

基于环境容纳量的区域性养殖容量评估

刘梅¹, 原居林¹, 倪蒙¹, 何海生², 叶雪平¹, 顾志敏^{1,2}

(1. 农业部淡水渔业健康养殖重点实验室, 浙江省淡水水产遗传育种重点实验室,

浙江省淡水水产研究所, 浙江湖州 313001;

2. 上海海洋大学水产与生命科学学院, 上海 201306)

摘要:针对淡水养殖池塘养殖水体及周边水域水质日趋恶化的现状,为了保证水产养殖业的可持续发展,亟需开展养殖容量相关方面的研究,将主要养殖品种面积和密度控制在最佳的范围内。以浙江南浔区为研究区域,通过调查该区域水环境现状和6种主要养殖模式养殖特点,计算了该区域水体总磷的环境容纳量,再根据单位养殖模式排污量初步评估了该区域主要养殖品种的养殖容量。结果显示:(1)南浔区水环境的磷为限制因子;(2)常规鱼、大口黑鲈(*Micropterus salmoides*)、乌鳢(*Ophiocephalus argus*)、翘嘴鲌(*Culter alburnus*)、中华鳖(*Trionyx sinensis*)和青鱼(*Mylopharyngodon piceus*)单位产磷量分别为0.26、0.70、0.73、0.17、0.33和0.22 g/kg;(3)在Ⅱ类水质前提下,常规鱼、大口黑鲈、乌鳢、翘嘴鲌、中华鳖、青鱼养殖塘可接受的最大磷负荷为7.38、5.79、2.36、1.82、1.51、2.52 t,其对应养殖容量分别为28370、8271、3236、10698、11648、9685 t;(4)养殖容量模型参数敏感性分析表明,磷滞留系数、换水系数和外河磷浓度敏感度系数分别为0.365、0.364和-0.271;区域养殖容量的合理评估可为生态渔业的发展提供科学依据。

关键词:养殖容量;环境容纳量;磷负荷;生态养殖

中图分类号:Q147 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-3075(2019)02-0027-08

我国是世界上唯一养殖产量超过捕捞产量的国家,渔业产量已经连续多年稳居世界第一(唐启升, 2014)。随着养殖业的快速发展,养殖区的环境污染问题也越来越受到关注(李树国, 2005; 鲍旭腾, 2012)。由于片面追求高产,导致养殖水体及周边水体富营养化影响日趋加剧,造成养殖对象免疫力下降、病害频发,经济损失巨大(Kenneth, 1995)。这些问题都严重影响我国水产养殖业健康可持续发展。为了缓解区域性养殖水体水质污染,保证水产养殖业的可持续发展,亟需继续开展养殖容量相关研究,将主要养殖品种面积和密度控制在最佳或适宜的范围内。

养殖容量是指特定的水域、单位水体养殖对象在不危害环境、保持生态系统相对稳定、保证经济效益最大的同时,追求可持续发展要求条件下的最大产量(刘庆余, 1993; 刘剑昭, 2000);是一个包含环

境、生态和社会经济等多种因素的综合概念,其估算涉及养殖环境、养殖方式、养殖技术等许多方面。目前国内外还没有一个比较完善的养殖容量预测模型(方建光, 1996; 周立红, 2007),且大多数都是针对海洋或大水面;国外有学者通过建立数学模型来估算不同海区的养殖容量(Carve et al, 1990);刘庆余(1993)研究了紫贻贝养殖的容纳量;李庆彪(1999)研究了扇贝大量死亡与养殖容量的关系;方建光等(1996)对桑沟湾栉孔扇贝和海带的养殖容量进行了较系统的研究;但对淡水养殖容量的研究应用基本属于空白,仅有极少数应用报道(周立红, 2007);边蔚等(2011)根据白洋淀实际情况分别对基于环境、生态和经济的养殖容量进行了核算;其他研究主要集中在扇贝类的养殖容量(杨红生, 1999; 金刚, 2003; Thomas, 2010),很少涉及经济鱼类。然而养殖容量对于指导科学养殖、减少氮磷等营养物质的排放、实现水产养殖健康化和清洁化、确保水产品质量安全等具有重要的现实意义。

本研究通过计算保持南浔区水域Ⅱ类和Ⅲ类水前提下的环境容纳量,尝试构建浙江南浔区6种主要养殖品种的养殖容量模型,并以此评估出该区域主要养殖品种的生态养殖容量,最后采用蒙特卡罗模拟法分析养殖容量模型参数灵敏度,识别导致变

收稿日期:2017-04-07

基金项目:国家科技支撑计划-滩涂养殖模式优化及其水域环境调控技术与示范(2015BAD13B04)。

作者简介:刘梅,1988年生,女,博士,助理研究员,主要从事养殖水环境研究。E-mail: liumei@zju.edu.cn

通信作者:顾志敏,1959年生,男,研究员,主要从事淡水渔业研究。E-mail: guzhimin2006@163.com

化的环境因素,为决策者提供较为全面的信息,以期为该区域养殖元素的合理分配、促进渔业的健康发展提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 区域概况

