

养殖水环境对中华绒螯蟹不同营养供给模式的响应

程建新¹ 宋学宏² 吴林坤¹ 杨彩根² 蔡春芳² 曹 萍¹

(1. 江苏省太湖渔业管理委员会, 苏州 215004; 2. 苏州大学生命科学学院, 苏州 215123)

摘要:以初始体重为 (9.67 ± 0.47) g/只的二龄中华绒螯蟹为实验对象,采用正交设计法 $L_9(3^4)$ 将水体水草覆盖率、活螺蛳投放量、饵料中动物性饵料比例、投饵方式等 4 个因子设计成 9 种营养供给模式,每个模式设 3 个重复,在东太湖围养区 27 个独立网围 (6m \times 5m \times 2.5m, 20 只蟹/格)中进行为期 240d 的养殖实验,对各网围养殖水体的水化学指标、浮游生物动态变化进行比较研究。结果表明,在中华绒螯蟹放养密度相同的条件下,不同的营养供给模式显著影响养殖水体水质和浮游生物多样性,其中模式 4 (水草覆盖率为 70%,螺蛳投放量为 4500kg/ha,动物性饵料比例为 50%,投饵方式为全程投喂,其中 5 月底前为 7.5%,6 月开始为 5%)的养殖水体中的 DO、COD_{Cr}、TP、TN、NH₄⁺-N、NO₂⁻-N 等水质指标值均优于国家地表水环境质量标准 (GB3838-2002)的Ⅲ类水水质标准,也显著优于网围外非养殖区 (航道)的水质。浮游生物“指示群落”和“马加利夫多样性指数”分析结果也显示,模式 4 的水体生物多样性显著高于非养殖区,水质属于寡污型。方差分析结果显示,4 个因子对水质影响作用的顺序为:水草覆盖率 > 投饵方式 > 螺蛳投放量 > 动物性饵料比例;将 4 个因子与主要水质指标 COD_{Cr}、TP、TN、Chl *a*、浮游生物多样性指数等参数进行回归分析,表明水体水草覆盖率、投饵方式等因子与这些参数关系密切,筛选出有益于湖泊生态保护的中华绒螯蟹养殖的适宜营养供给模式:水草覆盖率为 66%—76%、投饵方式为全程投喂 7.5%—5.0%、螺蛳投放量为 9000kg/ha、动物性饵料比例为 50%。

关键词:中华绒螯蟹;营养供给模式;水环境

中图分类号: S945 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-3207(2008)05-0657-12

网围养蟹是近年来我国湖泊渔业利用重要组成部分,也给广大养殖者带来较高的经济效益。但是随着养殖规模的不断扩大、单位面积养殖密度的不断增加,对水生态环境的负面影响越来越突出,现已引起政府有关部门和研究者的重视^[1-4]。如何在保持湖泊生态环境前提下,开发利用草型湖泊渔业资源,是急需研究和解决的问题。金刚等对草型湖泊中华绒螯蟹养殖容量进行了初步研究^[5],得出草型湖泊中华绒螯蟹对沉水植物生长不构成显著影响的最大产量密度为 29.25kg/ha²,但关于中华绒螯蟹网围养殖过程中不同营养供给模式对水环境的影响还未见报道。

东太湖是太湖东南隅的一个湖湾,面积 131.25km²,平均水深 1.5m,水位稳定,水草繁茂,是

典型的草型湖泊。1984 年开始网围养殖,经历了高密度集约型到生态效益型养殖,养殖品种从食草型鱼类到中华绒螯蟹为主的发展过程,现中华绒螯蟹生态网围养殖已成为东太湖的一种重要养殖方式。对近 400 个养殖户调查结果显示,中华绒螯蟹养殖模式为:二龄蟹种的放养密度为 6000—7500 只/ha;不断从水草繁茂地带取草补充,使网围内保持一定覆盖率;投喂天然的玉米、小麦、活螺蛳和低值海淡水鱼类,养殖全过程不施渔药。但由于水草覆盖率、动植物性饵料比例、投喂量、投饵方式的不同,中华绒螯蟹的成长指标、品质均不同,有些网围中华绒螯蟹肝胰腺发生病变,发病网围的水质污染程度较正常网围高^[5]。本试验在中华绒螯蟹放养密度一致 (6675 只/ha)的情况下,研究养殖水环境对不同水

收稿日期: 2006-12-20;修订日期: 2007-11-29

基金项目: 国家农业科技跨越计划项目“优质河蟹标准化生产体系示范”;江苏省社会发展项目 (BS2006021);苏州市农业科技招标项目 (ZN0308)资助

作者简介:程建新 (1960—),男,汉族,江苏无锡人;硕士;主要从事太湖渔业资源管理、大水面养殖研究工作。Tel: 0512-68261224; E-mail: cjsx600108@163.com

