

基于氮磷负荷的淡水池塘河蟹养殖容量估算

兰艳, 俞锦辰, 刘怡琳, 赵旭, 储鸣, 黄宏

Assessment of carrying capacity of crab culture in freshwater pond based on nitrogen and phosphorus load

LAN Yan, YU Jincheng, LIU Yilin, ZHAO Xu, CHU Ming, HUANG Hong

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12024/jsou.20200403014>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于环境容纳量的区域性养殖容量评估

Carrying Capacity of Regional Aquaculture Based on Environmental Capacity

水生态学杂志. 2019, 40(2): 27 <https://doi.org/10.15928/j.1674-3075.2019.02.005>

投喂负荷对循环水养殖大西洋鲑生长及氮、磷收支的影响

Effects of feeding load on growth, nitrogen and phosphorus budgets of Atlantic salmon (*Salmo salar*) in recirculating aquaculture systems

渔业现代化. 2014, 41(2): 1 <https://doi.org/10.3969/j.issn.1007-9580.2014.02.001>

山东省海水鱼虾养殖氮磷污染负荷及能耗分析

Analysis on the nitrogen and phosphorus pollution loads, as well as energy consumption of sea fish and shrimp in Shandong Province

渔业研究. 2019, 41(5): 399 <https://doi.org/10.14012/j.cnki.fjsc.2019.05.006>

我国淡水池塘养殖投入产出分析与发展对策

Input-output analysis and development strategies of freshwater pond aquaculture in China

渔业现代化. 2016, 43(2): 82 <https://doi.org/10.3969/j.issn.1007-9580.2016.02.015>

基于Ecopath模型的大亚湾黑鲷生态容量评估

Assessment of ecological carrying capacity of *Sparus macrocephalus* in Daya Bay based on an ecopath model

中国水产科学. 2019, 26(1): 1 <https://doi.org/10.3724/SP.J.1118.2019.18328>

基于生态模型估算胶州湾菲律宾蛤仔养殖容量

Carrying Capacity of Manila Clam *Ruditapes philippinarum* in Jiaozhou Bay Estimated by an Ecosystem Model

水产科学. 2015, 34(12): 733 <https://doi.org/10.16378/j.cnki.1003-1111.2015.12.001>

文章编号: 1674-5566(2021)03-0492-09

DOI:10.12024/jsou.20200403014

基于氮磷负荷的淡水池塘河蟹养殖容量估算

兰 艳, 俞锦辰, 刘怡琳, 赵 旭, 储 鸣, 黄 宏

(上海海洋大学 海洋生态与环境学院, 上海 201306)

摘 要: 于 2019 年 5—11 月对 4 个河蟹淡水养殖实验池塘(T1、T2、T3 和 T4)水质及河道补给水源水质进行监测, 基于氮磷负荷及尾水排放标准, 采用 2 种模型对养殖容量和最佳养殖密度进行估算。结果显示: 整个养殖周期内实验蟹塘 TN 均满足地表Ⅲ类水质标准, TP 在养殖前期超标, 末期优于Ⅲ类水质标准; 以磷排放标准估算, T1、T2、T3 和 T4 在 1 个养殖周期内的养殖容量分别为 4 835、3 894、5 035 和 4 546 kg, 养殖密度分别为 12 012、12 249、12 154 和 16 770 只/hm², 4 个池塘均可大量增养; 以氮排放标准估算, T1、T2、T3 和 T4 在 1 个养殖周期内的养殖容量分别为 3 786、2 999、3 948 和 3 401 kg, 养殖密度分别为 9 406、9 432、9 530 和 12 547 只/hm², T1、T2、T3 均可增养 50% 以上, T4 还可增养 19.75%。结合 4 个实验池塘实际养殖状况, 该养殖实验池塘河蟹养殖容量为 2 006 ~ 2 598 kg/hm², 养殖密度为 10 229 ~ 13 296 只/hm² 较为适宜; 相较于磷排放标准, 基于氮排放标准估算的养殖容量偏低, 这可能与养殖池塘补给水源水质氮含量超标有关。

关键词: 河蟹; 淡水池塘; 养殖容量; 水环境; 环境容纳量

中图分类号: S 966.1 **文献标志码:** A

河蟹, 学名中华绒螯蟹(*Eriocheir sinensis*), 我国河蟹养殖经历了 30 多年的发展, 已经成为重要的水产养殖产业, 2017 年全国成蟹产量 80 余万 t, 产值 400 多亿元^[1]。河蟹的养殖方式主要有湖泊(围网)养殖和池塘养殖, 目前主要以池塘种草养蟹为主。池塘作为半封闭养殖体系, 其水动力交换弱, 限制了污染物的扩散, 当养殖量超过一定程度, 其产生的环境负荷超过养殖系统处理能力时, 未食用的饲料和代谢废物产生的高营养负荷会引起水污染风险, 一定量的营养负荷对水生环境营养食物网有利, 故存在一个不会破坏环境的生产水平^[2], 这一生产水平近似于该养殖系统的养殖容量, 因此开展养殖容量研究, 将养殖品种的养殖密度控制在最佳或适宜范围内, 可有效改善区域性养殖水体的水质污染。

就养殖容量而言, 不同学者对其做了不同的定义。CARVER 等^[3]曾经以贝类作为养殖对象, 将养殖容量定义为对贝类生长速度不产生负面影响并获得最大产量时的放养密度。李德尚^[4]