南浔区位于浙江省湖州市东北部,地处杭嘉湖平原,境内河流纵横,湖漾密布,河湖塘面积合计93.3 km²,占土地面积的13.29%。全区拥有水产养殖面积5 946.71 hm²,其中池塘、漾荡面积5 855.71 hm²,占已养面积的98.47%,是水产养殖的主体。渔业年产量在9万t左右,其中主要是“四大家鱼”以及大口黑鲈、乌鳢等品种。

为了摸清整个区域不同水域水环境状况,选取了水产养殖区(S₄、S₇、S₁₀、S₁₁)、运河航线区(S₁和S₆)、工业区(S₂、S₈、S₅)以及河漾区域(S₃和S₉)进行监测,监测布点位置见图1。

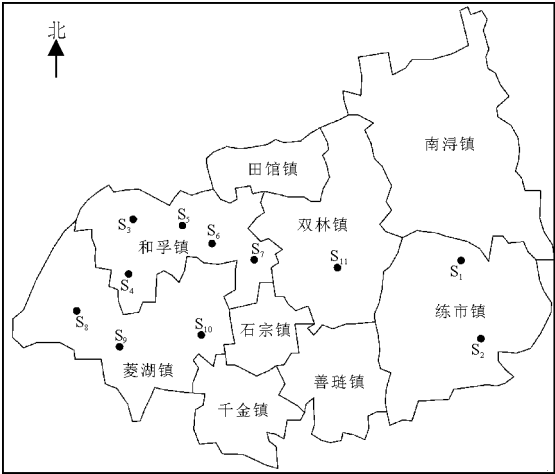


图1 南浔区水质调查采样点

Fig.1 Location of the water quality monitoring sites in the Nanxun area

1.2 水质数据

养殖期间南浔区的水质数据来自采样调查,于2015年5月、8月和11月各采集1次水样,每次采样时间固定(09:00-11:00),水样采集后,按国标方法测定总氮(TN)、总磷(TP)、氨氮(NH₄⁺-N)、化学耗氧量(COD_{Mn})、pH、叶绿素a(Chl-a)以及石油类指标。

1.3 评估方法

Beveridge的研究结果和Dillon-Rigler模型(Dillon,1974)认为磷是限制水域生产量最重要的因素,公式为:

$$Q = P_{mac} / P_{food} \tag{1}$$

考虑到南浔区有外河带入该地区的磷,即由于换水带入养殖塘的磷,故对此模型进行初步改进,公式为:

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

式中:Q-理想的和允许的养殖容量(t/a);P_{mac}-可接受的最大磷负荷(t/a);P_{food}-水产养殖散失到水体中的磷负荷(kg/kg);P_{inlet}-通过换水将外河带入养殖水体的磷负荷(t/a)。

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

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

2 结果与分析

2.1 水环境现状

根据国家地表水环境质量标准(GB3838-2002)对南浔区水环境进行单因子评价(表1-3)。结果显示,大部分采样点指标达到国家地表水II-III类水质要求,但总氮指标偏高,仅达到IV-V类水质要求。*t*检验结果显示,5月和8月水质检测情况没有显著差别(*P*<0.05),而11月的TP、TN和NH₄⁺-N要显著高于5月和8月(*P*<0.05)。这主要是由于11月大部分水产养殖活动结束,随着养殖尾水被大量排入外河,导致外河水质变差,氮磷含量普遍升高。

一般水生植物(藻类、水草)细胞和组织中有固定的氮磷比,池塘植物吸收水中的氮磷也是按照这一比例进行的,这两种元素中某一种的相对量低于此比值,另一种就会成为生理需要上的多余,而不足的一种即成为限制因子,一般水生植物组织中的氮磷质量比为7:1(边巍,2011)。由监测结果可知,南浔区水产养殖区TN平均值为1.824 mg/L,TP平均值为0.1164 mg/L,N/P为15.67,显著大于7,因此可确定南浔水产养殖区富营养化限制因子为磷元素。由于总氮指标较高,而总磷大多处于II类水,评估南浔区养殖容量时应以磷为限制条件。由于监测数据有限,本文暂以3次水产养殖区TP监测数据的均值作为各监测点水质指标参考。

