

水体对网箱养鳊的承载力

彭建华^{1,2}, 刘家寿¹, 熊邦喜²

(1. 水利部、中国科学院水库渔业研究所, 武汉 430079; 2. 华中农业大学水产学院, 武汉 430070)

摘要:通过分析浮桥河水库氮、磷含量, 确定磷为水体营养物的限制性因子; 根据水库的中-富营养化现状, 确定磷浓度 0.066 mg/L——水库中游的磷浓度为水体允许的最高磷浓度; 结合我国现有的实际情况, 在 Dillon-Rigler 模型的基础上建立了包含水体的有效库容系数、营养水平、养殖强度和养殖对象等参数的动态模型, 并由此模型计算出浮桥河水库的网箱养殖容量: 单一养殖鳊鱼时为 1.60‰, 单一养殖建鲤时为 0.21‰; 配套养殖时, 鳊鱼为 0.31‰, 建鲤为 0.21‰, 总容量为 0.52‰; 对水体网箱容量的磷限制性标准的制定进行了讨论, 在模型理论的基础上提出了水体环境调控措施, 并建议养殖水体以食鱼性网箱养殖为主, 饵料鱼网箱为辅。

关键词:承载力; 养殖容量; 模型; 网箱养殖; 配套养鱼; 鳊鱼; 浮桥河水库

Studies on the carrying capacity of water bodies for cage culture of mandarin fish (*Siniperca chuatsi*)

PENG Jian-Hua^{1,2}, LIU Jia-Shou¹, XIONG Bang-Xi² (1. Institute of Reservoir Fisheries, the Chinese Ministry of Water Resources and the Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430079; 2. Fisheries College of Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070). *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(1): 28~34.

Abstract: In order to investigate the effect of cage-culture of piscivorous fishes on water environment, the Fuqiaohe Reservoir (110°52'30"E, 31°10'N) was selected to study the optimum carrying capacity of mandarin fish (*Siniperca chuatsi*).

Water samples were collected every month, from July 1998 to October 1998. The parameters monitored were water temperature, water depth, Secchi degree (SD), pH, dissolved oxygen (DO) and main nutrients (various state of nitrogen and phosphorus). Phosphate contents in the body of mandarin fish and Jian carp were measured in molybdenum-blue method. The models of carrying capacity of water body for cage-culture of fishes were build based on the carrying capacity of waters for wastes and the inputs of exotic nutrients. The former was determined by trophic level of waters, water depth, valid coefficient of capacity and delaying coefficient of phosphorus; and the latter was determined by the fish production of cages, wastes from fishes (including the trash fish fed to fish) and food conversion ratio.

The results showed that phosphorus in Fuqiaohe Reservoir was the nutritional limiting factor in the water body. According to the mid-eutrophication status of the reservoir, the phosphorus concentration (0.066 mg/L) in the middle reaches of the Fuqiaohe Reservoir was regarded as the maximum permission concentration. A series of dynamic models were build for evaluating carrying capacities of cage culture, including parameters of valid coefficient of reservoir capacity, trophic level, cultural intensity and species. The models are shown as the following:

The carrying capacity of waters for phosphorus wastes:

$$P = a \times H \times A \times r \times (1 \times (1 - R)^{-1}) \times (P_{\max} - P_0) \times 1\%$$

The carrying capacity of monocultural cages:

基金项目:国家“九五”科技攻关专题(96-008-02-04)

收稿日期:2002-11-12; **修订日期:**2003-04-05

作者简介:彭建华(1966~), 男, 湖南邵阳人, 硕士, 副研究员, 主要从事水库湖沼学研究。E-mail: pengjianhua66@yahoo.com.cn

致谢:中国科学院水生生物研究所解绶良给予帮助, 特此致谢。

Foundation item: National “Ninth Five-year” Key Technologies R&D Programme (No. 96-008-02-04)

Received date: 2002-11-12; **Accepted date:** 2003-04-05

Biography: PENG Jian-Hua, Master, Associate professor, major research field in reservoir limnology. E-mail: pengjianhua66@yahoo.com.cn

$$P_{\text{cage}} = (a \times H \times r \times \Delta P \times h) \times (W_f \times (1 - R) \times (P_m \times b^{-1} + F \times P_F - P_f))^{-1} \times 1\%$$

The carrying capacity of cage-cultured piscivorous fish in the polycultural pattern:

$$P_s = P \times (A \times W_{f_s} \times (P_m \times b^{-1} + F_s \times P_f - P_f) \times h^{-1}) \times 1000\%$$

The carrying capacity of trash fish fed to fishes in the polycultural pattern:

$$P_t = F_t \times P \times (A \times W_{f_t} \times (P_m \times b^{-1} + F_s \times P_f - P_f) \times h^{-1})^{-1} \times 1000\%$$

