以在借鉴化学分析法的基础上,增加对养殖底泥的二次污染的测定与研究,其计算公式<sup>[19]</sup>如下:

$$P = Q_1(c_{out} - c_{int}) + S_c \times Q_2$$

式中:  $P$  为污染物排放负荷;  $Q_1$  为排出养殖区的水量;  $c_{out}$ 、 $c_{int}$  为排水和进水的污染物浓度;  $S_c$  为养殖区底泥浓度;  $Q_2$  为挖出的底泥量。

### 参考文献:

- [1] 计新丽,林小涛,许忠能,等. 海水养殖自身污染机制及其对环境的影响[J]. 海洋环境科学, 2000, 19(4): 66-71.
- [2] 孙耀,李健,崔毅,等. 虾塘新生残饵的 N、P 营养物质溶出速率及其变化规律研究[J]. 应用生态学报, 1997, 8(5): 541-544.
- [3] PÉZOSUNA F, GUERRERO-GALVÁN S R, RUIZ-FERNÁNDEZ A C. The environmental impact of shrimp aquaculture and the coastal pollution in Mexico[J]. Marine Pollution Bulletin, 1998, 36: 65-75.
- [4] COREA A S, JAYASINGHE J M, EKARATNE S U, et al. Environmental impact of prawn farming on Dutch canal: The main water source for the prawn culture industry in Sri Lanka[J]. Ambio, 1995, 24: 423-427.
- [5] 温志良,张爱军,温琰茂. 集约化淡水养殖对水环境的影响[J]. 水利渔业, 2000, 20(4): 19-20.
- [6] FOY R H, ROSELL R. Loadings of nitrogen and phosphorus from a Northern Ireland fish farm[J]. Aquaculture, 1991, 96: 17-30.
- [7] PENCZAK T, GALICKA W, MOLINSKI M, et al. The enrichment of a mesotrophic lake by carbon, phosphorus and nitrogen from the cage aquaculture of rainbow trout, *Salmo gairdneri*[J]. Appl Ecol, 1982, 19: 371-393.
- [8] 东亚海域海洋污染预防与管理厦门示范区执行委员会办公室. 厦门海岸带综合管理 1994-1998(下册)[M]. 北京:海洋出版社, 1998.
- [9] 楠木丰. カキ养殖场における渔场老化に関する基础的研究、[J]. 日本水产学会志, 1977, 43(2): 163-171.
- [10] CHO C Y, KAUSHY S J. Effects of protein in take on metabolizable and net energy values of fish diets[A]. Feeding and Nutrition [C]. London: Academic Press, 1985. 259-329.
- [11] 温志良,温琰茂. 海水养殖对环境的影响[J]. 环境科学动态, 2000, (1): 29-32.
- [12] 季如宝,毛兴华,朱明远. 贝类养殖对海湾生态系统的影响[J]. 黄渤海海洋, 1998, 16(1): 21-27.
- [13] 杨红生,周毅. 滤食性贝类对养殖海区环境影响的研究进展[J]. 海洋科学, 1998, (2): 42-44.
- [14] 吴耀泉. 谈谈港湾浅海筏式养殖区“老化”与贝类排泄物关系[J]. 中国水产, 1996, (4): 31.
- [15] 吴庆龙,陈开宁,高光,等. 大水面网围精养对水环境的影响及其对策[J]. 水产学报, 1995, 19(4): 343-349.
- [16] 黄小平,温伟英. 上川岛海湾海域环境对其网箱养殖容量限制的研究[J]. 热带海洋, 1998, 17(4): 58-64.
- [17] 郑岳夫,周洪,周科勤,等. 象山港海区石斑鱼网箱养殖技术研究[J]. 浙江水产学院学报, 1996, 15(2): 100-106.
- [18] 沈美芳,耿隆坤,姜菊逸,等. 使用颗粒饵料养殖鲈鱼试验[J]. 水产养殖, 1997, 5: 19-20.
- [19] 张玉珍,洪华生,陈能汪,等. 水产养殖氮磷污染负荷估算初探[J]. 厦门大学学报, 2003, 42(2): 223-227.
- [20] 董双林,潘克厚. 海水养殖对沿岸生态环境影响的研究进展[J]. 青岛海洋大学学报, 2000, 30(4): 575-582.
- [21] SIMON J, MATTHEW R P. Nutrient budgets in intensive shrimp ponds: implications for sustainability[J]. Aquaculture, 1998: 117-133.
- [22] 齐振雄,李德尚,张曼平,等. 对虾养殖池塘氮磷收支的实验研究[J]. 水产学报, 1998, 22(2): 124-128.
- [23] 杨逸萍,王增焕,孙建,等. 精养虾池主要水化学因子变化规律和氮的收支[J]. 海洋科学, 1999, (1): 15-17.
- [24] LEFEBVRE S, BACHER C, MEURET A, et al. Modeling nitrogen cycling in a mariculture ecosystem as a tool to evaluate its outflow[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2001, 52: 305-325.
- [25] PHILIPS M J, LIN C K, BEVERIDGE M C M. Shrimp culture and the environment: lessons from the world's most rapidly expanding warm water aquaculture sector[A]. Environment and Aquaculture in Developing Countries[C]. Manila: ICLARM, 1993. 171-196.
- [26] COWEN R J, BRADBURY N B. The ecological impact of salmon farming in coastal waters: A review[J]. Oceanogr Mar Biol Ann Rev, 1987, 25: 563-575.
- [27] TIMOTHY J, THOMAS B, KELLY A. Northern quahog, *Merccernaria mercenaria*, seed clam waste characterization study: precursor to a recirculating culture system design[J]. Aquaculture Engineering, 1999, 20: 149-161.