2.2 养殖排污量

2015年3-11月对浙江省6种主要淡水养殖模式养殖池塘水质指标进行监测,监测频率为每月1次,其中6种主要淡水养殖模式包括常规鱼(草

表 1 5 月水质监测数据

Tab.1 Water quality parameters at each sampling site in May

采样点	TP/ mg · L ⁻¹	TN/ mg · L ⁻¹	NH ₄ ⁺ -N/ mg · L ⁻¹	pH	Chl-a/ μg · L ⁻¹	石油类/ mg · L ⁻¹	COD _{Mn} / mg · L ⁻¹
S ₁	0.140	2.72	0.459	7.08	25.95	0.040	10.20
S ₂	0.117	2.38	0.387	7.22	23.00	0.150	12.80
S ₃	0.072	2.78	0.329	7.28	15.14	—	16.20
S ₄	0.056	1.92	0.343	7.39	16.31	—	4.98
S ₅	0.059	2.14	0.384	7.18	14.18	—	—
S ₆	0.055	0.62	0.445	7.34	21.29	0.000	7.14
S ₇	0.055	1.68	0.372	7.35	26.05	—	5.41
S ₈	0.288	1.62	0.329	7.48	16.08	0.022	15.80
S ₉	0.087	2.22	0.314	7.42	15.14	—	6.28
S ₁₀	0.137	0.68	0.329	7.36	13.43	—	11.50
S ₁₁	0.157	1.62	0.300	7.20	31.62	—	10.60

注：“—”为未检测到。
Note: “—”represents no value was detected.

表 2 8 月水质监测数据

Tab.2 Water quality parameters at each sampling site in August

采样点	TP/ mg · L ⁻¹	TN/ mg · L ⁻¹	NH ₄ ⁺ -N/ mg · L ⁻¹	pH	Chl-a/ μg · L ⁻¹	石油类/ mg · L ⁻¹	COD _{Mn} / mg · L ⁻¹
S ₁	0.120	2.20	0.054	7.34	23.00	0.03	8.90
S ₂	0.104	1.55	1.470	7.09	18.22	0.03	9.32
S ₃	0.082	2.40	0.010	6.91	14.17	0.02	5.51
S ₄	0.093	2.25	0.039	7.24	15.34	0.02	6.78
S ₅	0.082	4.85	0.010	7.12	24.25	0.01	6.78
S ₆	0.075	3.00	0.010	7.25	17.25	0.04	7.20
S ₇	0.051	2.05	0.387	7.13	33.50	0.03	8.05
S ₈	0.105	1.35	0.010	7.14	11.30	0.05	8.47
S ₉	0.104	2.05	0.155	7.23	59.41	0.02	7.62
S ₁₀	0.069	1.25	0.459	7.26	26.79	0.03	9.74
S ₁₁	0.090	2.20	0.271	7.28	15.35	0.04	11.40

表 3 11 月水质监测数据

Tab.3 Water quality parameters at each sampling site in November

采样点	TP/ mg · L ⁻¹	TN/ mg · L ⁻¹	NH ₄ ⁺ -N/ mg · L ⁻¹	pH	Chl-a/ μg · L ⁻¹	石油类/ mg · L ⁻¹	COD _{Mn} / mg · L ⁻¹
S ₁	0.125	3.66	1.530	7.70	23.00	0.012	11.00
S ₂	0.142	5.25	1.730	7.79	18.22	0.033	14.30
S ₃	0.165	3.19	0.477	7.84	14.17	0.036	5.91
S ₄	0.099	3.03	0.665	7.83	15.34	0.008	28.70
S ₅	0.166	2.97	0.665	7.77	24.25	0.014	13.50
S ₆	0.174	3.44	0.762	7.77	17.25	0.049	7.60
S ₇	0.122	2.59	0.894	7.75	33.50	0.015	2.02
S ₈	0.151	2.70	0.762	7.72	11.30	0.018	11.40
S ₉	0.090	3.91	0.511	7.73	26.79	0.025	2.11
S ₁₀	0.078	3.41	0.477	7.71	15.35	0.011	8.44
S ₁₁	0.214	4.80	1.020	7.70	21.23	0.006	6.33

鱼、鲢、鳙)、外塘中华鳖、乌鳢、大口黑鲈、青鱼和翘嘴鲌,基本包括了南浔区主要养殖模式;监测的主要水质指标包括 COD、TP、TN、TOC 和 NH₄⁺-N,同时监测全年养殖废水排放量,根据物质平衡原理初步计算出南浔区 6 种养殖模式排污量的定量数据(表 4)。可见乌鳢和大口黑鲈单位产污量较高,污

染最为严重,其次是中华鳖养殖。

2.3 养殖参数

用来评估养殖容量所需的参数主要包括各养殖模式的有效养殖面积(A),实际养殖产量(W),池塘磷本底质量浓度(P₀)、平均水深(H)、年换水频率(r)、磷的滞留系数(R),水体允许最高接受磷质量

表 4 6 种养殖模式单位产量排污量

Tab.4 Pollution discharge rate for the six aquaculture modes

养殖 模式	产污量/g · kg ⁻¹				
	COD _{Mn}	TP	TN	NH ₄ ⁺ -N	TOC
常规鱼	98.9	0.26	6.03	2.44	28.1
大口黑鲈	142.5	0.70	14.90	7.31	50.1
乌鳢	222.0	0.73	22.90	11.2	63.8
翘嘴鲌	59.0	0.17	4.30	1.41	18.7
中华鳖	30.2	0.33	6.42	1.20	9.1
青鱼	90.5	0.22	5.32	2.99	16.4