则把养殖容量定义为水库网箱养殖鲢(*Silurus asotus*)时不破坏相应水质标准的最大负荷量。董双林等^[5]也曾对养殖容量做出定义, 即单位养殖水体在节约资源、保护环境以及保证应有效益等方面都满足可持续发展要求的最大养殖量。环境影响评价学认为养殖容量就是在综合考虑自然、环境及社会等因素的前提下, 在相应养殖水域环境容量限制下, 在现有生产技术水平条件下, 所能获得的最大养殖产量^[6]。在过去二三十年间, 养殖容量的估算方法得到不断的改进和提升^[7], 从基于养殖历史的经验法到现在的瞬时生长率法、能量收支法、营养动力学法和生态系统动力学法, 从一维、二维的数值模型到引入水动力计算的动态平衡模型。但关于养殖容量的研究主要集中在海水养殖和其他品种养殖^[2,8-9], 关于淡水池塘河蟹的养殖容量研究鲜有报道^[10-12]。本文从环境影响评价学的角度出发, 确定水产养殖活动对环境产生超出其承受能力的负面影响, 这对于实现河蟹池塘生态养殖的可持续发展至

收稿日期: 2020-04-25 修回日期: 2020-08-24

基金项目: 上海市科技兴农计划(沪农科字[2018]第 4-16 号); 国家重点研发计划(2018YFD0900704)

作者简介: 兰 艳(1995—), 女, 硕士研究生, 研究方向为养殖环境污染与控制。E-mail: 2601810895@qq.com

通信作者: 黄 宏, E-mail: hhuang@shou.edu.cn

关重要。

选择上海某水产养殖专业合作社河蟹养殖池塘为研究对象,通过对整个养殖周期河蟹池塘及河道补给水源的水质进行现场调查及监测,分析水体中氮、磷营养盐形态及含量,分别基于氮、磷水质标准,并结合两种模型初步估算蟹塘的养殖容量。研究结果可为河蟹养殖生产提供科学指导,也为该地区可持续水产养殖规划、决策和综合管理提供依据。

1 材料与方法

1.1 河蟹养殖概况

选取上海某水产养殖专业合作社 4 个池塘作为实验塘,编号分别为 T1、T2、T3 和 T4,面积为 1.50 ~ 1.94 hm² 不等,池塘南北走向、东西并排,均引自外河道补给水源,记为 WS。河蟹养殖池塘中种植苦草和伊乐藻 2 种水草,水草覆盖度约为 60%,其中苦草占 1/3、伊乐藻占 2/3。3 月初将蟹苗投入塘中,T1、T2、T3 和 T4 投苗量分别为 15 690、12 375、16 240 和 26 344 只,平均体质量为 16.53 g,实验所用的蟹苗均是自产的,11 月份收获河蟹,养殖期间水位保持 1.3 m。河蟹不同生长阶段饲料的投喂量不同,8 月前只投喂配合饲料,初期投饵量为体质量的 1%,随着河蟹生长逐步提高到 3%;8 月底到 11 月中旬,额外增加了煮熟的玉米和冰鲜杂鱼,投饵量为河蟹体质量的 5%。投喂时间为每天 17:00 左右,整个养殖阶段不向水体中施用任何药品和肥料。

1.2 样品采集与分析

由于养殖实验池塘(T1 ~ T4)形状均比较规则(长方形),池塘底部较为平坦,水质相对均一,依照《地表水和污水监测技术规范》(HJ/T 91—2002),4 个实验池塘采样站位分别设置在中心水面比较开阔及邻近池塘岸边有明显水流的地方,河道补给水源采样站位设置在取水口。分别于 2019 年 5 月、8 月、9 月和 11 月中旬各采集 1 次水样,每次采样时间为上午 9:00 ~ 11:00。使用 2.5 L 采水器在水面下 0.5 m 处采集水样,并对水样进行固定,置于放有冰袋的保温箱避光保存,采样结束后,立即带回实验室对样品进行处理分析,测定的水质指标包括总氮(TN)、氨氮(NH₄⁺-N)、总磷(TP)、高锰酸钾(COD_{Mn})、叶绿素和悬浮物等^[7]。温度、pH、溶解氧(DO)用

YSI550A(型号)在现场测定,透明度(SD)用透明度盘测定。11 月同时采集河蟹、颗粒饲料、冰鲜小杂鱼和玉米,参照食品中蛋白质的测定方法(GB 5009.5—2016)、食品中磷的测定方法(GB 5009.87—2016)、饲料中粗蛋白测定方法(GB/T 6432—1994)和饲料中总磷的测定方法(GB/T 6437—2018)测定其氮磷含量。

1.3 养殖容量估算方法与数据统计

1.3.1 基于磷负荷的养殖容量估算

Dillon-Rigler 模型研究者通过对 68 个美国水库、32 个非洲水库以及 18 个加拿大湖泊进行了调查和验证,使得该模型被广泛应用,如:孔立兵等^[13]依据该模型估算了广西合浦水库的磷承载力为 43 785 kg;谢巧雄等^[14]用此模型估算了不同网箱养殖规模下的养殖容量;简生龙等^[15]则估算了 6 个高原鲢鳙鱼养殖水库的养殖容量;刘梅等^[16]估算了 6 种常见养殖生物的养殖容量。该模型对我国不同养殖水域和养殖方式均适用,本研究也选用 Dillon-Rigler 模型估算养殖容量。

以 4 个蟹塘磷质量浓度为参考,评估各池塘中河蟹的养殖容量。计算公式为

$$Q = P_{\text{mac}} / P_{\text{food}} \quad (1)$$

有研究^[17]表明上海市淡水养殖池塘多零散分布于郊区,农田氮、磷的流失对引水水体中氮、磷含量的变化特征影响显著,即通过换水带入池塘的磷也不容忽视,故对此模型进行初步改进,公式为

$$Q = P_{\text{mac}} / (P_{\text{food}} + P_{\text{inlet}}) \quad (2)$$

式中:Q 为理想的和允许的养殖容量,t/a;P_{mac} 为可接受的最大磷负荷,kg/a;P_{food} 为水产养殖散失到水体中的磷负荷,kg/t;P_{inlet} 为引水带入养殖水体的磷负荷,kg/t。

$$P_{\text{mac}} = (P_{\text{max}} - P_0) \times H \times A \times r \times [1 / (1 - R)] \quad (3)$$