The carrying capacity of the total cages in the polycultural pattern:

$$P_{\text{cage}} = (a \times H \times r \times \Delta P) \times ((1 - R) \times P_t)^{-1} \times (1 \times W_{f_s}^{-1} + F_s \times W_{f_t}^{-1}) \times 1\%$$

Where P is the carrying capacity of the water for phosphorus (kg/y); a is the valid volume coefficient (%), namely the amount of valid volume in the total volume; H is the mean depth (m); A is the reservoir area (m²); r is the yearly exchange rate of the water; R is the retention coefficient of phosphorus (%); P_{max} is maximum concentration of phosphorus allowed in the water (mg/L); P_o is the original concentration of phosphorus in the water (mg/L); P_{cage} is the carrying capacity of the water for cages (%); ΔP is the allowed increment concentration of phosphorus in the water (mg/L); h is the survival rate of fish in cages (%); W_f is the unit fish production in cages (kg/m²); P_m is the percentage of phosphorus in the fingerlings (%); b is the multiple of weight growth of fish; F is the feed coefficient; P_F is the percentage of phosphorus in the feed (%); P_f is the percentage of phosphorus in the adult fish (%); P_s is the carrying capacity for cages of piscivorous fish in the polycultural pattern(%); P_t is the loaded weight of phosphorus of unit trash fish production (kg/kg); P_c is the carrying capacity for cages of cultured trash fish (%); W_{f_s} is the production of piscivorous fish in the polycultural pattern (kg/m²); F_s is the survival rate of cultured trash fish (%); W_{f_t} is the production of cultured trash fish in the polyculture pattern (kg/m²);

On the basis of the above models, the carrying capacities of cage-cultured mandarin fish in the Fuqiaohe Reservoir was 1.60‰ when mandarin fish was monocultured and 0.21‰ when Jian carp was monocultured; and 0.31‰ for mandarin fish and 0.21‰ for Jian carp with a summation of 0.52‰ under the polyculture pattern.

Key words: carrying capacity; cultural capacity; model; cage-culture; polyculture; mandarin fish; Fuqiaohe Reservoir
文章编号: 1000-0933(2004)01-0028-07 **中图分类号:** Q14, Q178, Q958, Q959.4 **文献标识码:** A

网箱养鱼以残饵、粪便及其它代谢产物的形式向水体输入大量的外源物质,这些外源性营养物质若超过水体的自净能力,便会引起水体的富营养化,进而影响到网箱鱼类及水库鱼类的生长和成活,甚至造成大规模的死鱼。因此,对水体的网箱养鱼承载力作出准确的评价有重要意义。

有关水体承载力的研究,国外已进行了多年^[1~3]。近年来,国内学者^[4~7]也进行了这方面的探讨。这些研究的特点之一是研究对象主要为投饵式网箱,养殖品种国外多为虹鳟,国内多为鲤科鱼类;另外,研究水平多在静态范围或在经验范围,如李德尚等^[5]利用围隔方法研究的水库对投饵网箱养鱼的承载力,就是将实验结束时围隔中的透明度、pH值、溶氧、化学耗氧量、生化需氧量、和非离子氨等因子与我国的渔业水质标准(GB11607-89)进行对照而得出的;林永泰等^[6]则是根据当时水库的水质和网箱面积现状,利用以往的经验估计水库对网箱养鱼的承载力。这些静态或经验式的评估,没有充分考虑水体的交换率、水深、有效库容系数、营养水平、养殖对象、养殖强度等参数对网箱养鱼承载力的影响,完整性不够,而且水体对配套网箱养殖食鱼性鱼类承载力的研究,目前未见报道。

鳊(*Siniperca chuatsi*)是典型的食鱼性鱼,经济价值高且极具发展前景。20世纪80年代初,湖北省麻城浮桥河水库成功完成鳊鱼人工繁殖、育苗及网箱养殖的研究^[8]。从此,网箱养殖鳊鱼逐渐进入高潮,将鳊鱼及所需饵料鱼进行同步网箱养殖这种模式也逐步走向规模化。因此,开展水体规模化网箱配套养殖鳊鱼的承载力研究,对合理规划网箱养殖食鱼性鱼类和网箱配套养鱼具有指导意义。

1 水库概况和网箱养殖现状

浮桥河水库位于东经110°52'30",北纬31°10',建成于1960年,具有防洪、灌溉、发电、养殖、航运及供水等综合功能。水库为丘陵型,集雨面积为3.81×10⁴ hm²,水库多年平均水深5.6 m,养殖面积为22 150×667 m²,总库容5.4×10⁸ m³,在多年平均水位下水库下游部分容积占总库容的50.1%,水年交换系数1.65。