表 5 养殖容量评估模型参数取值

Tab.5 Parameters for the aquaculture capacity model

养殖 品种	有效养殖 面积/hm ²	磷本底浓度/ mg · kg ⁻¹	平均水深/ m	年换 水率	磷滞留 系数	Ⅱ类水最高磷 浓度/mg · kg ⁻¹	Ⅲ类水最高磷 浓度/mg · kg ⁻¹
常规鱼	26343.4	0.05	2	2	0.5	0.1	0.2
大口黑鲈	2067.7	0.05	2	2	0.5	0.1	0.2
乌鳢	843.7	0.05	2	2	0.5	0.1	0.2
翘嘴鲌	649.5	0.05	2	2	0.5	0.1	0.2
中华鳖	540.8	0.05	2	2	0.5	0.1	0.2
青鱼	899.3	0.05	2	2	0.5	0.1	0.2

2.4 养殖容量评估

根据构建的养殖容量模型得出计算结果见表 6。在保持养殖水体磷浓度为Ⅱ类水的前提下,其常规鱼、大口黑鲈、乌鳢、翘嘴鲌、中华鳖、青鱼养殖塘可接受的最大磷负荷为 7.38、5.79、2.36、1.82、1.51、2.52 t,估算其对应的养殖容量分别为28 370、8 271、3 236、10 698、11 648、9 685 t。与实际产量相比,常规鱼、翘嘴鲌,青鱼池塘水质基本达到Ⅱ类水标准,还可适当增养,增养比例分别为 18.27%、95.63%和 7.35%,说明常规鱼可以适当增养,翘嘴鲌可大量增养,青鱼则可少量增养;而大口黑鲈、乌鳢和中华鳖须适当减少,其减少比例分别为 34.65%、57.3%和 40.98%,才能使养殖水体磷浓度保持在Ⅱ类水标准下。

如果以磷浓度为Ⅲ类水即 0.2 mg/L 计算,其可接受的最大磷负荷则显著提升,常规鱼、大口黑鲈、乌鳢、翘嘴鲌、中华鳖、青鱼分别为 28.21、22.33、9.11、7.02 t、5.84、9.71 t;据此估算的养殖容量分别为 109 429、31 902、12 482、41 262、44 928、37 356 t,均显著高于实际产量,其增养比例最大为常规鱼 3 562%,最小为乌鳢 64.67%。这里的增养比例只是理想状况下,因为在实际养殖生产中,大量增养殖带入的不仅有磷,也包括氮、COD 等指标,这些都会使水质严重恶化,从而引起鱼类生病死亡现象的发生。因此在实际的养殖生产中,应根据具体

浓度(P_{max});其中养殖面积和实际养殖产量均来自 2015 年《湖州市南浔区统计年鉴》,平均水深和年换水频率根据实际调查取得,南浔地区适用于《地表水环境质量标准》(GB3838-2002)Ⅱ和Ⅲ类水标准,将水产养殖水域 P_{max} 分别取 0.1 mg/L 和 0.2 mg/L, P_0 取非养殖期间测得的 TP 数据平均值 0.05 mg/L,平均水深取 2 m,认为可养水面已全部开发,有效养殖面积取目前实际养殖面积,经室内实验分析,该区域 45%~55%的磷与底泥长期结合,故 R 值暂取 50%, r 取 2,具体取值详见表 5。

情况确定增养殖比例。

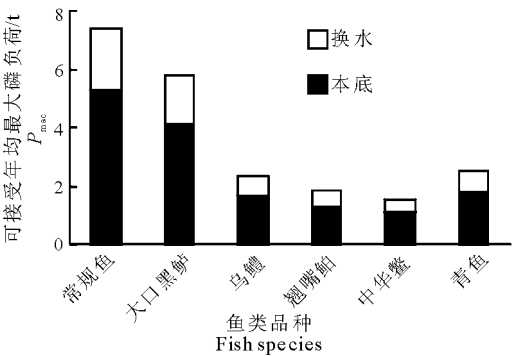


图 2 养殖池塘Ⅱ类水情况下可接受最大磷负荷
Fig.2 Acceptable maximum P loading to maintain Grade II water quality

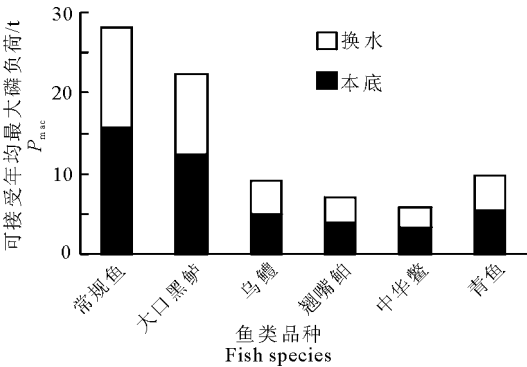


图 3 养殖池塘Ⅲ类水情况下可接受最大磷负荷
Fig.3 Acceptable maximum P loading for Grade III water quality