式中:P_{max} 为水体允许的最高磷质量浓度,mg/L;P₀ 为水体磷的本底质量浓度,mg/L;H 为水深,m;A 为有效养殖面积,hm²;r 为年换水频率;R 为磷滞留系数。

1.3.2 基于氮负荷的养殖容量估算

罗国芝等^[18]认为水环境容量、自然容纳量、市场需求容量共同决定养殖容量(P_{capacity}),提出了如下计算模型:

$$P_{\text{capacity}} = \min(E_{\text{wp}}, E_{\text{np}}, D_{\text{p}}) \quad (4)$$

式中: E_{wp} 为基于水环境容量的养殖容量; E_{np} 为自然容纳量; D_p 为需求容量。

养殖池塘是为满足养殖需求人为而成的,且蟹苗均为人工投放,故 $E_{np} \approx 0$;目前我国对河蟹的市场需求旺盛, D_p 较大,不能以此来评估养殖容量,因此本文以 E_{wp} 为参考,基于氮排放标准评估养殖容量,计算模型^[19]为

$$N_{out} = N_{in} - N_{store} \quad (5)$$

$$N_{out} = M_{feed} \times N_{feed} - (W_f \times N_{crabf} - W_i \times N_{crabi}) \quad (6)$$

$$M_{feed} = W_G \times F \quad (7)$$

$$N_{crabf} \approx N_{crabi} \quad (8)$$

$$N_{out} = W_G \times F \times N_{feed} - N_{crab} \times (W_f - W_i) \quad (9)$$

$$N_{out} = W_G \times F \times N_{feed} - N_{crab} \times W_G \quad (10)$$

$$N_{out} = W_G \times (F \times N_{feed} - N_{crab}) \quad (11)$$

$$W_G = N_{out} / (F \times N_{feed} - N_{crab}) \quad (12)$$

$$N_{out} = S \times V \times n \quad (13)$$

$$W_G = (S \times V \times n) / (F \times N_{feed} - N_{crab}) \quad (14)$$

$$E_{wp} = W_G / W_{Gp} \quad (15)$$

式中: N_{in} 为进入池塘的氮,kg; N_{store} 为储存在河蟹体内的氮,kg; N_{out} 为排放到环境中的氮,kg; M_{feed} 为饵料投喂量,kg; N_{feed} 为饵料氮含量,%; W_f 为成蟹平均体质量,g; W_i 为幼蟹平均体质量,g; N_{crabf} 为成蟹氮含量,%; N_{crabi} 为幼蟹氮含量,%; W_G 为河蟹总增加体质量,g; F 为饵料系数; S 为养殖水体中氮允许排放标准,mg/L; V 为养殖水体积, m^3 ; n 为换水次数; W_{Gp} 为单只增加体质量。

1.4 数据统计

实验数据分析处理采用 Excel 2019,用 Origin 2017 进行图形绘制。

2 结果与分析

2.1 水质状况

参照《国家地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)的Ⅲ类水标准对水质进行单因子评价。由表1可知:pH和DO极个别站点略微超过Ⅲ类水标准;实验蟹塘的 COD_{Mn} 整个养殖周期都大幅超过Ⅲ类水质标准,说明养殖活动带入大量有机物;TP前3个养殖阶段均超标,但养殖末期优于Ⅲ类水标准;另外河道补给水源TN整个养殖周期内都未达到Ⅲ类水质标准,5月TN含量

超标最为严重。

水生植物组织中的氮磷质量比一般为7:1^[20]。在通常情况下,氮是海水中藻类生长的限制因子,而淡水中藻类生长的限制因子则是磷^[21]。由整个养殖周期的监测结果可知,4个实验池塘的TN质量浓度平均值为2.287 mg/L,TP质量浓度平均值为0.237 mg/L,氮磷比为9.67,大于7,由此水体中的磷元素可能成为养殖池塘富营养化的限制因子。BEVERIDGE^[22]的研究结果和Dillon-Rigler模型^[23]也得出水域生产量最重要的限制因素和监测因子是磷。

2.2 基于磷负荷的养殖容量估算

用上述公式进行养殖容量评估涉及的参数有:水产养殖散失到水体中的磷负荷(P_{food}),即河蟹池塘淡水养殖产污系数,根据《第一次全国污染源普查水产养殖业污染源产排污系数手册》取0.472 kg/t;该养殖合作社河蟹养殖池塘紧邻该市二级水源地保护区域,故以《地表水环境质量标准》Ⅲ类水标准作为水体允许的最高磷排放质量浓度(P_{max});池塘水体磷的本底质量浓度(P_0 , mg/L),取养殖周期内引水水源4次监测的TP平均质量浓度;年换水频率(r),在监测的养殖周期内共换水7次,故 r 取7^[10];磷的滞留系数(R),在通常情况下认为与底泥长期结合的磷占比为45%~55%,故 R 值取50%^[15-16]。见表2。

由养殖容量模型计算得出蟹塘的养殖情况如表3所示。在保证河蟹养殖池塘中水体磷质量浓度不超过Ⅲ类水标准前提下,T1、T2、T3和T4在1个养殖周期内可接受由养殖活动产生的磷负荷分别为2 277、1 830、2 359和2 131 kg,将其换算为对应的养殖容量分别可养殖4 835、3 894、5 035和4 546 kg河蟹,而实际产量仅为养殖容量的50.07%~62.47%,4个池塘增养比例分别为94.96%、99.69%、97.45%和60.07%,除了T4需适当增养外,其余3个池塘均可大量增养,这里的增养比例是理想情况,但实际上养殖活动不仅带入了磷,还包括氮和有机物等,这些都会导致水质变差,从而引起河蟹生病甚至死亡,因此具体的增养比例还需结合实际而定。