通讯作者:宋学宏, Tel: 0512-65880178; E-mail: xuehongsong0943@sina.com

草覆盖率、动植物性饵料比例、投喂量的响应,旨在弄清不同营养供给模式对水环境的影响,探索高效益、低污染的养殖模式,为实现湖泊渔业可持续发展提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究地点选择和网围设置 研究地点设在东太湖养殖 8 区,该区常年平均水深为 1.17m,换水周期约为 10d^[6]。建造 27 个网围,东西向排列,规格为 6m ×5m ×2.5m,竹竿、铁丝、网片、石龙等构成;采用双层网片围隔,外层网衣用常规养蟹用的 9 股 7 号网,内层采用聚乙烯无结密眼网,养殖几天后水体有机物将网眼基本堵满,使网围与外湖间可以进行水交换,但浮游生物很难通过,使养殖试验在半封闭式条件下进行。

1.2 实验方法 按正交设计表 $L_9(3^4)$ 将水体水草覆盖率、活螺蛳投放量、饵料中动物性饵料比例、投饵方式等 4 个因子设计成 9 种营养供给模式(表 1),每个模式设 3 个重复。2 月份从外湖引进水草,选择蟹喜食且易得的金鱼藻、聚草、伊乐藻等品种栽种^[7],植株间距为 40—50cm,种植面积分别为网围面积的 70%、30%、0%;在 3 月初投放活螺蛳,投放量分别为 9000kg/ha、4500kg/ha、0kg/ha;饵料中动物性饵料比例分别为 100%、50%、0%,其中动物性饵料为冰鲜海水鱼及少量新鲜淡水鱼,植物性饵料中玉米 60%、小麦 40%;投饵方式为: 全程投喂,5 月底前投喂量均为体重的 7.5%,6 月后投喂体重的 5%; 全程投喂,投喂量均为体重的 5%; 5 月至 9 月中旬投喂,投喂量均为体重的 5%。

表 1 中华绒螯蟹饲养正交试验方案 $L_9(3^4)$
Tab. 1 The orthogonal experimental design $L_9(3^4)$ for raising Chinese mitten crab

模式 Model	水草覆盖率 Coverage of aquatic plants (%)	螺蛳投放量 The input of live snail (kg/ha)	动物性饵料比例 The ratio of animal based feed to total feed (%)	投饵方式 Feed casting patterns
1	1 (70)	1 (9000)	3 (0)	2 (5%, 全程投)
2	2 (30)	1 (9000)	1 (100)	1 (5月底前为 7.5%, 6月开始为 5%, 全程投)
3	3 (0)	1 (9000)	2 (50)	3 (5%, 5—9月投)
4	1 (70)	2 (4500)	2 (50)	1 (5月底前为 7.5%, 6月开始为 5%, 全程投)
5	2 (30)	2 (4500)	3 (0)	3 (5%, 5—9月投)
6	3 (0)	2 (4500)	1 (100)	2 (5%, 全程投)
7	1 (70)	3 (0)	1 (100)	3 (5%, 5—9月投)
8	2 (30)	3 (0)	2 (50)	2 (5%, 全程投)
9	3 (0)	3 (0)	3 (0)	1 (5月底前为 7.5%, 6月开始为 5%, 全程投)

1.3 二龄蟹种的选择、放养及日常管理 试验蟹为当地养殖户网围中的二龄蟹种。挑选体质健壮、体重 (9.67 ±0.47) g/只的 540 只蟹种直接进行实验,放养量为 6675 只/ha (即 20 只/网围),蟹种随机放入网围。饵料投喂每天 2 次,上午投 30%,下午 4—5 点为 70%。试验从 3 月 20 日开始,至 11 月 20 日结束 (240d)。

1.4 水样的采集与处理 3 月下旬放养蟹种后,早期网围内中华绒螯蟹载重量小,水温低,水质均较好,不同模式对水质影响不大。因此从 5 月开始直到中华绒螯蟹收获后的 12 月,每月 20 日左右在各网围中采集水样进行分析,并在距养殖网围 100m 以外的非养殖区采样作对照。水样按文献 [8] 的方法采集,每个网围设一个点,采样点选在各网围中央;浮游生物的定性定量分析按文献 [9] 方法进行,主要水环境化学指标的测定方法分别为:用碘量法

(GB 7489-89)测定溶氧 (DO)、用德国默克公司的 NOVA 60A 多参数自动水质分析仪测定化学耗氧量 (COD_{Cr})、钼酸铵分光光度法 (GB 11893-89)测定总磷 (TP)、碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法测定总氮 (TN)、水杨酸分光光度法 (GB 7481-87)测定铵态氮 (NH₄⁺-N)、重氮偶合比色法测定亚硝态氮 (NO₂⁻-N)、乙醇萃取法^[10]测定叶绿素 *a* (Chl *a*)。