表 6 不同水质类型下的养殖容量与实际产量对比

Tab.6 Comparison of the estimated aquaculture capacity and the actual yield under Grade II and III water quality conditions

水质类型	养殖品种	实际产量/t	最大养殖容量/t	容量差值/t	增养殖比/%
II类	常规鱼	23987	28370	4383	18.27
	大口黑鲈	12656	8271	- 4385	- 34.65
	乌鳢	7580	3236	- 4344	- 57.30
	翘嘴鲌	5468	10698	5230	95.63
	中华鳖	19738	11648	- 8090	- 40.98
III类	青鱼	9022	9685	663	7.35
	常规鱼	23987	109429	85442	3562.0
	大口黑鲈	12656	31902	19246	152.06
	乌鳢	7580	12482	4902	64.67
	翘嘴鲌	5468	41262	35794	654.57
	中华鳖	19738	44928	25190	127.61
	青鱼	9022	37356	28334	314.05

2.5 经济效益分析

鉴于上述结果,以磷水平为 II 类水前提下估算的允许养殖产量和 2015 年单位价格计算了每个养殖品种经济效益,单位价格根据 2015 年浙江渔情信息查阅获得,计算结果见表 7。结果显示,2015 年南浔区域淡水鱼实际经济效益为 163 129 万元,根据评估养殖容量计算的经济效益为 147 564 万元,减少率为 9.54%。主要是由于产污较大但经济价值较高的大口黑鲈、中华鳖等品种养殖产量的减少,减少率在 40%左右,尽管翘嘴鲌可以增养殖 95.63%,但由于单价较低,不足以弥补损失。

表 7 池塘 III 类水情况下养殖容量与实际

产量经济效益对比分析

Tab.7 Comparative analysis of the economic benefits for estimated aquaculture capacity and actual yield under Grade III water quality conditions

养殖品种	市场价格/元·kg ⁻¹	2015 年经济效益/万元	优化后经济效益/万元
常规鱼	18	43176	51067
大口黑鲈	30	37968	24812
乌鳢	19	14402	6149
翘嘴鲌	25	13671	26744
中华鳖	20 [#]	39477	23296
青鱼	18	14435	15496
合计	-	163129	147564

注:“#”代表中华鳖养殖周期为 3 年,折算成每年的相对价格。

Note:“#” represents the annual relative price because the breeding cycle of *Trionyx sinensis* is 3 years.

2.6 参数敏感性

参数灵敏度分析的目的是确定对模型预测结果影响较大的参数,找到这些参数后,预示着模拟预测时必须认真选取这些参数,如取值不当,会导致模拟失败。本文利用 Crystal-ball 软件中的蒙特卡洛抽样方法对磷的滞留系数(*R*)、换水系数(*r*)和外河磷浓度(*P₀*) 共计 3 个参数进行敏感性分析,抽样 1 000 次,抽样过程见图 2。最终结果显示,其敏感度系数分别为 0.365、0.364 和 -0.271,其中绝对值越大,则参数越灵敏,在模型构建初期更应重视灵敏度较高的参数取值问题。

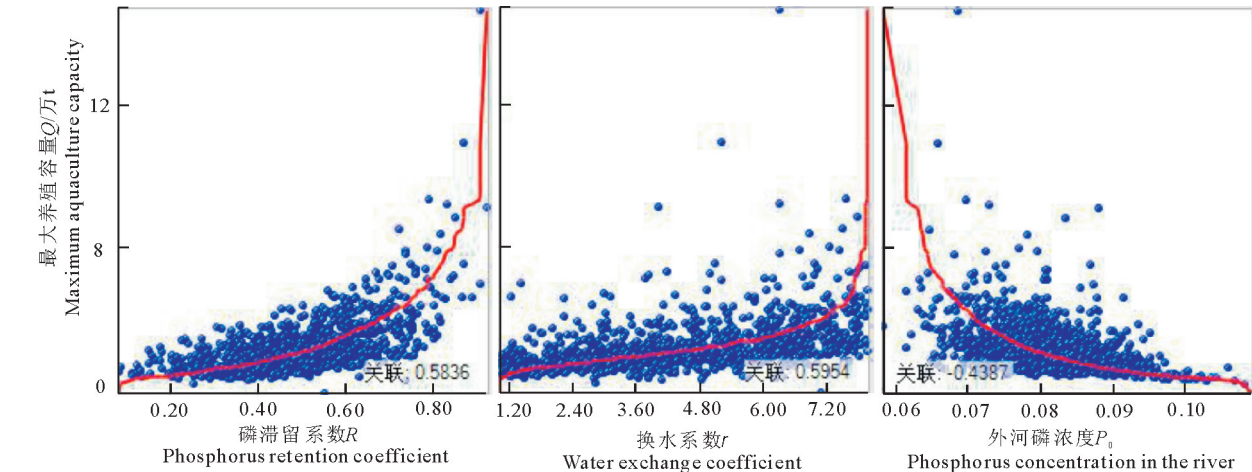


图 4 蒙特卡洛抽样轨迹

Fig.4 The sampling trace process of MCMC

3 讨论

3.1 养殖容量合理性评估

本文根据鱼类养殖情况及水质理化性质,以磷

浓度为限制指标,初步构建了南浔区 6 种主要养殖模式养殖容量模型。结果显示,在 II 类水情况下,常规鱼养殖容量分别为 28 370 t,大口黑鲈 8 271 t,乌鳢 3 236 t,翘嘴鲌 10 698 t,中华鳖 11 648 t,青鱼