表 1 实验蟹塘水质监测数据

Tab. 1 Water quality monitoring data of ponds

时间 Time	站点 Site	pH	溶解氧 DO/(mg/L)	叶绿素 a Chl. a/(mg/L)	高锰酸钾指数 COD _{Mn} /(mg/L)	总氮 TN/(mg/L)	氨氮 NH ₄ ⁺ -N/(mg/L)	总磷 TP/(mg/L)
5 月 May	T1	6.15 *	5.85	2.979 ± 0.100	8.892 ± 0.085 *	3.728 ± 0.024 *	0.566 ± 0.002	0.382 ± 0.004 *
	T2	6.22 *	5.35	4.424 ± 1.950	10.469 ± 0.084 *	8.353 ± 0.020 *	2.197 ± 0.024 *	0.383 ± 0.003 *
	T3	6.30 *	4.19 *	4.468 ± 0.990	10.367 ± 0.124 *	5.793 ± 0.039 *	0.981 ± 0.006	0.236 ± 0.004 *
	T4	6.33 *	4.20 *	8.992 ± 2.450	8.418 ± 0.131 *	5.839 ± 0.019 *	0.535 ± 0.001	0.310 ± 0.003 *
	WS	6.40 *	3.56 *	4.077 ± 0.580	2.370 ± 0.078	5.704 ± 0.052 *	0.534 ± 0.003	0.147 ± 0.002
8 月 August	T1	7.18	4.30 *	24.532 ± 1.040	8.065 ± 0.173 *	0.886 ± 0.010	0.110 ± 0.016	0.226 ± 0.003 *
	T2	7.28	4.45 *	25.228 ± 2.480	8.441 ± 0.074 *	0.568 ± 0.008	0.099 ± 0.016	0.260 ± 0.000 *
	T3	7.39	4.75 *	18.248 ± 0.920	8.510 ± 0.057 *	0.989 ± 0.012	0.080 ± 0.019	0.446 ± 0.002 *
	T4	7.38	3.60 *	7.737 ± 3.510	8.129 ± 0.169 *	0.503 ± 0.018	0.101 ± 0.013	0.147 ± 0.001
	WS	7.14	4.56 *	10.693 ± 1.060	5.025 ± 0.063	2.324 ± 0.019 *	0.120 ± 0.008	0.210 ± 0.004 *
9 月 September	T1	6.69	7.16	83.838 ± 5.310	8.341 ± 0.148 *	1.403 ± 0.016 *	0.118 ± 0.001	0.207 ± 0.002 *
	T2	7.03	8.31	64.015 ± 12.900	9.463 ± 0.501 *	0.604 ± 0.020	0.209 ± 0.001	0.228 ± 0.004 *
	T3	6.86	5.54	13.238 ± 0.270	8.630 ± 0.021 *	0.682 ± 0.015	0.099 ± 0.004	0.302 ± 0.007 *
	T4	6.84	6.41	25.797 ± 4.100	8.563 ± 0.093 *	1.124 ± 0.008 *	0.305 ± 0.004	0.150 ± 0.007
	WS	6.78	6.08	11.646 ± 1.200	3.612 ± 0.163	1.492 ± 0.019 *	0.115 ± 0.001	0.086 ± 0.004
11 月 November	T1	7.94	6.78	103.835 ± 2.410	7.574 ± 0.099 *	1.872 ± 0.009 *	0.172 ± 0.005	0.168 ± 0.000
	T2	8.20	8.20	105.168 ± 5.700	8.425 ± 0.094 *	1.622 ± 0.009 *	0.062 ± 0.006	0.128 ± 0.002
	T3	7.59	4.10 *	31.687 ± 3.610	8.261 ± 0.050 *	1.593 ± 0.007 *	0.053 ± 0.003	0.106 ± 0.005
	T4	7.87	7.02	6.314 ± 2.220	8.869 ± 0.123 *	1.031 ± 0.013 *	0.501 ± 0.003	0.106 ± 0.002
	WS	8.20	7.94	4.819 ± 1.190	3.430 ± 0.078	1.641 ± 0.001 *	0.069 ± 0.008	0.091 ± 0.004
标准 Standard		6.5 ~ 8.5	5.00	-	6	1.0	1.0	0.2

注：“*”表示超过地表水Ⅲ类水质标准限值。

Notes: “*” indicate that the value exceeds the limit of surface water quality Ⅲ standards.

表 2 养殖容量评估参数取值

Tab. 2 Value of aquaculture capacity evaluation parameters

塘号 Pond	面积 Area/ hm ²	磷本底浓度 Background mass concentration of phosphorus/(mg/L)	水深 Depth of water/m	年换水频率 r/次	磷滞留系数 Phosphorus retention coefficient/%	允许磷排放质量浓度 Emission mass concentration of phosphorus/(mg/L)	产污系数 Pollutant production coefficient/(kg/t)
T1	1.867	0.133	1.3	7	50	0.2	0.472
T2	1.500	0.133	1.3	7	50	0.2	0.472
T3	1.933	0.133	1.3	7	50	0.2	0.472
T4	1.747	0.133	1.3	7	50	0.2	0.472

表 3 基于磷排放的池塘生态养殖容量估算

Tab. 3 Assessment of carrying capacity of pond based on the load of phosphorus

塘号 Pond	参数 Parameter							
	实际产量 Actual yield/ kg	实际养殖密度 Actual density/ (只/hm ²)	成蟹体质量均值 Average body mass of crab/(g/只)	理论养殖容量 Carrying capacity/ kg	理论养殖容量 Carrying capacity/ 只	理论养殖密度 Theoretical density/ (只/hm ²)	容量差值 Difference value/ kg	增养比例 Increase ration/ %
T1	2 480	560	215.65	4 835	22 422	12 012	2 355	94.96
T2	1 950	550	211.96	3 894	18 373	12 249	1 944	99.69
T3	2 550	560	214.29	5 035	23 498	12 154	2 485	97.45
T4	2 840	1 005	155.19	4 546	29 292	16 770	1 706	60.07