浮桥河水库开展网箱养殖较早,网箱养鳊规模较大^[8],经过近几年的探索,形成了用建鲤配套养殖鳊鱼的模式,并取得了良好的经济效益和社会效益。1999年,浮桥河水库网箱养鳊的饵料系数为3.60,鳊鱼的增重倍数为48,鳊鱼的成活率为0.9,单位产量达到8.895 kg/m²;水库网箱养殖饵料鱼建鲤的饲料系数为2.1,增重倍数为50,成活率为0.9,单位产量为48.033 kg/m²。

2 材料与方 法

2.1 水体氮、磷含量的测定

1998 年 7~10 月,每月采集水样 1 次。水样定量采集为透明度的 0 倍、1/2 倍、1 倍、2 倍、3 倍和底层(离底 0.5m)处的等量混合样。测定项目包括水温、水深、透明度(SD)、pH 值、溶氧(DO)及水体中的主要营养元素(包括各态氮、磷)等。各项水质因子的分析均以常规方法进行^[9],比色采用 721 型和 751 型分光光度计。

2.2 鳊鱼和建鲤(饵料鱼)含磷量的测定

取鳊鱼种(尾重 50g 左右)、网箱养殖的成鳊(尾重 500g 左右)及建鲤(尾重 15g 左右)各 10 尾,捣碎后作总磷含量测定用。测定方法为硫酸消化钼蓝法^[9]。

2.3 水体承载力模型的建立

水体对网箱养鱼承载力的大小根据水体能够容纳的废物量和外源性营养物质的输入量来确定^[3,10,11]。水体能够容纳的废物量与水体的营养水平、水深、有效系数和磷滞留系数有关^[10,12],外源性营养物质的多少与网箱的单位产量、单位体重鱼类(包括饵料鱼)散失到水体的废物量和饵料系数等有关。水体对网箱养鱼承载力模型主要由上述因子构成。

3 结果与分析

3.1 水体营养物限制因子的选择

根据浮游植物光合成作用的生化反应,浮游植物光合作用要求的 N:P 比为 7.2:1^[13]。浮桥河水库的 TN 为 0.68 mg/L, TP 为 0.066 mg/L, TN:TP 为 10.1:1。因此,在总体上可以确定磷为水体浮游植物光合作用的限制因子。实际上,由于不同水体中能被浮游植物直接利用的有效氮(NH₄⁺、NO₂⁻、NO₃⁻等)所占总氮的比例、有效磷(PO₄⁺)占总磷的比例各不一样,浮游植物光合作用效率是不一样的。浮桥河水库中,有效氮占 TN 的比例为 65%,且有效氮还可以通过水体中的固氮生物如固氮藻类获得;而水体中有效磷(PO₄⁺)占总磷的比例一般较小。由此可知,浮桥河水库中能被浮游植物光合作用利用的有效氮和有效磷的比例高于 10.1:1,磷是水体的限制性因子。

3.2 水体有效容量及限制因子允许浓度

水体富营养化是水体中氮、磷营养物质的增加而引起浮游植物过量生长和整个水体生态平衡的改变等现象^[14]。浮桥河水库浮游植物的水柱日生产量为 2.65 g O₂/(m²·d)、叶绿素 a 含量为 14.64 ug/L^[15],根据 Wetzel^[16]和何志辉^[17]的标准来评判,水库营养类型属于中——富营养型;从总氮、总磷的含量来看,浮桥河水库属于富营养型水库^[18]。由于浮游植物的水柱日生产量、叶绿素 a、总氮和总磷在浮桥河水库从下游至上游的含量逐渐增加,富营养化水平从下游至上游也是逐渐增加的。因此,将浮桥河水库的各种功能、水产养殖应走的持续发展之路以及水库中游鳊鱼网箱中鱼类的营养废物不会对上游水体产生影响等因素加以考虑,选择浮桥河水库中游的磷浓度(0.066 mg/L)作为水体允许的最高磷浓度,以水库下游的容积作为承载磷废物的有效库容。

3.3 水体承载力模型

3.3.1 水体磷废物承载力模型 水体对磷的承载力大小(P)由水体允许磷增加的浓度(ΔP)、有效库容(V)、水体的年交换率(r)以及磷的滞留系数(R)决定,可从下式求出:

$$P = \Delta P \times V \times r \times [1/(1 - R)] / 1000 \quad (1)$$

式中, ΔP 、 V 可由下模型求出:

$$\Delta P = P_{\max} - P_0 \quad (2)$$

$$V = a \times H \times A \quad (3)$$

将(2)、(3)式代入(1)式,得

$$P = a \times H \times A \times r \times [1/(1 - R)] \times (P_{\max} - P_0) / 1000 \quad (4)$$

