

保水渔业对千岛湖食物网结构及其相互作用的影响

刘其根^{1,2}, 王钰博¹, 陈立侨^{2,*}, 陈勇³, 刘国栋¹, 陈马康¹, 何光喜⁴,
陈来生⁴, 洪荣华⁴

(1. 上海海洋大学农业部水产种质资源与养殖生态重点开放实验室 上海, 201306; 2. 华东师范大学生命科学学院, 上海 200092;

3. School of Marine Sciences, University of Maine, Orono, ME 04469, USA; 4. 浙江杭州千岛湖发展有限公司, 淳安, 浙江 311700)

摘要:为预防千岛湖连续暴发了 2a(1998—1999)的蓝藻水华和改善千岛湖水质,于 2000 年起在千岛湖开展了以人工放养鲢鳙和控制凶猛鱼类为主要措施的保水渔业试验。作为试验的主要研究内容之一,通过构建 1999 和 2000 年千岛湖生态系统的 Ecopath 模型,比较分析了实施保水渔业对千岛湖生态系统食物网结构及其相互作用的影响。结果表明:实施保水渔业,使千岛湖中的银鱼和鲤生物量减少,而鲢类(主要是蒙古鲢)、鳊类和大眼华鳊等增加;使各种鱼类的捕食者和食饵生态位重叠指数下降;各主要鱼类的相互作用中,鲢、鳊对鳊、鲢的促进作用增强,鳊对鲢的抑制作用及鲢对虾类、银鱼和鲤等以及银鱼对浮游动物的抑制作用减弱,鳊对银鱼、大眼华鳊对鲤的抑制作用增强。这些影响,使千岛湖食物网结构更趋合理,如底层碎屑食性鱼类如鳊类等的增加,有利于营养物的再循环和再利用,从而增强了水体对营养物的净化作用。

关键词:千岛湖; Ecopath 模型; 保水渔业; 食物网结构; 生态系统

Impacts of aquatic environment protection oriented fishery on the structure of food web in Lake Qiandaohu

LIU Qigen^{1,2}, WANG Yubo¹, CHEN Liqiao^{2,*}, CHEN Yong³, LIU Guodong¹, CHEN Makang¹, HE Guangxi⁴, CHEN Laisheng⁴, HONG Ronghua⁴

1 The Key Laboratory of Aquatic Genetic Resources and Aquacultural Ecology (AGRA), the Ministry of Agriculture, Shanghai Ocean University, 201306, Shanghai, China

2 School of Life Science, East China Normal University, 200092, Shanghai, China

3 School of Marine Sciences, University of Maine, Orono, ME 04469, USA

4 Hangzhou Qiandaohu Exploitation Co. Ltd., 311700, Chuan'an, China

Abstract: A study was conducted in 2000 to evaluate impacts of an aquatic environment protection oriented (AEPO) fishery on the structure of food web in Lake Qiandaohu. The AEPO fishery was based on the stocking of silver and bighead carps and the removal of predatory fish and was designed to improve our understanding of ecosystem dynamics to prevent the recurrence of cyanobacterial bloom occurring in 1998 and 1999 and to improve water quality in the Lake Qiandaohu. We constructed Ecopath models of the lake ecosystem for 1999 and 2000, respectively, to compare and analyze quantitatively the changes of the food web structure before and after the implementation of AEPO fishery in the lake. The results showed that AEPO fishery resulted in a reduction of ice fish and common carp biomass and an increase of Culters (esp., *Culter mongolicus*), *Xenocypris* and *Sinibrama* biomass, etc., reducing the niche overlap of both preys and predators in the ecosystem. In addition, The AEPO fishery enhanced the bottom-up effects of bighead carp and silver carp on predatory fish such as *Elopichthys* and Culters, reduced the suppressing effects of *Elopichthys* on Culters, of Culters on shrimp, ice fish

基金项目:国家自然科学基金资助项目(30673088);上海市重点学科建设资助项目(Y1101)

收稿日期:2009-03-04; **修订日期:**2010-03-24

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: lqchen@bio.ecnu.edu.cn

and common carp, and of ice fish on zooplankton, and enhanced the inhibitory impacts of bighead carp on ice fish, Sinibrama and common carp. These effects of AEPO fishery, making the food web structure optimal such as increasing detritivorous fish like *Xenocypris*, can result in the enhancement of nutrient recycling and reutilization, eventually leading to the enhancement of purification capability of the lake ecosystem.

Key Words: Lake Qiandaohu; Ecopath; aquatic environment protection oriented (AEPO) fishery; structure of food web; ecosystem

1998、1999 年千岛湖连续 2a 发生了大面积的蓝藻水华,引起了社会的广泛关注。相关研究表明,千岛湖在营养盐较高时未发生水华,而在营养盐较低时发生了水华,更主要是与湖中鲢鳙生物量的锐减有关^[1]。因此在千岛湖实施保水渔业,即通过湖区大规模放养鲢鳙,(并结合控制凶猛鱼类以确保放养鲢鳙的成活率),从而切实增强水体下行控制作用来控制水华和改善水质是可行的和必要的^[2]。千岛湖在 2000 年实施保水渔业后,也使湖中的鲢鳙生物量剧增,加大了对水体中藻类和浮游动物的牧食。而鲢鳙放养引起的藻类和浮游动物生物量的减少,又会通过营养级联效应对水体中的其他鱼类和生态系统的物质循环和能量流动等过程产生深刻影响。虽然有关鲢鳙放养对水体的生态效应,国内外已有广泛研究^[2-18],然而,以往研究,都局限于鲢鳙对水体中浮游植物、浮游动物和营养盐等下行影响方面。同时,虽然也已有报道认为,鲢鳙等鱼类的放养,可能是我国云南很多湖泊中土著鱼类减少的重要原因^[19-20],但有关鲢鳙放养后对水体的高营养级生物(鱼类)和对生态系统的物质循环和系统发育等的影响的研究则未见报道。