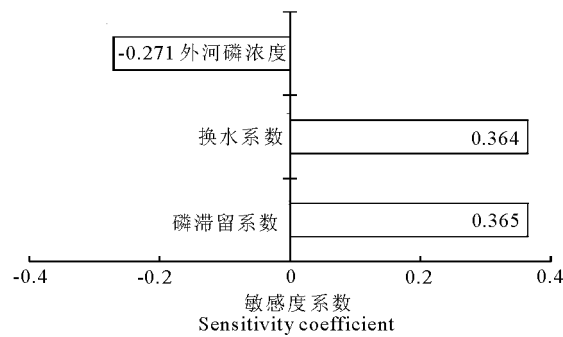


图5 养殖容量模型参数的敏感度系数

Fig.5 Sensitivity coefficients of three important parameters for the aquaculture capacity model

9 685 t;与 2015 年实际产量相比常规鱼、翘嘴鲌、青鱼池塘还可继续适当增养,增养比例分别为 18.27%,95.63%和 7.35%,而大口黑鲈、乌鳢和中华鳖需适当减少,其减少比例分别为 34.65%、57.30%和 40.98%。主要是由于大口黑鲈、乌鳢和中华鳖的养殖过程中投喂动物性饲料(冰鲜鱼、鸡鸭肝等),缺乏养殖尾水处理设施,导致养殖排污系数较高,这与相关方面研究结论一致(刘乾甫,2014;杨婉玲,2014);此外,南浔区地处太湖流域平原河网,区域内河道众多且水流相对较缓,水体自净能力差,水体受到不同程度的污染,已引起社会的广泛关注(史铁锤,2010;钟晓航,2015)。

在浙江省“五水共治”的政策下和积极实施“渔业转型促治水”工程背景下,当地政府通过拆除中华鳖温室养殖大棚、划定禁限养区、建设尾水处理设施和替代冰箱鱼饲料等措施来减少养殖尾水外排带入的污染物;同时采取补贴等措施,适当引导养殖户多养一些环保经济类品种,比如翘嘴鲌、鲢等,适当减少一些污染较高的养殖品种如大口黑鲈、乌鳢等,尽管产值效益减少了 9.54%,但带来了更多潜在的环境生态价值;另外,也可以考虑多营养层次综合水产养殖(Integrated Multi-trophic Aquaculture, IM-TA),IMTA 是一种生态系统水平的适应性管理策略,同过引进不同营养级的种类,建立科学的生物群落,合理搭配生态互补的养殖动物,从而更加有效推动养殖池塘内的物质循环和能量流动,为解决水域承载能力、水体富营养化、病害频发以及提高养殖效益等提供了可能性(唐启升,2013;马雪健,2016)。目前,淡水池塘主要采用“滤食性鱼类-吃食性鱼类”、“鱼-虾-鳖”等,搭配形成“鱼-鳖”、“青虾-河蟹”、“鲢鳙-名优鱼类”等模式,实行生态混养,从而达到绿色增产的目的(胡振雄,2013;朱方建,2011)。综上可见,该区域以磷水平为 II 类水评估的养殖容

量评估结果比较合理,可以为相关政府部门管理决策提供依据。

3.2 提高养殖容量的有效途径

根据参数敏感性分析,本文构建的养殖容量模型与磷的滞留系数(R)和换水系数(r)比较敏感,且为正值,说明为正相关关系,但是与外河水质(P_0)呈负相关关系。主要是由于较强的滞留能力能够增加水体的自净能力,从而提高环境容纳量,大量相关研究已经证实这一结论(Alexander, 2010;韩涛, 2013)。Chen 等(2011)发现农业流域支流的自净能力要显著高于干流,这主要是由于支流中营养物质在河道中的滞留时间要远大于干流。养殖过程中换水主要是为了把富营养化的水体排放到周边水体,从而把周边水质较好的水体引入到池塘中,换水越频繁则养殖塘的环境容量也逐步增加;同样,外河水体水质好坏直接关系到换水的质量,从而影响池塘水体承载力。因此,若想有效提高养殖容量,一方面可以考虑提高池塘水体的自净功能,增加池塘对磷的滞留能力,比如种植水生植物(Zhou, 2006)、投加微生物制剂(Wu, 2016)、添加矿物材料(冀泽华, 2016)等系列理化措施;另一方面须改善外河水环境状况,可以通过采取原位河道生态修复技术(Zhou, 2006),减少养殖尾水向周边水域排放,同时应控制其他面源污染比如农用地化肥的过量施用以及生活污水的乱排现象(史铁锤,2010)。