式中, P 为水体对磷的承载力(kg/y); ΔP 为水体允许磷增加的浓度(mg/L); V 为有效库容(m³),即可以接纳磷废物的库容; r 为水的年交换率; R 为磷的滞留系数(一般认为 45%~55%的磷与底泥长期结合^[10], R 取值 50%); P_{\max} 为水体允许的最高磷浓度(mg/L); P_0 为水体中磷的本底浓度(mg/L); a 为有效库容系数,即有效库容占总库容的比例; H 为平均水深(m); A 为水库面积(m²)。

3.3.2 单养时单位体重鱼类的磷废物散失模型 单一鱼类养殖时单位体重鱼类的磷废物散失(P_i)模型如下:

$$P_i = \{P_1 + P_2 - P_f\} / h \quad (5)$$

式中, P_1 和 P_2 可由下式求出:

$$P_1 = P_m / b \quad (6)$$

$$P_2 = F \times P_f \quad (7)$$

将(6)、(7)式代入(5)式中,得:

$$P_i = (P_m/b + F \times P_F - P_f)/h \quad (8)$$

式中, P_i 为养殖单位体重鱼类的磷废物散失量(kg/kg); P_f 为养殖单位体重鱼类所需苗种的磷废物含量(kg/kg); P_2 为养殖单位体重鱼类所需饵料(饲料)的磷废物含量(kg/kg); P_f 为单位体重鱼类出箱时的磷废物含量(kg/kg); h 为成活率; P_m 为鱼种中含磷率(%); b 为体重增长倍数; F 为饵料(饲料)系数; P_F 为饵料(饲料)中的含磷率(%)。

3.3.3 单养时水体承载力模型 由水体对磷的承载力(P)和养殖单位体重鱼类的磷废物散失量(P_i)可以求出水体能接受的最大鱼产力(W):

$$W = P/P_i \quad (9)$$

对应的网箱面积(S):

$$S = W/W_f \quad (10)$$

水体的网箱承载力为(P_{cage}):

$$P_{cage} = S/A \times 1000\% = (W/W_f)/A \times 1000\% = P/(A \times W_f \times P_i) \times 1000\% \quad (11)$$

式中, W 为水体能接受的最大鱼产力(kg/y); S 为水体所承载的最大网箱面积(m²); W_f 为网箱的单位产量(kg/m²)。

将(4)和(8)式代入(11)式中,得:

$$P_{cage} = a \times H \times r \times \Delta P \times h / \{W_f \times (1 - R) \times (P_m/b + F \times P_F - P_f)\} \times 1\% \quad (12)$$

3.3.4 配养时水体对网箱养鱼的承载力模型

(1)配养时水体对食鱼性鱼的网箱承载力模型 配套养殖时养殖单位体重鱼散失到水体的磷废物量(P_i):

$$P_i = (P_1' + P_2' - P_f)/h \quad (13)$$

式中, P_1' 和 P_2' 可由下式求出:

$$P_1' = P_m/b \quad (14)$$

$$P_2' = F_s \times P_f \quad (15)$$

将(14)式和(15)式代入(13)式中,得:

$$P_i = (P_m/b + F_s \times P_f - P_f)/h \quad (16)$$

式中, P_i 为配套养殖时养殖单位体重食鱼性鱼散失到水体的磷废物量(kg/kg); P_1' 为配套养殖时养殖单位体重食鱼性鱼所需鱼种的磷废物含量(kg/kg); P_2' 为配套养殖时养殖单位体重食鱼性鱼所需饵料鱼的磷废物排放量(kg/kg); P_m 为鱼种中含磷率(%); b 为体重增长倍数; F_s 为食鱼性鱼的饵料系数; P_f 为养殖单位体重饵料鱼的磷废物散失量。

由水体对磷的承载力(P)和配套养殖时养殖单位体重食鱼性鱼散失到水体的磷废物量(P_i)可以算出配套养殖时水体能接受的食鱼性鱼的最大鱼产力(W_s)、对应的网箱面积(S_s)及配套养殖时水体对食鱼性鱼的网箱承载力(P_s):

$$W_s = P/P_i \quad (17)$$

$$S_s = W_s/W_{fs} \quad (18)$$

$$P_s = S_s/A \times 1000\% = P/\{A \times W_{fs} \times (P_m/b + F_s \times P_f - P_f)/h\} \times 1000\% \quad (19)$$

式中, W_s 为配套养殖时水体能接受的食鱼性鱼的最大鱼产力(kg/y); S_s 为配套养殖时水体能接受的食鱼性鱼的网箱面积(m²); W_{fs} 为配套养殖时食鱼性鱼的产量(kg/m²); P_s 为配套养殖时水体对食鱼性鱼的网箱承载力。

(2)配养时水体对饵料鱼网箱的承载力模型 配套养殖时水体能接受的饵料鱼的最大鱼产力(W_c)、对应的网箱面积(S_c)及水体对饵料鱼网箱的承载力(P_c):

$$W_c = F_s \times W_s \quad (20)$$

$$S_c = W_c/W_{fc} \quad (21)$$

$$P_c = S_c/A \times 1000\% = F_s \times P/\{A \times W_{fc} \times (P_m/b + F_s \times P_f - P_f)/h\} \times 1000\% \quad (22)$$