此外,由于鲢鳙的放养,还常需要对凶猛鱼类的清除(俗称除野),以保证人工放养鱼类的成活率,即保水渔业实际上包含了鲢鳙的放养和凶猛鱼类的控制两方面的内容。由于凶猛鱼类通常都位于食物链的顶端,因此水库中凶猛鱼类的清除也必然会通过下行作用对生态系统产生下行影响。千岛湖在 1998、1999 年前后,鳙鱼种群数量较大,对放养鱼类的危害较大。为了减少鳙鱼对放养鱼类的危害,千岛湖发展有限公司于 1999 和 2000 年连续 2a 对水库中的鳙鱼(和翘嘴鲌)进行了大力捕杀(清除)。据报道,不包括正常生产作业捕捞的鳙鱼,仅这 2a 除野捕捞的鳙鱼就有 9000 多尾,产量超过 92t,有效地控制了水库中的鳙鱼种群^[21]。虽然 2000 年鳙鱼仍有一定的生物量,但和 1999 年相比,已减少了很多。

可见,由于实施保水渔业,2000 年的千岛湖生态系统的结构与 1999 年相比已有了很大的改变:大量放养的鲢鳙和减少了的鳙鱼种群及其引起的各种直接和间接影响。本研究通过构建 1999 年和 2000 年的千岛湖生态系统 Ecopath 模型,比较和定量分析实施保水渔业(鲢鳙放养和除野)对千岛湖生态系统的结构和功能产生的可能影响,以便对保水渔业的合理评价、鲢鳙放养的科学管理和合理应用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料来源

根据 ECOPATH 模型构建要求,收集 1999、2000 年千岛湖的主要鱼类产量、生物学参数,主要生物类群(浮游植物、浮游动物等)的生物量等原始资料和数据。其中千岛湖主要鱼类产量和捕捞力量来自浙江省淳安县农业局水产技术推广站、浙江省杭州市千岛湖发展有限公司,1999、2000 年的浮游生物资料来自公开发表的文献^[22-23]或者浙江省淳安县环境保护局监测资料和浙江大学硕士论文^①。

1.2 方法

Ecopath 模型原理和构建方法参照文献^[24-25]进行。

1.2.1 功能组的设置

根据 Ecopath 模型构建要求,以及根据千岛湖的鱼类组成、各种生物群落特点以及相关资料的可获性,本

① 全为民,千岛湖富营养化评价及其模型应用研究. 浙江大学硕士研究生学位论文,2002.

研究共设置 17 个功能组(表 1)。

各功能组的生物量(B_i)和其他各种参数的估计如下。

1.2.2 参数的估计

1.2.1 各种鱼类的 P/B 系数和生物量的估计

(1) 各种鱼类的 P/B 系数的估算方法

根据各种鱼类的 von Bertalanffy 生长方程^[26],利用的死亡率估算模型,用 Fisat_II 软件计算获得:

$$Z = \frac{P}{B} = \frac{K \cdot (L_{\infty} - \bar{L})}{\bar{L} - L'}$$

式中, Z 为鱼类的总死亡系数, P 为生产量, B 为生物量, K 为, L_{∞} 为鱼类的渐近体长, $\bar{L}$ 为鱼类种群的平均体长, L' 为鱼类的最小捕捞规格(体长)。

(2) 生物量的估计方法

根据 $Z = F + M$, (其中, F 为捕捞死亡系数, M 为自然死亡系数)以及根据自然死亡率的经验公式^[27] $M = K^{0.65} \cdot L_{\infty}^{-0.279} \cdot T_c^{0.463}$ 估算各种鱼类的自然死亡率 M (其中 T_c 为初次捕捞年龄),并估算出 F ,最后根据 $F = Y/B$ 或 $B = Y/F$ 估算各种鱼类的生物量。

表 1 千岛湖 1999、2000 年生态系统模型的功能组

Table 1 Food web compartments in Lake Qiandaohu of 1999 and 2000

功能组编号 Group No.	功能组名称 Group name	包括的生物种类 Species in group
1	Elopichthys	鳊鱼
2	Culter	翘嘴鲌,蒙古鲌,青梢鲌
3	Pseudolaubuca	银鲈
4	Icefish	太湖新银鱼
5	Bighead carp	鳊
6	Silver carp	鲢
7	Common carp	鲤
8	Xenocypris	黄尾鲴,细鳞斜颌鲴,圆吻鲴
9	Sinibrama	大眼华鳊
10	Other fish	草鱼,团头鲂,鳊,鲫,倒刺鲃,青鱼等
11	Shrimp	虾类
12	Mollusk	软体动物,包括螺类、蚌和蚬
13	Meiobenthos	小型底栖动物,包括水蚯蚓和摇蚊幼虫类
14	Zooplankton	浮游动物
15	Phytoplankton	浮游植物
16	Benthic Producer	各种底栖着生藻类、少量的大型水生植物
17	Detritus	有机碎屑

1.2.2 浮游动、植物的生物量和 P/B 系数的估算

1999、2000 年浮游植物的生物量,分别根据文献^[23]和淳安县环保局的监测资料所得叶绿素 a 的年平均值按照常规方法^[28]换算而来,换算方法为:生物量 = 叶绿素 a 含量/0.3%。求得的浮游植物生物量为 mg/L,换算成 T/km^2 ,换算方法:生物量 $\times$ 平均水深;其中的平均水深,根据这两年千岛湖的平均水位,由千岛湖水位与水深回归关系^[2]计算所得,据此所得 1999 年千岛湖平均水深为 27.9 m,2000 年平均水深为 26.2 m。浮游植物的 P/B 系数取 200.75^[25]。

1999 年浮游动物的原始资料来自文献^[22],2000 年资料来自本课题组实测资料。用同样方法将 mg/L 换算成 t/km^2 。

1.2.3 有机碎屑的生物量估算

本研究有机碎屑的生物量按照文献^[29]的方法计算,其中,细菌生物量 = 17.5% 浮游植物生物量,DOC(溶

解有机碳)和 POC(颗粒有机碳)由 Ecopath 内置经验公式计算^[24]。

1.2.4 其他各功能组的生物量和 P/B 系数

由于研究期间,没有虾类、软体动物和小型底栖动物(水蚯蚓、摇蚊幼虫)等的生物量资料,本研究采用由 ECOPATH 计算而来。

虾类和软体动物的 P/B 由 Ecopath 软件内置经验公式计算,水蚯蚓的 P/B 参照太湖生态系统的参数^①。

1.2.5 各功能组的食物消耗量与生物量比(Q/B)或生产量与消耗量比(P/Q)的估算

各种鱼类的 Q/B 由 Palomares 和 Pauly 的经验公式^[30](Ecopath 内置)计算。虾类、浮游动物、软体动物和小型底栖动物的 Q/B 由间接计算而来,方法是: $Q/B = (P/B)/(P/Q)$,其中虾、浮游动物、软体动物和小型底栖动物的 P/Q 的取值则参照一些公认的资料分别为 0.075^[31]、0.05^[32-33]、0.125 和 0.02^[34]。