2.3 基于氮排放标准的养殖容量估算

N_{feed} 为 3 种饵料的氮平均含量,由表 4 中各饵料氮含量及其所占比例计算得 N_{feed} 为 7.25% ;

N_{crab} 为 8.78% ; FCR 取实验池塘平均值 2.23, n 为 7。由于《淡水池塘养殖水排放要求》(SC/T 9101—2007)中规定总氮排放标准为 3.0 mg/L ,

不适合用于二级水源地保护区域,故参考《浙江省水产养殖废水排放要求》(DB 33/453—2006)中排入淡水水域的一级标准,S 取 1.5 mg/L,其余取值根据各池塘实际情况。

基于氮排放标准的养殖容量估算结果如表 5 所示,T1、T2、T3 和 T4 在 1 个养殖周期内的养殖

容量分别为 17 558、14 148、18 424 和 21 915 只,结合成蟹平均体质量,将其换算成用质量表示分别为 3 786、2 999、3 948 和 3 401 kg,T1、T2 和 T3 养殖比例均为 65%左右,可适量增养,而 T4 的养殖比例高达 83.50%,只能进行少量增养。

表 4 饵料氮、磷含量及其不同阶段投喂量

Tab. 4 Contents of N and P in feeds and feed volume of different stages

饲料 Feed	N/%	P/%	干物质 Dry matter/%	总投喂量 Total feed/kg			
				5 月 May	8 月 August	9 月 September	11 月 November
玉米 Corn	1.09	0.13	45.79	-	155	1 620	3 091
冰鲜杂鱼 Trash fish	11.01	0.65	23.23	-	630	6 510	7 875
配合饲料 Commercial feed	6.40	0.42	95.38	4 914	12 953	4 051	8 925

表 5 基于氮排放的池塘生态养殖容量估算

Tab. 5 Assessment of carrying capacity of pond based on the load of nitrogen

参数 Parameter	塘号 Pond			
	T1	T2	T3	T4
氮允许排放量 Nitrogen emission standard/(mg/L)	1.5	1.5	1.5	1.5
养殖水体积 Volume of water/m ³	24 267	19 500	25 133	22 706
换水次数 Times of water changes/次	7	7	7	7
饵料氮含量 Nitrogen content of feed/%	7.25	7.25	7.25	7.25
河蟹氮含量 Nitrogen content of crab/%	8.78	8.78	8.78	8.78
饵料系数 Feed conversion ratio	2.23	2.23	2.23	2.23
河蟹初体质量均值 Average initial body mass of crab/g	19.88	16.73	21.06	8.43
河蟹末体质量均值 Average final body mass of crab/g	215.65	211.96	214.29	155.19
单只增加体质量 Body mass gain of each crab/g	195.77	195.23	193.23	146.76
理论养殖容量 Carrying capacity/只	17 558	14 148	18 424	21 915
理论养殖容量 Carrying capacity/kg	3 786	2 999	3 948	3 401
理论养殖密度 Theoretical density/(只/hm ²)	9 406	9 432	9 530	12 547
实际养殖量 Actual production/kg	2 480	1 950	2 550	2 840
养殖容量与实际养殖量差值 Difference value/kg	1 306	1 049	1 398	561
增养比例 Increase ratio/%	52.68	53.78	54.83	19.75

3 讨论

3.1 河蟹养殖池塘的最佳养殖容量

根据河蟹养殖情况及水质理化性质,分别以氮磷质量浓度为限制指标,初步构建 2 种养殖容量模型。结果显示:以地表水Ⅲ类水标准作为 TP 排放要求时,T1、T2、T3 和 T4 的养殖容量为 3 894~5 035 kg,实际养殖量仅为养殖容量的 50%~60%,还有较大的增养空间;按照氮的排放要求,养殖容量为 2 999~3 948 kg,T1、T2 和 T3 养殖比例约为 65%,还可适当增养,增养比例为 50%左右,但 T4 的实际养殖量为理论养殖容量的 83.50%,只能少量增养。导致 T4 与其他 3 个池塘差异较大的原因除了其本身养殖密度较

高外,T4 为雌蟹单养,而雌蟹单养的成活率比雌雄混养高 7%~10%^[24];不难发现,以磷为标准估算的养殖容量远大于以氮为标准的估算结果,这可能是由于引水水质氮严重超标所致,由 4 次水质监测结果可知,河道补给水源 TN 超标幅度高达 49.20%~470.44%,而 TP 仅于 8 月小幅超标,故水体还可承载大量磷负荷。

在水产养殖过程中,若养殖密度过低,则会降低生物的摄食活跃度,而过高的养殖密度会造成严重的饵料浪费^[19],从而使饵料系数升高。丁娜^[10]也曾提出磷是阳澄西湖水域的限制因子,并利用 Dillon-Rigler 模型估算该水域河蟹养殖容量为 137 t,实际放养量仅为合理放养量的 21%;金刚等^[11],则以对沉水植物生长不构成显著影响

为标准,估算了草型湖泊中河蟹的最大产量密度是 29.25 kg/hm²;祖国掌等^[25]提出当河蟹的放养密度不超过 30 只/hm²时,沉水植物就不会被破坏;毛振方^[26]综合考虑养殖密度对河蟹的生长性能、营养组成以及养殖水体水质的影响,建议适宜养殖密度应在 18 000 只/hm²左右。依据本研究结果,推荐河蟹养殖容量为 2 006 ~ 2 598 kg/hm² (10 229 ~ 13 296 只/hm²),即以氮排放标准估算的平均值到以磷排放标准估算的平均值。