式中, W_c 为配套养殖时水体能接受的饵料鱼的最大鱼产力(kg/y); S_c 为配套养殖时水体能接受饵料鱼的网箱面积(m²); W_{fc} 为配套养殖时饵料鱼的单位产量(kg/m²)。

(3)配养时水体的网箱承载力模型 配套养殖时水体的网箱承载力:

$$P_{cage} = P_s + P_c = \{a \times H \times r \times \Delta P\} / \{(1 - R) \times P_i\} \times \{1/W_{fs} + F_s/W_{fc}\} \times 1\% \quad (23)$$

令 $Q = \{a \times H \times r \times \Delta P\} / \{(1 - R) \times P_i\} \times 1\%$, 则(23)式可简化为:

$$P_{cage} = Q \times \{1/W_{fs} + F_s/W_{fc}\} \quad (24)$$

3.4 浮桥河水库网箱养鳊的承载力

3.4.1 浮桥河水库的磷负荷量 浮桥河水库的有效库容为水库下游部分容积,在多年平均水位下占总库容的 50.1%,有效库容系数 $a = 0.501$,水库多年平均水深 $H = 5.6$ m,面积 $A = 22\ 150 \times 667$ m²,水交换系数 $r = 1.65$;磷的滞留系数 $R = 0.5$, $P_{\max} = 0.066$ mg/L,水库下游的磷浓度 $P_s = 0.044$ mg/L^[17],将它们代入式 4 中,得浮桥河水库的磷负荷量: $P = 3003.3$ kg。

3.4.2 单养时浮桥河水库对鳊鱼网箱的承载力 经检测,建鲤的含磷率 $P_F = 0.52\%$,鳊鱼的含磷率 $P_f = 0.6\%$,鳊鱼种的含磷率 $P_m = 0.48\%$;浮桥河水库网箱养鳊的饵料系数 $F = 3.60$,鳊鱼的增重倍数 $b = 48$,鳊鱼的成活率 $h = 0.9$;将它们代入(8)式,可得到养殖单位体重鳊鱼散失到水体的磷废物量: $P_i = 14.24 \times 10^{-3}$ kg/kg。

将 P 值、 P_i 值、浮桥河水库网箱养殖鳊鱼的单位产量 $W_f = 8.895$ kg/m²、浮桥河水库面积 $A = 22\ 150 \times 667$ m² 代入(11)式,可得水体对鳊鱼网箱的承载力 $P_{c_{\text{gl}}\%} = 1.60\%$ 。

3.4.3 单养时浮桥河水库对建鲤网箱的承载力 经检测,建鲤饲料的含磷率 $P_F = 1.1\%$,建鲤的含磷率 $P_f = 0.52\%$,建鲤鱼种的含磷率 $P_m = 0.50\%$,建鲤的增重倍数 $b = 50$,成活率 $h = 0.9$,水库网箱养殖建鲤的饲料系数 $F = 2.1$,将它们代入(8)式,得到养殖单位体重建鲤散失到水体的磷废物量: $P_i = 20.00 \times 10^{-3}$ kg/kg。

将 P 值、 P_i 值、浮桥河水库网箱养殖建鲤的单位产量 $W_f = 48.033$ kg/m²、浮桥河水库面积 $A = 22\ 150 \times 667$ m² 代入(11)式,可得水体对建鲤网箱的承载力: $P_{c_{\text{gl}}\%} = 0.21\%$ 。

3.4.4 配养时浮桥河水库对网箱的承载力

(1)配养时浮桥河水库对鳊鱼网箱的承载力 已知 $P = 3003.3$ kg, $A = 22150 \times 667$ m², $W_f = 8.895$ kg/m², $P_m = 0.48\%$, $b = 48$, $F = 3.60$,单位体重建鲤散失到水体的磷废物量 $P_i = 20.00 \times 10^{-3}$ kg/kg, $P_f = 0.6\%$, $h = 0.9$,代入式 3.6 中,可以算出浮桥河水库配套养殖时水体对鳊鱼网箱的承载力: $P_c = 0.31\%$ 。

(2)配养时浮桥河水库对建鲤网箱的承载力 已知 $F = 3.60$, $P = 3003.3$ kg, $A = 22150 \times 667$ m², $W_f = 48.033$ kg/m², $P_m = 0.48\%$, $b = 48$,单位体重建鲤散失到水体的磷废物量 $P_i = 20.00 \times 10^{-3}$ (kg/kg), $P_f = 0.6\%$, $h = 0.9$,代入式 3.7 中,可以算出浮桥河水库配套养殖时水体对建鲤网箱的承载力: $P_c = 0.21\%$ 。