1.2.6 某些功能组的生态效率(EE)值估算

由于虾、软体动物和着生藻类的生物量没有历史记录或实际监测数据,因此这些参数由 Ecopath 根据能量平衡原理计算,这就必需输入 EE 值。目前,还没有直接测定各种生物的 EE 值的方法,本研究参照其他许多生态系统模型通行的方法^[29,35-36],将虾和软体动物的 EE 假定为 0.95,着生藻类的 EE 定为 0.5。

1.2.7 各功能组的饵料组成

各种鱼类的饵料组成主要来自本研究实测(鲢、鳙、鲩、大眼华鲮、翘嘴鲮等)、千岛湖的相关研究文献^[37-39];银鱼的食性也参照了其他水体中的研究文献^[40-41]。有关浮游动物、螺类、水蚯蚓和虾类的食性参照了其他水体的研究文献^[42-44]。

1.2.8 未同化食物的比例

未同化食物比例的取值及其参考文献出处如下:肉食性鱼类取 0.2,草食性鱼类 0.41^[45-46];虾 0.7^[31],软体动物 0.4,水丝蚓 0.94^[34];浮游动物 0.65^[32-33]。

以上各参数的基本输入数据参见附表 1 和附表 2。

1.3 模型构建软件

本研究使用的生态系统模型软件为 Ecopath with Ecosim 5.0。模型的平衡与调试过程同文献^[25]。

2 结果与讨论

2.1 鲢鳙放养和除鲢对千岛湖主要鱼类的生物量的影响

1999、2000 年千岛湖主要鱼类的生物量变动如图 1 所示。由图 1 可见,除了鲢鳙生物量因人工放养而在 2000 年中大幅度增加和因除鲢导致鳙鱼生物量有一定下降外,其它多种鱼类的生物量也产生了一些响应性变化,如上层鱼类中的鲈类和银鲈、下层鱼类中的大眼华鲮、鲩类和其它鱼类的生物量也有一定的增长。而特别值得关注的是鲈类(翘嘴鲮、蒙古鲮和青梢鲮等),在 1999 和 2000 年进行的大规模清除凶猛鱼类(主要是鳙鱼和翘嘴鲮)中,生物量不但没有减少,反而有所增加,这可能是,一方面,由于鳙(和部分翘嘴鲮)被大量捕捞,减少了对鲈类(主要是蒙古鲮)的捕食压力,促进了其数量的增长;而另一方面,大规模放养鲢鳙鱼种,又为它们提供了丰富的饵料,也有利于其数量的增加。大眼华鲮和鲩类的增加则可能基于这样一些原因,由于鳙和翘嘴鲮数量的减少,降低了对它们的捕食压力,有利于其种群的增加;而大量放养鲢鳙后,降低了水体中的藻类生物量,既直接降低了藻类对水体营养盐的吸收,也提高了水体透明度和改善了光照,从而促进了水体中的底生初级生产者,研究表明,1999 年底栖藻类的生物量为 0.819 t/km²,而 2000 年为 1.125 t/km²(附表 1,附表 2),因而有利于鲩和大眼华鲮的生长。

另外,银鱼的生物量则出现了大幅度的减少。这可能是,一方面,由于清除鳙鱼,使其他一些银鱼捕食者如鲈类和银鲈等随之得到了增加,因此并没有减少对银鱼的捕食压力;另一方面,大量放养的鲢鳙,是银鱼的强大竞争对手,鲢鳙的生物量大,特别是鳙,食量和活动空间也较大,使其生态位与银鱼出现了较大的重叠

① 宋兵. 太湖渔业和环境的生态系统模型研究. 华东师范大学博士学位研究论文, 2004

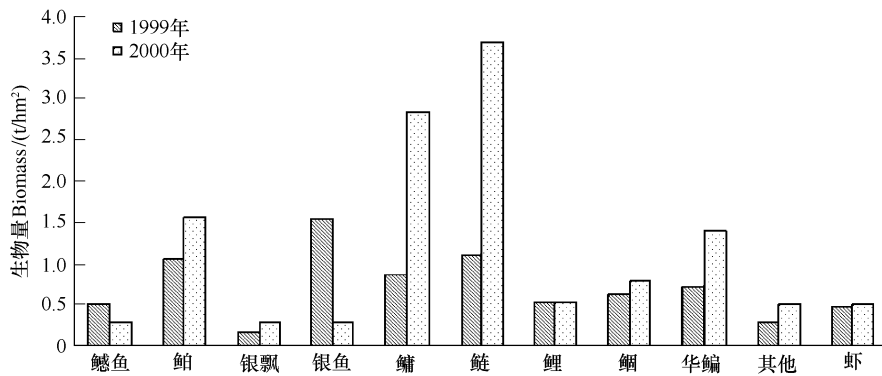


图1 1999和2000年千岛湖大量放养鲢鳙后主要鱼类的生物量变化

Fig. 1 Comparison of the major fish biomass between 1999 and 2000 after mass stocking of silver carp and bighead carp in Lake Qiandaohu

(图3),因此竞争的结果,也导致了银鱼生物量的大幅度下降。

2.2 生态位重叠分析

生态位是现代生态学中表述生物种间关系的最重要概念之一^[47-48]。自从 Grinnell 首次提出了生态位的概念后^[49],其内涵也得到了不断的扩充和发展^[50-51],并且从定性描述发展到定量表达^[52-56]。Ecopath 软件则采用了 Pianka 的方法^[52],可进行捕食者重叠和猎物重叠指数的分析。本研究通过该软件对千岛湖 1999 和 2000 年的营养生态位重叠进行了定量分析,结果如图 2。