3.2 养殖容量的合理性评估

不同学者对养殖容量有不同的定义,不同规格的河蟹的养殖容量也不尽相同,目前研究较多的是成蟹的养殖容量,因为这是一个养殖体系在不破坏其结构和功能时的最高产量^[11],依据最高产量,参照成活率来确定幼蟹的放养量。值得关注的是,养殖环境具有变动性,故养殖容量并非是一个常数,而是会随环境变化而改变,并且养殖技术与养殖方式的改进也会影响养殖容量^[16]。此外,环境容量评价的限制性指标应该包括生物指标,如浮游植物含量^[27]、底栖生物含量和底栖敏感生境^[28-29]、化学指标^[30]、底泥硫化物含量^[31]和有机碳含量^[32]等。由于化学指标比生物指标更容易量化,根据含量限值标准可以更直接地进行评价和估算,因此营养盐含量等水质化学指标在养殖环境影响评价中得到广泛应用^[8,33]。另外,进一步研究发现,养殖后期底泥中氮的沉积量仅为养殖初期的 10% 左右,养殖后期底泥中磷的沉积量却低于养殖初期,故本研究采用了水质化学指标进行养殖容量估算。实际上,在养殖生产活动中,大量的增养除了对池塘中氮磷的含量产生影响,同时也影响着 DO、BOD₅、COD_{Mn} 等有机指标,这些都会导致养殖环境严重恶化,引起河蟹生病甚至死亡。本研究仅考虑单一环境指标,估算的养殖容量存在一定的不确定性,故在实际养殖生产中应小于计算的理论值或依具体情况而定。除此之外,要全面衡量一个河蟹养殖体系的养殖容量,须兼顾河蟹、水质、饵料以及水草四者之间的数量关系^[11]。仅考虑水质理化性质,以氮、磷质量浓度为限制指标构建了养殖容量模型,考虑因素较为单一,今后研究中有必要多因素综合考虑,构建较完善的模型,做到经济效益、社会效益、环境生态效益的有机统一,从而实现河蟹生态养殖的可持续发展。

3.3 有效提高养殖容量的方法与途径

由 Dillon-Rigler 模型可知,养殖容量与水深、有效养殖面积、磷滞留系数和换水频率成正相关,但与引水中磷质量浓度呈负相关,其中养殖容量对磷滞留系数和换水频率比较敏感^[16]。这是因为水体滞留能力越强,其自净能力也越强,进而提高环境容量^[33]。丁惠明等^[34]提出换水的主要目的是防止缺氧和改善水质,池塘养殖容量会随着换水频率增加而增加,同时引水水质也直接影响着池塘水环境状况,从而影响池塘的水体承载力。从氮评估模型中可知,除了上述影响因素外,较高的饵料系数和饵料氮含量会降低养殖容量,有研究报道^[9]人工颗粒饲料的饵料系数约为 1.1 ~ 1.5,而冰鲜杂鱼的饵料系数通常大于 5,甚至高达 10。因此,提高养殖容量的方法有:一方面可以通过大量种植水生植物^[35]、投加微生物抑制剂和矿物材料^[36-37],通过增强池塘对磷的滞留能力来提高水体的养殖容量;另一方面需改善引水水质,例如对养殖尾水进行处理后再排放,尤其是上游地区,同时控制好农业面源污染以及生活污水的杂乱排放^[38],采取河道原位生态修复技术^[35];此外,用人工饲料代替冰鲜小杂鱼或研发新的饲料配方,通过采用高效饲养技术,将冰鲜小杂鱼加工成颗粒状,提高食物转化率,减少污染物排放,实现水产养殖业的健康发展。

参考文献:

- [1] CAI C F, GU X H, HUANG H Z, et al. Water quality, nutrient budget, and pollutant loads in Chinese mitten crab (*Eriocheir sinensis*) farms around East Taihu Lake [J]. Chinese Journal of Oceanology and Limnology, 2012, 30 (1): 29-36.
- [2] DAVID G S, CARVALHO E D, LEMOS D, et al. Ecological carrying capacity for intensive tilapia (*Oreochromis niloticus*) cage aquaculture in a large hydroelectrical reservoir in southeastern Brazil [J]. Aquacultural Engineering, 2015, 66: 30-40.
- [3] CARVER C E A, MALLETT A L. Estimating the carrying capacity of a coastal inlet for mussel culture [J]. Aquaculture, 1990, 88(1): 39-53.
- [4] 李德尚. 水库对投饵网箱养鱼负荷力的研究方法[J]. 水利渔业, 1992(3): 3-5.
LI D S. Research method of reservoir's load on feeding meat net [J]. Journal of Hydroecology, 1992(3): 3-5.
- [5] 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.