(3)配养时浮桥河水库的网箱承载力 配套养殖时水体对网箱的承载力: $P'_{c_{\text{gl}}\%} = P_c + P_s = 0.52\%$

4 讨论

4.1 关于水体限制性指标的标准

限制性指标值的确定是评价水体环境容量的关键因子,指标值过高,网箱养鱼会对水体造成污染,指标值过低,就不能充分发挥水体的养殖功能。

目前,还没有制定养殖水体磷的标准,有关标准主要是从富营养化的角度来考虑的。曹维勤^[19]将水体富营养化磷的浓度定为 $0.01 \sim 0.02$ ml/m³,何志辉^[17, 20]将其定为 0.03 ml/m³,Carlson^[21]的指标为 0.02 ml/m³,Wetzel^[16]的指标为 $0.01 \sim 0.03$ ml/m³。显然,制定这些标准的目的是为了防止水体富营养化及藻类“水华”的出现、防止深层水缺氧。对于以养殖为目的的水体来说,这些指标值是比较严格的。因为,磷是浮游植物生长的第一位限制性营养元素;此外,养殖水体中需要有一定密度的饵料生物,一定程度的富营养化对放养渔业是有利的^[22],因此,过低的磷标准不能作为养殖水体环境容量的限制性指标。相反,有些作者将磷标准定得过高,这会给水体环境带来额外的负担。陈义焯等在评价四川省的水库网箱容量时,将磷标准定为 0.1 ml/m³,它是武汉东湖富营养标准中磷含量^[22]的 2 倍,在 Wetzel^[16]标准中属于极度富营养范围。有鉴于此,作者在制定浮桥河水库网箱环境容量的限制性磷标准时,以 0.066 mg/L——水库中游的磷浓度为水体允许的最高磷浓度。这样,既可以满足水体放养鱼类的饵料生物需求,又不会给水体造成过重的外源营养物负担。

应当指出的是,由于水体不同其功能有所不同,在不同水体中设置网箱时,制定水体限制性指标标准时应视水体功能而区别对待,如供水水体中就不应设置网箱。

4.2 关于水体承载力模型的研究

水体中引入网箱养殖后,由于营养物质特别是氮、磷的排放会改变水质状况。因此,为了网箱养殖业的持续发展和水体多种用途的综合利用,必须准确评价水体对网箱养鱼的承载能力。

对水体承载能力的研究,也就是对水体承受主要营养物特别是限制性营养物能力的研究。国内外学者一般是从水体中氮、磷平衡的角度来考虑。磷的平衡模型有动态模型和统计模型两种。动态模型是指支配藻类生长最关键的物理、化学和生物过程的数学表达式,其参数 2~40 个不等^[3]。由于藻类生长受多种因素的影响,因此动态模型的预测能力有限,较少使用^[2]。统计模型有 Dillon-Rigler 模型^[23]和 OECD 模型^[12]两种。OECD 模型指的是一个水体中总磷的浓度 P 是流入的总磷浓度 P_i 和滞留时间 $T(w)$ 的函数: $P = P_i / [1 + T(w)]$ 。该模型不能解释网箱养鱼输出的废物中 P 的状态,不宜用于预测网箱养鱼的磷负载。Dillon-Rigler 模型表示在稳定状态下,水体的磷浓度由磷的负载、水体容积的大小、水交换率及磷的长期沉积量来决定。即: $P = L \times (1 - R) / d \rho$ 。(P 为总磷的浓度(g/m³), L 是总磷承载(g/(m²·a)), d 是水体的平均深度(m), R 是被沉积物结合的百分

比、 p 是每年的水交换率)。目前,有关学者预测水体的网箱承载力时普遍使用该模型,如 Beveridge^[3]曾用该模型计算出一个小型湖泊对网箱养殖虹鳟的承载力为 $3 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$,熊邦喜等^[25]用此模型计算出某水库可设置投饵网箱的面积与水库养鱼水面之比为 $1:355$ 。但是,Dillon-Rigler 模型由于设计时间较早^[24],限于当时的生态环境基础较好,没有考虑水体的有效库容系数(a),这是一个缺陷。作者在 Dillon-Rigler 模型的基础上,结合我国现有的实际情况,建立了包含水体的有效库容系数、营养水平、养殖强度和养殖对象等参数的动态模型,它具有更普遍的实用价值,适用于我国不同的水体和不同的养殖方式。