对比图 2 可见,1999 年千岛湖各种生物种群之间捕食者生态位重叠和猎物重叠的情况比 2000 年严重,如 1999 年银鲢(功能组 3)和银鱼(4)的捕食者重叠指数为 0.972,食饵(猎物)重叠指数为 0.939,而在 2000 年分别为 0.812 和 0.773;1999 年大眼华鳊(9)和虾(11)的捕食者

重叠指数为 0.839,食饵(猎物)重叠指数为 0.992,2000 年捕食者重叠指数没有重叠,食饵生态位重叠指数为 0.927;1999 年鳊(8)和虾(11)的捕食者重叠指数为 0.897,食饵生态位重叠指数为 0.978,而 2000 年捕食者生态位没有重叠,而食饵生态位重叠指数降低至 0.882。可见 2000 年大量放养鲢鳙后均出现了不同程度的生态位重叠减少现象。从图 2a 可见,捕食者生态位重叠的情况在 1999 年是非常普遍,与此相比,2000 年由于大量放养鲢鳙和降低了鳊鱼生物量后,极大地改变了种群之间的竞争格局,使生态位重叠程度得到了极大的改善(图 2b)。

2.3 混合营养影响(mixed trophic impacts,MTI)分析

混合营养影响(MTI)是分析生态系统内部不同种群相互之间的直接和间接作用的有效途径^[57-59],也是 EwE 软件的基本分析功能之一^[60]。利用 EwE 对千岛湖 1999 年和 2000 年各种群进行混合营养影响分析,结果参见图 3。对比这两年的种间关系可以看出有这样几个显著的差别:1999 年鳊鱼对鲢类有一定的抑制,而 2000 年没有表现出抑制,从而间接促进了鲢类的发展,这与图 1 鱼类生物量的变动情况相符。1999 年较高生物量的鳊鱼对虾类虽有一定的促进作用,但这种作用仍不能与鲢的负影响相抵(图 3a)。1999 年鲢对很多鱼类如鳊、鳙、虾类、鲢类、银鱼、银鲢和鲤鱼等都有负面影响,2000 年则仅对鳊、鳙、鲢类和银鲢有影响,这表明,随着水体中鲢鳙生物量的增加,减轻了凶猛鱼类对其他鱼类的捕食压力。1999 年银鱼对银鱼种群的进一步发展和对浮游动物有一定的负面影响,但促进了浮游植物的发展,而水体中鲢鳙生物量也很低,因而有利于藻类的繁殖,实际上,1999 年千岛湖发生了大面积的水华,而 2000 年银鱼对水体其它生物没有影响。1999 年除了鲢对鳊和红鲢有较弱的促进作用外,鲢和鳙对水体中其它生物群落均没有显著影响,而 2000 年鳙对银鱼产生了一定的抑制,但对凶猛鱼类的发展有一定的促进作用,此外鳙也能使浮游植物、底栖动物和碎屑有一定的增加。但较高的鲢生物量能够遏制藻类的大量繁殖。1999 年鳊和大眼华鳊没有产生影响,而 2000 年鳊对虾类有一定的竞争抑制作用,大眼华鳊则对鲤有一定的竞争抑制。

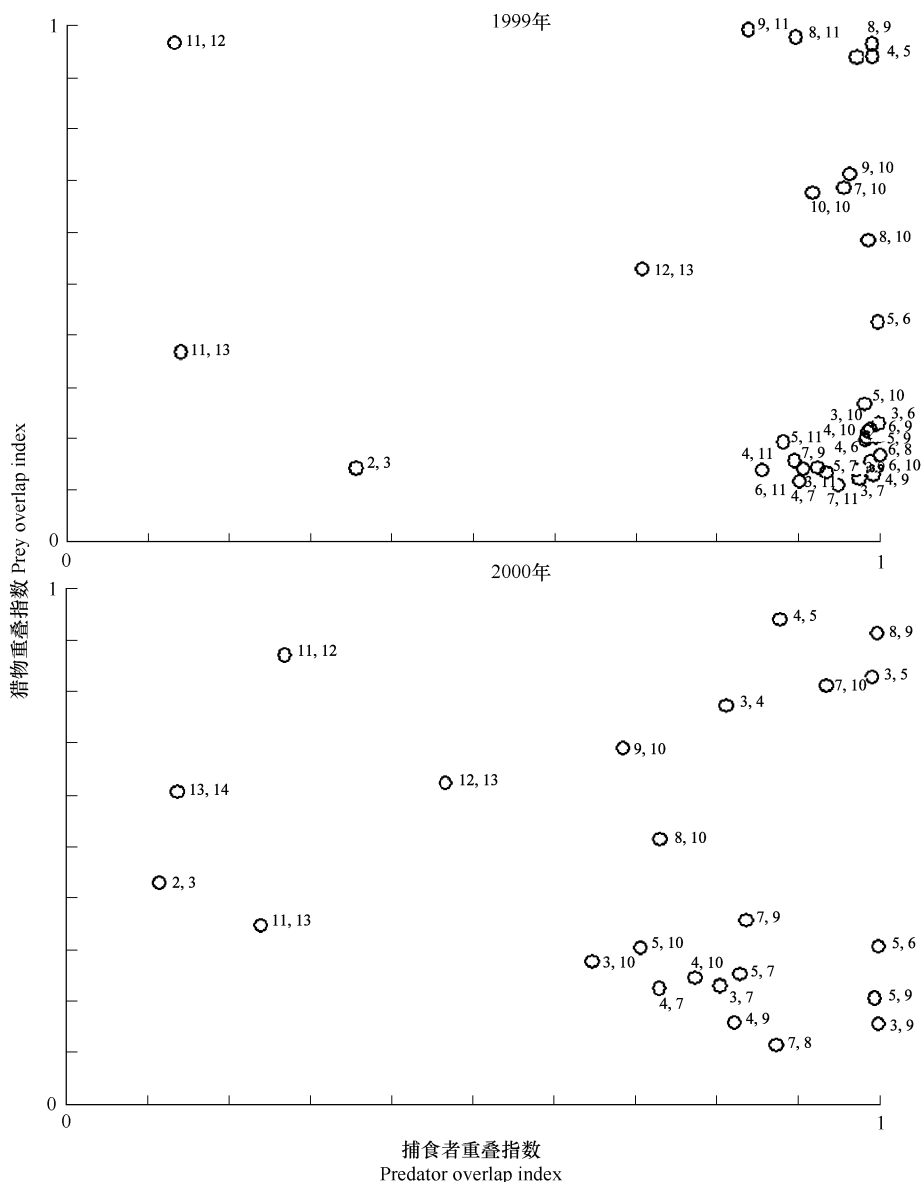


图2 千岛湖营养生态位重叠分析

Fig.2 Analysis of niche overlap in Ecosystem of Lake Qiandaohu in 1999

其中,各功能组代码对应的功能组名分别为:1,鳙;2,鲢;3,鳊;4,银鱼;5,鳙;6,鳊;7,鲤;8,鳊;9,大眼华鳊;10,其它鱼类;11,虾;12,软体动物;13,小型底栖动物;14,浮游动物