- QI Z X, LI D S, ZHANG M P, et al. Experimental studies on nitrogen and phosphorus budgets of shrimp culture pond [J]. *Journal of Fisheries of China*, 1998, 22(2): 124-128.
- [6] 刘双凤, 蔡勋, 于庆华. 关于养殖水域养殖容量的研究 [J]. *黑龙江水产*, 2013(6): 2-5.
- LIU S F, CAI X, YU Q H. Study on the capacity of aquaculture in aquaculture waters [J]. *Fisheries of Heilongjiang*, 2013(6): 2-5.
- [7] 刘慧, 蔡碧莹. 水产养殖容量研究进展及应用 [J]. *渔业科学进展*, 2018, 39(3): 158-166.
- LIU H, CAI B Y. Advance in research and application on aquaculture carrying capacity [J]. *Progress in Fishery Sciences*, 2018, 39(3): 158-166.
- [8] ZHAO Y X, ZHANG J H, LIU Y, et al. Numerical assessment of the environmental impacts of deep sea cage culture in the Yellow Sea, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 706: 135752.
- [9] ZHAO Y X, ZHANG J H, WU W G. Assessing environmental carrying capacity of sea cage culture in the Yellow Sea, China, using a coupled diffusion model [J]. *Aquaculture*, 2020, 520: 735009.
- [10] 丁娜. 阳澄西湖水环境及其养殖容量的研究 [D]. 南京: 南京农业大学, 2015.
- DING N. Research of water environment and carrying capacity in the West Yangcheng Lake [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2015.
- [11] 金刚, 李钟杰, 谢平. 草型湖泊河蟹养殖容量初探 [J]. *水生生物学报*, 2003, 27(4): 345-351.
- JIN G, LI Z J, XIE P. Studies on the carrying capacity of Chinese mitten crab in Macrophytic Lakes [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2003, 27(4): 345-351.
- [12] 国家环保局编委会. 水和废水检测分析方法 [M]. 4版. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- State Environmental Protection Administration. Methods for monitoring and analysis of water and wastewater [M]. 4th ed. Beijing: China Environmental Science Press, 2002.
- [13] 孔力兵, 肖俊军, 雷建军, 等. 广西合浦水库网箱养殖容量研究 [J]. *南方农业学报*, 2012, 43(3): 393-396.
- KONG L B, XIAO J J, LEI J J, et al. Cage-culture capacity of Hepu reservoir (Guangxi) [J]. *Journal of Southern Agriculture*, 2012, 43(3): 393-396.
- [14] 谢巧雄, 姚俊杰, 周路, 等. 龙滩水库八达村库湾水质变化及网箱养鱼容纳量 [J]. *贵州农业科学*, 2014, 42(1): 159-162.
- XIE Q X, YAO J J, ZHOU L, et al. Effect of water quality change on carrying capacity in net cage aquaculture along Bada village bay of Longtan reservoir in Guizhou [J]. *Guizhou Agricultural Sciences*, 2014, 42(1): 159-162.
- [15] 简生龙, 关弘毅, 李柯懋, 等. 青海黄河龙羊峡-积石峡段水库鲢鳙鱼网箱养殖容量估算 [J]. *河北渔业*, 2019(6): 22-27.
- JIAN S L, GUAN H T, LI K M, et al. The aquaculture capacity to cage culture of trout in reservoirs from Gorge Longyangxia to Gorge Jishixia in Qinghai Reach [J]. *Hebei Fisheries*, 2019(6): 22-27.
- [16] 刘梅, 原居林, 倪蒙, 等. 基于环境容纳量的区域性养殖容量评估 [J]. *水生生态学杂志*, 2019, 40(2): 27-34.
- LIU M, YUAN J L, NI M, et al. Carrying capacity of regional aquaculture based on environmental capacity [J]. *Journal of Hydroecology*, 2019, 40(2): 27-34.
- [17] 孙振中, 刘金金, 张玉平. 上海市淡水养殖水体中氮、磷的分布研究 [J]. *水产科学*, 2018, 37(4): 512-521.
- SUN Z Z, LIU J J, ZHANG Y P. Distribution of nitrogen and phosphorus in waters of freshwater aquaculture in Shanghai [J]. *Fisheries Science*, 2018, 37(4): 512-521.
- [18] 罗国芝, 陆雍森. 湖泊围栏养殖容量估算 [J]. *环境污染与防治*, 2007, 29(12): 949-952, 957.
- LUO G Z, LU Y S. Modeling and assessment of aquacultural capacity of a lake [J]. *Environmental Pollution & Control*, 2007, 29(12): 949-952, 957.
- [19] 李宝山, 陈玮, 王际英, 等. 基于珍珠龙胆石斑鱼池塘网箱养殖的生态养殖容量估算 [J]. *烟台大学学报(自然科学与工 程版)*, 2019, 32(1): 54-60.
- LI B S, CHEN W, WANG J Y, et al. Assessment of carrying capacity of hybrid grouper *Epinephelus Fuscoguttatus* (♀) × *E. lanceolatu* (♂) in pond based on cage culture [J]. *Journal of Yantai University (Natural Science and Engineering Edition)*, 2019, 32(1): 54-60.
- [20] 边蔚, 胡晓波, 田在锋, 等. 白洋淀水产养殖容量研究 [J]. *河北大学学报(自然科学版)*, 2011, 31(1): 79-84, 112.
- BIAN W, HU X B, TIAN Z F, et al. Research on aquacultural capacity of Baiyangdian Lake [J]. *Journal of Hebei University (Natural Science Edition)*, 2011, 31(1): 79-84, 112.
- [21] LEWIS JR W M, WURTSBAUGH W A, PAERL H W. Rationale for control of anthropogenic nitrogen and phosphorus to reduce eutrophication of inland waters [J]. *Environmental Science & Technology*, 2011, 45(24): 10300-10305.
- [22] BEVERIDGE M C M. Cage and pen fish farming: carrying capacity models and environmental impact [R]. FAO Fisheries Technical Paper FIRL/T255, Diliman, Quezon City: FAO, 1985.
- [23] DILLON P J, RIGLER F H. A test of a simple nutrient budget model predicting the phosphorus concentration in Lake Water [J]. *Journal of the Fisheries Research Board of Canada*, 1974, 31(11): 1771-1778.
- [24] 陈德贵, 夏咸水, 邢朝峰. 河蟹雌雄分养技术试验 [J]. *科学养鱼*, 2018(4): 33-34.
- CHEN D G, XIA X S, XING C F. Experiment on the technique of male and female rearing of river crab [J]. *Scientific Fish Farming*, 2018(4): 33-34.
- [25] 祖国掌, 管远亮, 侯冠军, 等. 围栏养蟹利用与女山湖沉