4.3 网箱养殖食鱼性鱼类与食饲性鱼类的承载力差异

由于食鱼性鱼类和食饲性鱼类的饵料(饲料)含磷率 P_f 值、网箱单产 W_f 值和饵料(饲料)系数相差较大,从子模型 12 得出的水体对网箱养殖食鱼性鱼类和食饲性鱼类的承载力结果差别也较大。浮桥河水库网箱单一养殖鳊鱼的承载力为 1.60% ,单一养殖建鲤的承载力为 0.21% ,两者相差 6.62 倍。从环境保护的角度出发,作者建议养殖水体以食鱼性网箱养殖为主,辅以部分饵料鱼网箱。食鱼性鱼类对水环境的压力相对较小,这样有利于水体的自我平衡、自我净化。浮桥河水库对配套网箱的承载力比单一养殖建鲤网箱的承载力增加了 136% 。而且,从经济方面考虑,虽然网箱养殖食鱼性鱼类的单产低,但其价格高,单位网箱面积的效益高于食饲性鱼类。从渔业利用的角度出发,水体应该以食鱼性网箱养殖为主,这样既可以增大水体对网箱的承载力,同时利用水体的天然饵料资源。与养殖鳊鱼配套养殖饵料鱼(建鲤)相比,浮桥河水库对单一养殖鳊鱼的承载力要高得多。浮桥河水库小型饵料鱼资源极为丰富^[26],通过捕捞野生小型饵料鱼来喂养鳊鱼不仅能提高网箱养鳊的经济效益、减少对水质的污染,还可能有利于改善水质,因为小型鱼类通过下行效应可能会对水质产生不利影响^[15]。

4.4 水体环境调控

绝大多数水库具有多种功能,而且充分利用水库的各种功能也是我国国情的需要。但是,网箱养鱼带来的外源性营养物质在一定程度上加剧了水体的富营养化进程。怎样才能最大限度地降低网箱养鱼带来的危害,从作者设计的水体对网箱养鱼的承载力模型中可以得到以下启发:①降低 P_f 值,也就是减少外源性营养物质的输入。在配套养殖食鱼性鱼类时这一点是比较容易作到的,可以将网箱养殖饵料鱼投喂变为就地捕捞水体的野杂鱼类来投喂,这样模型 16 中的 P_f 值为零,模型 19 基本变成模型 11,水体的配套养殖承载力就提高到单一养殖时的承载力,甚至更大。②减少 F_f 值、增加 W_f 值。只要加强管理,饵料系数 F_f 值是可以减低的,网箱单产 W_f 是可以提高的,这样既可以减少饲料中的磷输入,又可以减少饵料鱼本身的磷输入,水体对网箱养鱼的承载力就可以提高。③增加 r 值。模型中的 r 值指的是水体的年交换率,在整个水体中是固定不变的。但是,通过改变网箱的位置,可以使网箱养鱼所影响的局部水体 r 值增加,水体对网箱的承载力也就增加。如将网箱的位置移至水体的出水口附近就可以增加 r 值,这种布置对于具有灌溉功能的水体意义更大,因为,水体中磷的含量增加对农作物有益。④增大 R 值,通过移动网箱的位置可以作到。

References:

- [1] Bergheim A, Siversten A, Selmer-Olsen A R. Estimated pollution loadings from Norwegian fish farms I. Investigations 1978~1979. *Aquaculture*, 1982, 28 (3-4): 347~361.
- [2] Jones R A, Lee G F. Recent advances in assessing impact of phosphorus loads on eutrophication-related water quality. *Water Res.*, 1982, 16: 503~515.
- [3] Beveridge M C M. Cage and pen fish farming: carrying capacity models and environmental impact. *FAO. Fish Tech. Pap.*, 1984, 255: 131.
- [4] Xiong B X, Li D S, Li Q, Cao J M. The impact of filter-feeding fish on the carrying capacity of reservoir for feeding- cage-culture of fish. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 1993, 17(2): 131~143.
- [5] Li D S, Xiong B X, Li Q, et al. Carrying capacity of reservoirs for feeding cage-culture of fish. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 1994, 18 (3): 223~229.
- [6] Lin Y T, Zhang Q, Yang H Y, et al. Impacts of cage-culture of fishes on the aquatic environment in Heilongtan Reservoir, Sichuan. *Reservoir Fisheries*, 1995, (6): 6~10.
- [7] Chen F X. Water quality modeling for fish cage culture in lakes or reservoirs. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 1999, 19(2): 132~136.
- [8] Huang Y C. The Status and prospect of cage-culture of mandarin fish in Fuqiaohe reservoir, Hubei. *Reservoir Fisheries*, 1993, (1): 31~34.
- [9] APHA (American Public Health Association). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, 14thed. APHA, Washington, D. C, 1975.
- [10] Beveridge M C M. *Cage Aquaculture*. Farnham, Fishing News Books, Ltd, Survey, 1987.
- [11] Liu J S, Cui Y B, Liu J K. Research Progress in the impacts of cage-culture of fishes on environment. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 1997,