3 小结

本研究表明了,实施保水渔业(鳙鳊放养和凶猛鱼类控制)对千岛湖生态系统食物网结构和各种鱼类种间关系均产生了显著的影响。主要表现在:首先,鳙鱼生物量的下降,降低了其对其他鱼类的捕食,从而促进了这些鱼类生物量的增加。而鳙鳊的大规模放养为水体中的顶级消费者(鳙和鳊)提供了充足的饵料,加之鳙鱼生物量的下降减少了对鳊的捕食和饵料竞争,这都有利于鳊成为千岛湖中的第一顶级消费者。同时,鳙鳊生物量的增长,为顶级消费者提供食饵,缓和了肉食性鱼类的竞争,极大地减少了水体中鱼类之间的营养生态位重叠。其次,由于鳙鱼和银鱼的食饵生态位重叠严重,因此,鳙鱼生物量的增加对银鱼构成了激烈的竞争,导致了银鱼生物量的下降,进而减弱了银鱼对浮游动物的抑制作用,从而与较高生物量的鳊一起,充分发挥对藻类的控制作用。此外,鳙鱼的放养也促进了水体中的底栖动物和碎屑的增加,从而间接促进了食底栖动物和食碎屑鱼类(如鲤、鳊和大眼华鳊等)的增长,有利于水体的物质循环和对水质的净化作用。总之,保

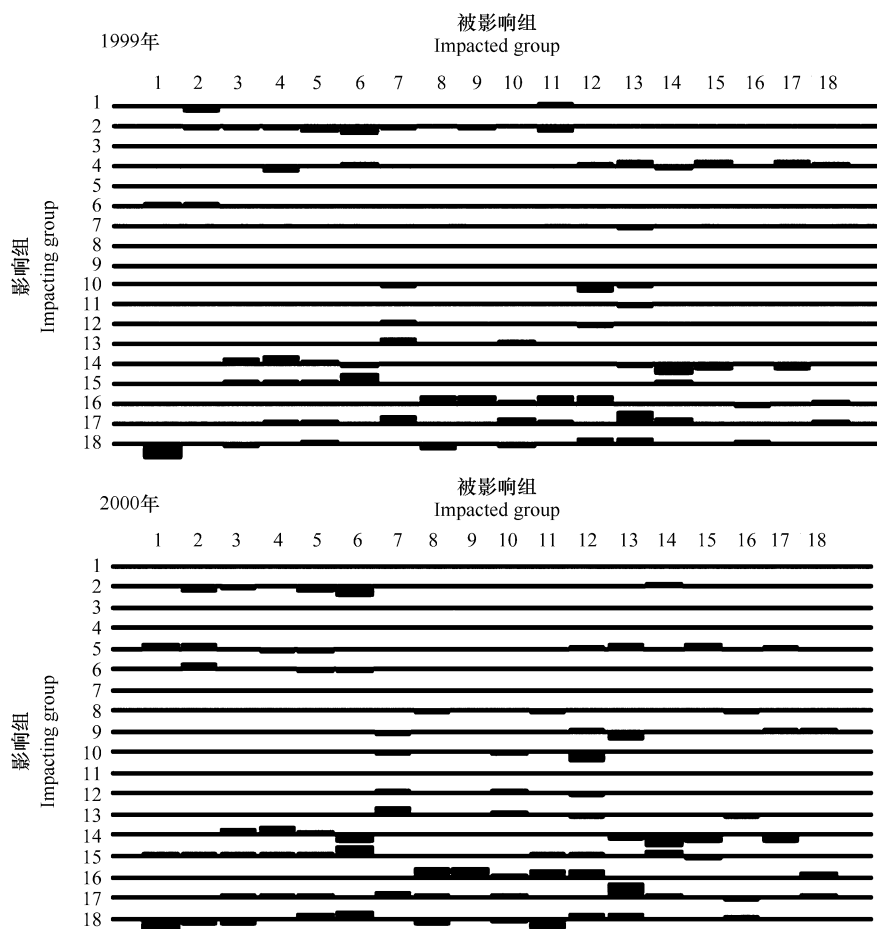


图3 年年千岛湖生态系统各生物种群之间的混合营养影响

Fig. 3 Mixed trophic impacts in Lake Qiandaohu

其中方框位于横线上方表示促进作用,位于下方表示抑制作用,方框的高度与其影响的大小成比例;纵坐标表示产生影响的种群,而横坐标表示受影响种群;各功能组代码对应的功能组名分别为:1,鳃;2,鲃;3,飘鱼;4,银鱼;5,鳊;6,鲢;7,鲤;8,鲴类;9,大眼华鳊;10,其它鱼类;11,虾;12,软体动物;13,小型底栖动物;14,浮游动物;15,浮游植物;16,底栖藻类;17,碎屑;18,捕捞船队

水渔业的实施,使千岛湖的食物网结构更趋合理,有利于营养物在食物网中的再循环和再利用,增强了水体对营养物的净化作用。

致谢:本研究得到了浙江省淳安县农业局、环保局、杭州千岛湖发展有限公司等单位的大力支持和帮助,在此一并致谢。

References:

- [1] Liu Q G, Chen L Q, Chen Y. Correlation between biomass reduction of silver carp and bighead carp and the occurrence of algal blooms in Lake Qiandaohu. Transactions of Oceanology and Limnology, 2007, 1: 117-124.
- [2] Liu Q G, Chen M K, Tong H Y, He G X, Hong R H, Chen L S and Chen L Q. Study on the possible cause of water blooming and the bloom-prevention technology in Lake Qiandaohu. Agricultural Sciences in China, 2004, 3(8): 627-633.
- [3] Januszko M. The effect of three species of phytophagous on algae development. Pol. Arch. Hydrobiol., 1974, 21: 431-454.
- [4] Kajak Z, Rybak J I, Spodniewska I, Godlesski-Lipowa W. Influence of the planktonivorous fish *Hypophthalmichthys molitrix* (Val.) on the plankton and benthos of eutrophic lake. Polish Archives of Hydrobiology., 1975, 22: 301-310.
- [5] Opuszynski K. Silver carp, *Hypophthalmichthys molitrix* (Val.), in carp ponds, 3. Influence on ecosystem. Polish Journal of Ecology, 1979, 27: 117-133.
- [6] Smith D W. Biological control of extensive phytoplankton growth and the enhancement of aquaculture production. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 1985, 42: 1940-1945.