值得一提的是,由于养殖环境的不稳定性,实际养殖容量也并非是一个常数,而是随环境而发生变化,具有明显的动态性;另外,养殖容量也能随着养殖方式与养殖技术的改进而不断提高(Charles, 2005)。本文养殖容量模型仅建立在有限的监测数据基础上,结构还较为简单,今后有必要进行更加深入系统地研究,在取得养殖效果和经济效益的同时,达到最佳的环境生态效益,实现淡水养殖业的可持续发展。

参考文献

鮑旭騰,徐皓,張建華,等,2012. 水产养殖面源污染控制的最佳管理实践[J]. 南方水产科学, 8 (3):79-86.

边蔚,胡晓波,田在锋,等,2011. 白洋淀水产养殖容量研究[J]. 河北大学学报(自然科学版), 31(1):79-84.

方建光,匡世煥,孙慧玲,等,1996. 桑沟湾栉孔扇贝养殖容量的研究[J]. 海洋水产研究,17(2):18-30.

韩士群,严少华,范成新,2008. 水产养殖废水循环利用及多余藻类生物量资源化[J]. 自然资源学报, 23(4):560-567.

- 韩涛, 翟淑华, 胡维平, 等, 2013. 太湖氮、磷自净能力的实验与模型模拟[J]. 环境科学, 34(10): 3862-3871.
- 胡振雄, 2013. 凡纳滨对虾-金钱鱼-蔬菜综合养殖模式的初步探讨[D]. 上海: 上海海洋大学.
- 黄翔峰, 王坤, 陈国鑫, 等, 2016. 人工湿地对水产养殖废水典型污染物的去除[J]. 环境工程学报, 10(1): 12-20.
- 冀泽华, 冯冲凌, 吴晓芙, 等, 2016. 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, 35(8): 2234-2243.
- 金刚, 李钟杰, 谢平, 2003. 草型湖泊河蟹养殖容量初探[J]. 水生生物学报, 27(4): 345-351.
- 李庆彪, 1999. 栉孔扇贝大量死亡的原因及对策[J]. 齐鲁渔业, (5): 4-5.
- 李树国, 2005. 内陆水产养殖的水域污染及其防治对策[J]. 水产科学, 24(3): 34-35.
- 刘剑昭, 李德尚, 董双林, 2000. 关于水产养殖容量的研究[J]. 海洋科学, 24(9): 33-35.
- 刘乾甫, 赖子尼, 杨婉玲, 等, 2014. 珠三角地区密养淡水鱼塘水质状况分析与评价[J]. 南方水产科学, 10(6): 36-43.
- 刘庆余, 1993. 紫贻贝养殖的环境容纳量问题[J]. 水产科学, 12(9): 15-17.
- 马雪健, 刘大海, 胡国斌, 等, 2016. 多营养层次综合养殖模式的发展及其管理应用研究[J]. 海洋开发与管理, 33(4): 74-78.
- 史铁锤, 王飞儿, 方晓波, 2010. 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, 30(3): 631-640.
- 唐启升, 方建光, 张继红, 等, 2013. 多重压力胁迫下近海生态系统与多营养层次综合养殖[J]. 渔业科学进展, 34(1): 1-11.
- 唐启升, 丁晓明, 王清印, 等, 2014. 我国水产养殖业绿色、可持续发展保障措施与政策建议[J]. 中国渔业经济, 32(2): 5-11.
- 杨红生, 张福绥, 1999. 浅海筏式养殖系统贝类养殖容量研究进展[J]. 水产学报, 23(1): 84-90.
- 杨婉玲, 赖子尼, 刘乾甫, 等, 2014. 不同养殖品种池塘化学耗氧量(COD_{Mn})变化趋势及环境影响因素[J]. 广东农业科学, 41(8): 161-165.
- 郑志伟, 胡莲, 邹曦, 等, 2014. 汉丰湖富营养化综合评价与水环境容量分析[J]. 水生态学杂志, 35(5): 22-27.
- 钟晓航, 王飞儿, 俞洁, 等, 2015. 基于 WASP 水质模型与基尼系数的水污染物总量分配[J]. 浙江大学学报(理学版), 42(2): 181-188.
- 周立红, 卢亚芳, 黄世玉, 等, 2007. 杏林湾水库养殖容量的研究[J]. 福建师范大学学报(自然科学版), 3(23): 53-57.
- 朱方建, 2011. 凡纳滨对虾-草鱼混养模式的初步研究[D]. 上海: 上海海洋大学.
- Beveridge M C M, 1985. Cage and pen fish farming: carrying capacity models and environmental impact[J]. FAO Fish Tech Pap, 184: 255-131.
- Brigolin D, Davydov A, Pastres I P, 2008. Optimization of shellfish production carrying capacity at a farm scale[J]. Applied Mathematics and Computation, 204: 532-540.
- Carver C E A, Mallet A L, 1990. Estimating the carrying capacity of a coastal inlet in terms of mussel culture[J]. Aquaculture, 88(1): 39-54.
- Charles H B, 2005. Aquaculture best management practices rule[M]. Florida: Florida Department of Agriculture and Consumer Services.
- Chen D, Lu J, Shen Y, et al, 2011. Spatio-temporal variations of nitrogen in an agricultural watershed in eastern China: catchment export, stream attenuation and discharge[J]. Environmental Pollution, 159: 2989-2995.
- Christopher W M, Helmut T, Thomas L, et al, 2006. Review of recent carrying capacity models for bivalve culture and recommendations for research and management[J]. Aquaculture, 261: 451-462.
- Dillon P J, Rigler R H, 1974. A test of a simple nutrient budget model predicting the phosphorus concentration in lake water[J]. Journal of the Fisheries Research Board of Canada, 31: 1771-1778.
- Jon G, Kristian J, Thomas L, 2007. Guyondet, A box model of carrying capacity for suspended mussel aquaculture in Lagune de la Grande-Entree, Iles-de-la-Madeleine, Quebec[J]. Ecological modeling, 200: 193-206.
- Kenneth A, Bert B, Robert, 1995. Economic growth, carrying capacity, and the environment[J]. Ecological Economics, 15: 91-95.
- Li Y, Guo T, Zhou J, 2011. Research of Ecological carrying capacity comprehensive evaluation model[J]. Procedia Environmental Sciences, 11: 864-868.
- Thomas Guyondet, Suzanne Roy Vladimir, 2010. Integrating multiple spatial scales in the carrying capacity assessment of a coastal ecosystem for bivalve aquaculture[J]. Journal of Sea Research, 64: 341-359.
- Wu Q, Hu Y, Li S, et al, 2016. Microbial mechanisms of using enhanced ecological floating beds for entropic water improvement[J]. Bioresource Technology, 211: 451-456.
- Zhou Y, Yang H, Hu H, et al, 2006. Bioremediation potential of the macroalgae Gracilaria lemaneiformis (Rhodophyta) integrated into fed fish culture in coastal waters of North China[J]. Aquaculture, 252(2/4): 264-76.