- 21(2): 174~184.
- [12] OECD. *Eutrophication of waters, assessment and control*. Organization for Economic Cooperation and Development, Paris, 1982. 215.
- [13] Odum E P. *Fundamentals of Ecology*. Philadelphia: Saunders W B Publishing Company, 1971.
- [14] Liu J K. *Advanced Hydrobiology*. Beijing: Scientific Publishing House, 1999. 305~338.
- [15] Liu J S, Huang Y C, Hu C L, et al. Trophication status and water quality regulation in Fuqiaohe Reservoir. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2001, 10(4): 360~364.
- [16] Wetzel R G. *Limnology*. 2nd ed. Philadelphia: W B. Saunders College Publishing, 1983.
- [17] He Z H. Trophic classification of lakes and reservoirs in China. *Journal of Dalian Fisheries College*, 1987, (1): 1~10.
- [18] Wu X H, Zhu A M, Yang D X, et al. Hydro-chemical and -physical characteristics of Fuqiaohe Reservoir. *Reservoir Fisheries*, 2001, (2): 23~26.
- [19] Cao W Q. *Eutrophication*. In: Editorial Committee of Encyclopedia of China ed. *Encyclopedia of China-Environmental Science*. Beijing: Publishing House of Encyclopedia of China, 1987. 103.
- [20] He Z H. Trophic classification of lakes. *Reservoir Fisheries*, 1982, (4): 46~51.
- [21] Carlson R E. A trophic state index for lakes. *Limnol Oceanogr*, 1977, 22(1): 361~369.
- [22] Liang Y L, Chen H D, He X Q. Feeds and Fertilization. In: Liu J K, He B W eds, *Science of Freshwater Fishes Culture in China*. Beijing, Scientific Publishing House, 1992. 189~256.
- [23] Shen Y F, Zhang Z S. Biological Issues of Water Pollution. In: Liu J K ed. *Advanced Hydrobiology*, 1999. 305~338.
- [24] Dillon P J, Rigler R H. A test of a simple nutrient budget model predicting the phosphorus concentration in lake water. *J. Fish. Res. Bd. Can.*, 1974, 31: 1771~1778.
- [25] Xiong B X, Li D S, Zhou C S, et al. Prospects of integrated fish culture in China's reservoirs. *Journal of Lake Sciences*, 1994, 6(3): 78~84.
- [26] Liu J S, Huang Y C, Hu C L, et al. Fishes and fish culture practices in Fuqiaohe reservoir, China. *Internat. Rev. Hydrobiol.*, 1998, 83: 569~576.

参考文献:

- [4] 熊邦喜, 李德尚, 李琪, 等. 配养滤食性鱼对投饵网箱养鱼负荷力的影响. *水生生物学报*, 1993, 17(2): 131~143.
- [5] 李德尚, 熊邦喜, 李琪, 等. 水库对投饵网箱养鱼的负荷力. *水生生物学报*, 1994, 18(3): 223~229.
- [6] 林永泰, 张庆, 杨汉运, 等. 黑龙潭水库网箱养鱼对水环境的影响. *水利渔业*, 1995, (6): 6~10.
- [7] 陈飞星. 湖泊(水库)网箱养鱼水质模型研究. *环境科学学报*, 1999, 19(2): 132~136.
- [8] 黄永川. 浮桥河水库网箱养鱼现状和发展前景. *水利渔业*, 1993, (1): 31~34.
- [11] 刘家寿, 崔奕波, 刘建康. 网箱养鱼对环境影响的研究进展. *水生生物学报*, 1997, 21(2): 174~184.
- [14] 刘建康. *高级水生生物学*. 北京, 科学出版社, 1999. 305~338.
- [16] 何志辉. 中国湖泊和水库的营养分类. *大连水产学院学报*, 1987, (1): 1~10.
- [17] 吴晓辉, 朱爱民, 杨大兴, 等. 浮桥河水库水体的理化性质. *水利渔业*, 2001, (2): 23~26.
- [18] 曹维勤. 富营养化. 见: 中国大百科全书编委会编辑, 中国大百科全书—环境科学. 北京, 中国大百科全书出版社, 1987. 103.
- [19] 何志辉. 湖泊的营养分类. *水利渔业*, 1982, (4): 46~51.
- [21] 梁彦龄, 陈洪达, 贺锡勤. 饵料与施肥. 见: 刘建康, 何碧梧主编, 中国淡水鱼类养殖学. 北京: 科学出版社, 1992. 189~256.
- [22] 沈福芬, 章宗涉. 水污染生物学问题. 见: 刘建康主编, 高级水生生物学. 北京: 科学出版社, 1999. 305~338.
- [25] 熊邦喜, 李德尚, 周春生, 等. 我国水库综合养鱼的发展前景. *湖泊科学*, 1994, 6(3): 78~84.
- [26] 刘家寿, 黄永川, 胡传林, 等. 浮桥河水库的营养状况与富营养化调控措施. *长江流域资源与环境*, 2001, 10(4): 360~364.