- [7] Spataru P, Gophen M. Feeding behaviour of silver carp *Hypophthalmichthys molitrix* Val. and its impact on the food web in Lake Kinneret. Israel. Hydrobiologia, 1985, 120: 53-61.
- [8] Smith D W. The feeding selectivity of siver carp, *Hypophthalmichthys molitrix* Val. Journal of Fish Biology, 1989, 34: 819-828.
- [9] Shi W L, Jin W H. Effect of Stocking of Silver Carp and Bighead Carp on the EutroDhication in Waters. Journal of Dalian Fisheries University, 1989, 4(3): 11-23.
- [10] Starling F L R and Rocha A J A. Experimental study of the impacts of planktivorous fishes on plankton community and eutrophication of a tropical Brazilian reservoir. Hydrobiologia, 1990, 200/201: 581-591.
- [11] Li Q, Li D S, Xiong B X, Yue M G, Zhang H. Influence of Silver Carp (*Hypophthalmichthys molitrix* C et V) on Plankton Community in Reservior Enclosures. Acta Ecologica Sinica, 1993, 13: 30-37.
- [12] Opuszynski, Shireman K. Opuszynski, Shireman J V, Digestive mechanisms // K. Opuszynski and J. V. Shireman, eds, Herbivorous Fishes: Culture and Use for Weed Management, CRC Press, Boca Raton, FL, 1995: 21-31.
- [13] Ruan J R, Rong K W, Wang S M. Effects of Silver and Bighead Carps on the Structure and Function of Microcosm Ecosystem // Liu J. K. ed. Ecological Study of Donghu Lake (II). Beijing: Science Press, 1995: 360-375.
- [14] Tan Y J, Li J L, Kang C X. Study on the effects of P fertilizer in ponds and the role of silver and bighead carps in controlling aquatic eutrophication // Zhu X. B. and Shi Z. F. eds. Ecological Study on Chinese Fish Ponds. Shanghai: Shanghai scientific and Technical Publishers, 1995: 10-19.
- [15] Domaizon I, devaux J. Experimental study of the impacts of silver carp on plankton communities of eutrophic Villereest reservoir (France). Aquatic Ecology, 1999, 33: 193-204.
- [16] Liu J K, Xie P. Unraveling the enigma of the disappearance of water bloom from the East Lake (Lake Donghu) of Wuhan. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 1999, 8(3): 312-314.
- [17] Lu K H, Yan W J, Su S G. Environmental and ecological engineering on control and remediation of eutrophicated waterbodies: by using ameliorated alum plasma and fishes to control blue-green blooms of qiaodun reservoir. Acta Scientiae Circumstantiae, 2002, 22: 732-737.
- [18] Radke R and Kahl U. Effects of a filter-feeding fish [silver carp, *Hypophthalmichthys molitrix* (Val.)] on phytoplankton in a mesotrophic reservoir; results from an enclosure experiment. Freshwater Biology, 2002, 47: 2337-2344.
- [19] Zhang G H, Cao W X, Chen Y Y. Effects of fish stocking on Lake Ecosystems in China. Acta Hydrobiologica Sinica, 1997, 21(3): 271-280.
- [20] Du B B, Li Y A. Danger risk to fish diversity in Erhai Lake and proposals to dispel it. Research of Environmental Sciences, 2001, 14(3): 42-43, 55.
- [21] He G X, Hong R H, Sang C Q. Study on the fishing gear and fishing methodology for the capture of *Elopichthys bambusa* in Lake Qiandaohu. Reservoir Fisheries, 2002, 22(5): 39-40.
- [22] Li G G, Yu Z M. Community Structure of Zooplankton in Lake Qiandaohu. Acta Ecologica Sinica, 2002, 22(2): 156-162.
- [23] Lü H C, Wang F E, Chen Y X, Yu Z M, Fang Z F, Zhou G D. Multianalysis between chlorophyll — a and environmental factors in Qiandao Lake water. Chinese Journal of Applied Ecology, 2003, 14(8): 1347-1350.
- [24] Christensen V, Walters C J and Pauly D. Ecopath with Ecosim: a User's Guide, October 2000 Edition. Fisheries Centre, University of British Columbia, Vancouver, Canada and ICLARM, Penang, Malaysia. , 2000: 130.
- [25] Liu Q G, Chen Y. The food web structure and ecosystem properties of a filter-feeding carps dominated deep reservoir ecosystem. Ecological Modeling, 2007, 203: 279-289.
- [26] Beverton R J H and Holt S J. On the dynamics of exploited fish populations. Fishery Investigation Series II, Sea Fishery, 1957, 19: 1-533.
- [27] Pauly D. On the interrelationships between natural mortality, growth parameters, and mean environmental temperature in 175 fish stocks. Journal du Conseil international pour l'Exploration de la Mer, 1980, 39: 175-192.
- [28] Zhang J M, He Z H. Handbook for the investigation on the natural fisheries resources of inland waters. Beijing: The Agricultural Press, 1991: 12-169.
- [29] Heymans J J, Shannon L J and Jarre A. Changes in the northern Benguela ecosystem over three decades: 1970s, 1980s and 1990s. Ecological Modelling, 2004, 172: 175-195.
- [30] Pauly D, Christensen V, Dalsgaard J, Froese R, Torres Jr F C. Fishing down marine food webs. Science, 1998, 279 (6): 860-863.
- [31] Halfon E, Schito N, Ulanowicz R E. Energy flow through the lake Ontario food web conceptual model and an attempt at mass balance. Ecological Modelling, 1996, 86: 1-36.
- [32] Park R A. A generalized model for simulating lake ecosystem. Simulation, 1974, 23: 33-50.
- [33] Scavia D, Bloomfield J A, Fisher J S, Nagy J, Park R A. Documentatyon of CLEANX: a generalized model for simulating the open-water ecosystems of lakes. Simulation, 1974, 23: 51-56.
- [34] Yan Y J, Liang Y L. Energy flow of macrozoobenthic community in a Macrophytic lake, Biandantang Lake. Acta Ecologica Sinica, 2003, 23(3): 527-538.
- [35] Blanchard J L, Pinnegar J K, Mackinson S. Exploring marine mammal-fishery interactions using "Ecopath with Ecosim": modeling the Barents Sea ecosystem. Science Series Technological Report, CEFAS Lowestoft, 2002, 117: 52.