Carrying Capacity of Regional Aquaculture Based on Environmental Capacity

LIU Mei¹, YUAN Ju-lin¹, NI Meng¹, HE Hai-sheng², YE Xue-ping¹, GU Zhi-min¹

(1.Agriculture Ministry Key Laboratory of Healthy Freshwater Aquaculture, Key Laboratory of Freshwater Aquaculture Genetic and Breeding of Zhejiang Province, Zhejiang Institute of Freshwater Fisheries, Huzhou 313001,P.R.China;

2.College of Fisheries and Life Science, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306,P.R.China)

Abstract: Evaluation of regional aquaculture capacity, based on environmental capacity, is necessary to achieve optimal densities for primary breeding species, reduce pollution from aquaculture and support sustainable develop in aquaculture. The Nanxun district of Huzhou city in Zhejiang Province was selected as the research area, where there is an aquacultural area of 5 946.71 hm² with an annual yield of 90 000 t. In May, August and November 2015, ten monitoring sites were established to investigate the condition of aquaculture and the water environment at Nanxun District and determine the pollution discharge per unit production of six primary aquaculture modes. Based on the results, an aquaculture capacity model was constructed, taking phosphorus loads and Grade II water quality standards as the restricting condition. The model was then used to calculate the optimal ecological capacity of the six aquaculture modes. Results show (1) phosphorus limits water quality in Nanxun district; (2) the phosphorus discharge per unit production for the six primary aquaculture modes (the four major Chinese carps, *Micropterus salmoides*, *Ophiocephalus argus Cantor*, *Culter alburnus Basilewsky*, *Trionyx Sinensi* and *Mylopharyngodon piceus*) were 0.26 g/kg, 0.70 g/kg, 0.73 g/kg, 0.17 g/kg, 0.33 g/kg and 0.22 g/kg, respectively; (3) The corresponding maximum acceptable P-loading (P_{mac}) for the six primary aquaculture modes were 7.38 t, 5.79 t, 2.36 t, 1.82 t, 1.51 t and 2.52 t and the corresponding carrying capacities were 28 370 t, 8 271 t, 3 236 t, 10 698 t, 11 648 t and 9 685 t. Parameter sensitivity analysis of the aquaculture capacity model was carried out using Markov Chain Monte Carlo (MCMC) methods and the sensitivity coefficients for the phosphorus retention rate, water exchange coefficient and phosphorus concentration in the river were, respectively, 0.365, 0.364 and -0.271. These values indicate that the regional aquaculture capacity estimates, based on TP meeting Grade II water quality standards, are reasonable and provide a scientific reference for decision making in relevant administrative departments.

Key words: carrying capacity of regional aquaculture; environmental capacity; phosphorus loading; ecological breeding