- 水植物资源保护[J]. 湖泊科学, 1999, 11(1): 91-96.
- ZU G Z, GUAN Y L, HOU G J, et al. Utilization and protection of the submerged plant resources by pen-crab culturing in Nushan Lake [J]. Journal of Lake Sciences, 1999, 11(1): 91-96.
- [26] 毛振方. 池塘养殖密度对中华绒螯蟹(*Eriocheir sinensis*)生长性能和养殖水环境的影响[D]. 南昌: 南昌大学, 2019.
- MAO Z F. Effects of pond culture density on growth performance of *Eriocheir sinensis* and aquaculture water environment[D]. Nanchang: Nanchang University, 2019.
- [27] GE C Z, FANG J G, SONG X F, et al. Response of phytoplankton to multispecies mariculture: a case study on the carrying capacity of shellfish in the Sanggou Bay in China [J]. Acta Oceanologica Sinica, 2008, 27(1): 102-112.
- [28] CROMEY C J, NICKELL T D, BLACK K D. Depomodelling the deposition and biological effects of waste solids from marine cage farms[J]. Aquaculture, 2002, 214(1/4): 211-239.
- [29] HEDBERG N, KAUTSKY N, HELLSTRÖM M, et al. Spatial correlation and potential conflicts between sea cage farms and coral reefs in South East Asia[J]. Aquaculture, 2015, 448: 418-426.
- [30] CAI H W, SUN Y L. Management of marine cage aquaculture: environmental carrying capacity method based on dry feed conversion rate [J]. Environmental Science and Pollution Research- International, 2007, 14(7): 463-469.
- [31] 杜琦, 张皓. 三都湾网箱鱼类养殖容量的估算[J]. 福建水产, 2010(4): 1-6.
- DU Q, ZHANG H. Estimation on the cage culture capacity of fishes of Sandu Bay, Chian[J]. Journal of Fujian Fisheries, 2010(4): 1-6.
- [32] ZHAO Y X, ZHANG J H, LIN F, et al. An ecosystem model for estimating shellfish production carrying capacity in bottom culture systems[J]. Ecological Modelling, 2019, 393: 1-11.
- [33] 韩涛, 翟淑华, 胡维平, 等. 太湖氮、磷自净能力的实验与模型模拟[J]. 环境科学, 2013, 34(10): 3862-3871.
- HAO T, ZHAI S H, HU W P, et al. Experiment and model simulation of self-purification capacity of nitrogen and phosphorus in Lake Taihu [J]. Environmental Science, 2013, 34(10): 3862-3871.
- [34] 丁惠明, 沈彩娟, 陈雯, 等. 池塘养殖换水目的和水质状态对换水频率的影响[J]. 生态与农村环境学报, 2019, 35(6): 781-786.
- DING H M, SHEN C J, CHEN W, et al. Preliminary study on the effects of water exchange purpose and water quality status on the frequency of water exchange in pond aquaculture [J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2019, 35(6): 781-786.
- [35] ZHOU Y, YANG H H, HU H Y, et al. Bioremediation potential of the macroalga *Gracilaria lemaneiformis* (Rhodophyta) integrated into fed fish culture in coastal waters of north China[J]. Aquaculture, 2006, 252(2/4): 264-276.
- [36] WU Q, HU Y, LI S Q, et al. Microbial mechanisms of using enhanced ecological floating beds for eutrophic water improvement[J]. Bioresource Technology, 2016, 211: 451-456.
- [37] 冀泽华, 冯冲凌, 吴晓芙, 等. 人工湿地污水处理系统填料及其净化机理研究进展[J]. 生态学杂志, 2016, 35(8): 2234-2243.
- JI Z H, FENG C L, WU X F, et al. Research progress on filler application and purification mechanisms in constructed wetland wastewater treatment system[J]. Chinese Journal of Ecology, 2016, 35(8): 2234-2243.
- [38] 史铁锤, 王飞儿, 方晓波. 基于WASP的湖州市环太湖河网区水质管理模式[J]. 环境科学学报, 2010, 30(3): 631-640.
- SHI T C, WANG F E, FANG X B. Regional management strategy integrated with WASP model on water quality for river-network plain located in Huzhou District, Taihu Lake Basin[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2010, 30(3): 631-640.

Assessment of carrying capacity of crab culture in freshwater pond based on nitrogen and phosphorus load

LAN Yan, YU Jinchen, LIU Yilin, ZHAO Xu, CHU Ming, HUANG Hong

(College of Marine Ecology and Environment, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China)

Abstract: From May to November 2019, the water quality of four freshwater crab culture ponds (T1, T2, T3 and T4) and river supply sources were monitored, and based on nitrogen and phosphorus load and tailwater discharge standard, two models were used to estimate the carrying capacity and the optimal stocking density. The results showed that: During the entire breeding cycle, the TN of the experimental crab ponds within the surface water quality standard of Class III, and the TP exceeded the standard in the early stage of aquaculture, and was better than the Class III water quality standard at the end; according to the phosphorus emission standard, the carrying capacity of T1, T2, T3 and T4 in a culture cycle is 4 835, 3 894, 5 035 and 4 546 kg, respectively, and the stocking density is 12 012, 12 249, 12 154 and 16 770 ind./hm², respectively; according to the nitrogen emission standard, the carrying capacity of T1, T2, T3 and T4 in a culture cycle is 3 786, 2 999, 3 948 and 3 401 kg, respectively, and the stocking density is 9 406, 9 432, 9 530 and 12 547 ind./hm², respectively, T1, T2, T3 can increase by more than 50%, T4 can only increase by 19.75%. Combined with the actual situation, the culture capacity of river crab in the experimental pond was 2 006 – 2 598 kg/hm², and the cultivation density was 10 229 – 13 296 ind./hm²; compared with the phosphorus emission standard, the carrying capacity estimated based on the nitrogen emission standard is lower, which may be related to the excessive nitrogen content in the water supply of the aquaculture pond.

Key words: crab; freshwater pond; carrying capacity; water environment; environmental capacity