- [36] Arias-González J E, Nuñez-Lara E, González-Salas C, Galzin R. Trophic models for investigation of fishing effect on coral reef ecosystems. *Ecological Modelling*, 2004, 172: 197-212.
- [37] Lin S G, Xu C Y, Yang S G. Investigation of Fishery Resources in Xin'anjiang Reservoir. *Freshwater Fisheries*, 1974, 11: 11-15.
- [38] Ma G P. Retrospection and the Current Situation of Fishery Production in Xin'anjiang Reservoir. *Reservoir Fisheries*, 1982, 1: 39-45.
- [39] Chen M K, Tong He-Yi, Yu Tai-Ji, Diao Z S. Fish Resources of Qiantang River. Shanghai: Shanghai scientific and Technical Publishers, 1990.
- [40] Liu Z W, Zhu S Q. Food and Feeding Behavior of Ice-Fish in Dianchi Lake. *Acta Zoologica Sinica*, 1994, 40(3): 253-261.
- [41] Gao Z F, You Y. Feeding of *Neosalanx taihuensis*. *Scientific Fish Farming*, 1998, 10: 23.
- [42] Burn C W. Direct observation of mechanisms regulating feeding behavior of *Daphnia* in lake water. *Int. Revue ges. Hydrobiol.*, 1968, 55: 59-68.
- [43] Gliwicz Z M. Food size selection and seasonal succession of filter feeding zooplankton in an eutrophic lake. *Polish Journal of Ecology*, 1977, 25: 179-225.
- [44] Geller W and Müller H. The filtration apparatus of Cladocera: filter mesh-sizes and their implications of food selectivity. *Oecologia*, 1981, 49: 316-321.
- [45] Winberg G G. Rate of Metabolism and Food Requirements of Fishes. Minsk: Belorussian State University, 1956.
- [46] Brett J R. Fish Physiology. London: Academic Press, 1979.
- [47] Pianka E R. Evolutionary Ecology. New York: Harper and Row Publishers, 1978.
- [48] Giller P S. Community structure and niche. London: Chapman and Hall, 1984.
- [49] Grinnell J. The niche relationships of the California Thrasher. *Auk*, 1917, 34: 427-433.
- [50] Elton C. Animal Ecology. New York: MacMillan Company, 1927.
- [51] Hutchinson G E. Concluding remarks. Cold Spring Harbor Symposium. Quantitative Biology, 1957, 22: 415-427.
- [52] Pianka E R. The structure of lizard communities. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 1973, 4: 53-74.
- [53] Hurlbert S H. The measurement of niche overlap and some relatives. *Ecology*, 1978, 59: 67-77.
- [54] Loman J. Use of overlap indices as competition coefficients: tests with field data. *Ecological Modelling*, 1986, 34: 231-243.
- [55] Cao G. The definition of the niche by fuzzy set theory. *Ecological Modelling*, 1995, 77: 65-71.
- [56] Wang J. The models of niche and their application. *Ecological Modelling*, 1995, 80: 279-291.
- [57] Hannon B. The structure of ecosystems. *Journal of Theoretical Biology*, 1973, 41: 535-546.
- [58] Hannon B and Joiris C. A seasonal analysis of the southern North Sea ecosystem. *Ecology*, 1989, 70(6): 1916-1934.
- [59] Ulanowicz R E, Puccia C J. Mixed trophic impacts in ecosystems. *Coenoses*, 1990, 5: 7-16.
- [60] Christensen V, Pauly D. Ecopath II-a software for balancing steady-state ecosystem models and calculating network characteristics. *Ecological Modelling*, 1992, 61: 169-185.

参考文献:

- [1] 刘其根, 陈立侨, 陈勇. 千岛湖水华发生与主要环境因子的相关性分析. *海洋湖沼通报*, 2007, 1: 117-124.
- [9] 史为良, 金文洪. 放养鲢鳙对水体富营养化的影响. *大连水产学院学报*, 1989, 4(3): 11-23.
- [11] 李琪, 李德尚, 熊邦喜, 岳茂国, 张辉. 放养鲢鱼 (*Hypophthalmichthys molitrix*) 对水库围隔浮游生物群落的影响. *生态学报*, 1993, 13: 30-37.
- [13] 阮景荣, 戎克文, 王少梅. 鲢、鳙对微型生态系统结构与功能的影响//刘建康主编: 东湖生态学研究(二). 北京: 科学出版社, 1995: 360-375.
- [14] 谭玉均, 李家乐, 康春晓. 利用隔离水界研究池塘施磷肥的效果和鲢、鳙控制水域富营养化的作用//朱学宝, 施正峰主编. 中国鱼池生态学研究. 上海: 上海科学技术出版社, 1995: 10-19.
- [16] 刘建康, 谢平. 揭开武汉东湖蓝藻水华消失之谜. *长江流域资源与环境*, 1999, 8(3): 312-314.
- [17] 陆开宏, 晏维金, 苏尚安. 富营养水体治理与修复的环境生态工程——利用明矾浆和鱼类控制桥墩水库蓝藻水华. *环境科学学报*, 2002, 22: 732-737.
- [19] 张国华, 曹文宣, 陈宜瑜. 湖泊放养渔业对我国湖泊生态系统的影响. *水生生物学报*, 1997, 21(3): 271-280.
- [20] 杜宝汉, 李永安. 洱海鱼类多样性危机及解危对策. *环境科学研究*, 2001, 14(3): 42-43, 55.
- [21] 何光喜, 洪荣华, 桑传其. 千岛湖捕鲢渔具渔法研究. *水利渔业*, 2002, 22(5): 39-40.
- [22] 李共国, 虞左明. 千岛湖浮游动物的群落结构. *生态学报*, 2002, 22(2): 156-162.
- [23] 吕焕春, 王飞儿, 陈英旭, 虞左明, 方志发, 周根娣. 千岛湖水体叶绿素 a 与相关环境因子的多元分析. *应用生态学报*, 2003, 14(8): 1347-1350.
- [28] 张觉民, 何志辉. 内陆水域渔业自然资源调查手册. 北京: 农业出版社, 1991: 12-169.
- [34] 闫云军, 梁彦龄. 扁担塘底栖动物群落的能量流动. *生态学报*, 2003, 23(3): 527-538.
- [37] 林颂光, 徐成钰, 杨绍光. 新安江水库渔业资源调查. *淡水渔业*, 1974, 11: 11-15.
- [38] 马国培. 新安江水库渔业生产的回顾和现状. *水利渔业*, 1982, 1: 39-45.

[39] 陈马康, 童合一, 俞泰济, 刁铸山. 钱塘江鱼类资源. 上海: 上海科学技术文献出版社, 1990.

[40] 刘正文, 朱松泉. 滇池产太湖新银鱼食性与摄食行为的初步研究. 动物学报, 1994, 40(3): 253-261.

[41] 高志发, 尤洋. 太湖新银鱼食性. 科学养鱼, 1998, 10: 23.

附表 1 1999 年千岛湖生态系统模型基本输入和估计参数表

Appendix 1 Basic input and estimated parameters of L. Qiandaohu ecosystem model in 1999

组名 Group	生物量 Biomass	捕捞量 Catch	P/B	Q/B	EE	P/Q	未同化 UN/Q	捕食量 Q	生产量 P	被捕食 Consumed
Elopichthys	0.515	0.299	0.980	3.62	0.592	0.271	0.200	1.864	0.505	—
Culter	1.059	0.597	1.054	3.83	0.986	0.275	0.200	4.055	1.116	0.503
Pseudolaubuca	0.165	0.109	1.170	3.97	0.998	0.295	0.200	0.655	0.193	0.084
Icefish	1.543	1.234	2.000	20.66	0.988	0.097	0.200	31.870	3.086	1.814
Bighead carp	0.873	0.283	1.299	7.53	0.986	0.173	0.300	6.576	1.134	0.836
Silver carp	1.105	0.454	1.503	10.19	0.987	0.147	0.410	11.260	1.661	1.185
Common carp	0.531	0.279	1.035	3.55	0.984	0.292	0.200	1.884	0.550	0.261
Xenocypris	0.615	0.547	1.360	14.70	0.976	0.093	0.410	9.041	0.836	0.27
Sinibrama	0.732	0.518	1.360	14.70	0.969	0.093	0.410	10.753	0.996	0.446
Other fish	0.353	0.279	1.198	12.00	0.982	0.100	0.200	4.238	0.423	0.136
Shrimp	0.504	0.199	1.830	24.40	0.950	0.075	0.700	12.307	0.922	0.678
Mollusk	1.426	0.199	2.400	19.20	0.950	0.125	0.400	14.150	3.422	1.482
Meiobenthos	0.890	—	4.030	201.5	0.950	0.020	0.940	179.426	3.587	3.409
Zooplankton	45.672	—	15.81	316.2	0.058	0.050	0.650	14441.49	722.074	41.848
Phytoplankton	45.198	—	200.75	—	0.876	—	—	—	9073.499	7952.126
Benthic Producer	0.819	—	80.00	—	0.500	—	—	—	65.52	32.742
Detritus	17.15	—	—	—	0.586	—	—	—	11416.11	6691.748

附表 2 2000 年千岛湖生态系统模型基本输入和估计参数表

Appendix 2 Basic input and estimated parameters of L. Qiandaohu ecosystem model in 2000

组名 Group	生物量 Biomass	捕捞量 Catch	P/B	Q/B	EE	P/Q	未同化 UN/Q	捕食量 Q	生产量 P	被捕食 Consumed
Elopichthys	0.284	0.16	0.980	3.62	0.592	0.271	0.200	1.027	0.0377	—
Culter	1.556	0.88	1.054	3.83	0.637	0.275	0.200	5.959	2.064	0.166
Pseudolaubuca	0.281	0.19	1.170	3.97	0.809	0.295	0.200	1.115	0.545	0.080
Icefish	0.302	0.24	2.000	20.66	0.932	0.097	0.20	6.233	—	0.321
Bighead carp	2.839	0.24	1.299	7.53	0.765	0.173	0.300	21.378	6.257	2.580
Silver carp	3.675	0.33	1.503	10.19	0.631	0.147	0.410	37.448	2.285	3.155
Common carp	0.522	0.27	1.035	3.55	0.712	0.292	0.200	1.855	0.217	1.111
Xenocypris	0.801	0.71	1.360	14.70	0.856	0.093	0.410	11.778	2.022	0.220
Sinibrama	1.395	0.99	1.360	14.70	0.923	0.093	0.410	20.512	3.974	0.764
Other fish	0.501	0.39	1.198	12.00	0.870	0.100	0.200	6.006	0.416	0.126
Shrimp	0.147	0.22	1.830	24.40	0.950	0.075	0.700	3.594	1.596	0.037
Mollusk	1.823	0.22	2.400	19.20	0.950	0.125	0.400	18.080	1.548	1.929
Meiobenthos	1.438	—	4.030	201.5	0.950	0.020	0.940	289.769	38.289	5.506
Zooplankton	31.43	—	15.81	316.2	0.061	0.050	0.650	9938.166	162.859	30.068
Phytoplankton	29.947	—	200.75	—	0.915	—	—	—	4103.33	5502.875
Benthic Producer	1.125	—	80.00	—	0.500	—	—	—	306.16	44.995
Detritus	11.84	—	—	—	0.611	—	—	—	6582.905	4769.992