1.5 数据处理 生物多样性采用马加利夫生物多样性表达方法进行,其表达式为: $D = (S - 1) / \ln N$, 其中 *D* 为多样性指数; *S* 为浮游动 (植) 物种类数; *N* 为浮游动 (植) 物个体总数^[11]。

采用 SPSS13.0 for Windows 对所得数据进行方差分析,若差异达显著,进行 Duncan's 多重比较,显著性水平为 *p* < 0.05。用回归方法来分析水草覆盖率、动物性饲料比例、螺蛳投放量与水环境指标及生

物多样性指数之间的相关关系^[12]。

2 结果与分析

2.1 不同营养供给模式的中华绒螯蟹养殖水体水化学指标变化

分别将 5 月到 12 月测得的 TP、TN、NH₄⁺-N、NO₂⁻-N、DO、COD_{Cr}、Chl *a* 等水化学指标进行平均 (表 2)。参照我国《地表水环境质量标准 GB3838-2002》湖泊水库特定项目标准值及太湖富营养化程度评价标准^[13],本试验中各种营养供给模式的中华绒螯蟹

养殖水体水化学指标均在Ⅲ类水左右,属于中营养水平,与太湖流域管理局水文水资源监测局 2005 年一季度太湖流域水资源质量检测结果一致,表明本试验设计的养殖密度对环境压力较小,水体自稳能力较强。但分析各网围中水环境化学指标结果显示,不同营养供给模式之间存在显著差异,其中模式 4 水质最好,TP、TN、NH₄⁺-N、NO₂⁻-N、COD_{Cr}、Chl *a* 值均最低,而 DO 值最高,除了 TN 与 Chl *a* 值在Ⅲ类与Ⅳ类水之间以外,其余指标基本达Ⅲ类水。而模式 6 的水质相对最差,各项指标数据接近或超过Ⅳ类水。

表 2 不同营养供给模式对养殖水体水环境化学指标的影响
Tab. 2 The effects of different feeding models for Chinese mitten crab on water quality parameters

模式 Model	TP (μg/L)	TN (mg/L)	NH ₄ ⁺ -N (mg/L)	NO ₂ ⁻ -N (μg/L)	DO (mg/L)	COD _{Cr} (mg/L)	Chl <i>a</i> (μg/L)
1	12.38 ±0.23 ^a	0.55 ±0.01 ^b	0.15 ±0.01 ^b	3.60 ±0.11 ^a	8.26 ±0.11 ^b	17.43 ±1.02 ^b	8.74 ±0.21 ^{bc}
2	13.54 ±0.13 ^b	0.54 ±0.02 ^b	0.17 ±0.00 ^b	3.80 ±0.09 ^{ab}	8.58 ±0.12 ^a	17.43 ±0.91 ^b	8.41 ±0.14 ^{ab}
3	17.50 ±0.51 ^{cd}	0.59 ±0.01 ^b	0.17 ±0.01 ^b	4.40 ±0.13 ^c	7.90 ±0.09 ^c	17.98 ±1.31 ^c	9.20 ±0.25 ^{bc}
4	12.50 ±0.31 ^a	0.46 ±0.02 ^a	0.10 ±0.01 ^a	3.60 ±0.16 ^a	8.45 ±0.14 ^a	16.46 ±1.03 ^a	8.12 ±0.31 ^a
5	15.50 ±0.34 ^{bc}	0.65 ±0.01 ^c	0.19 ±0.00 ^{bc}	3.90 ±0.11 ^{ab}	8.19 ±0.16 ^b	18.17 ±0.89 ^{cd}	9.05 ±0.24 ^{cd}
6	20.00 ±0.63 ^d	0.73 ±0.01 ^d	0.24 ±0.00 ^d	4.00 ±0.14 ^b	7.79 ±0.13 ^c	18.74 ±1.31 ^d	9.43 ±0.75 ^e
7	14.93 ±0.42 ^b	0.59 ±0.03 ^b	0.16 ±0.00 ^b	3.80 ±0.11 ^{ab}	8.36 ±0.06 ^{ab}	17.48 ±1.42 ^{bc}	8.51 ±0.45 ^{ab}
8	16.25 ±0.62 ^c	0.61 ±0.01 ^{bc}	0.18 ±0.01 ^{bc}	4.20 ±0.08 ^{bc}	8.23 ±0.21 ^b	17.63 ±1.03 ^{bc}	9.61 ±0.17 ^e
9	18.38 ±1.31 ^d	0.65 ±0.02 ^c	0.20 ±0.01 ^c	4.30 ±0.09 ^{bc}	8.09 ±0.16 ^{bc}	18.16 ±0.99 ^{cd}	9.21 ±0.19 ^{de}
0	16.35 ±0.60 ^c	0.61 ±0.02 ^{bc}	0.17 ±0.001 ^b	4.12 ±0.08 ^b	8.29 ±0.10 ^b	17.72 ±1.00 ^{bc}	9.14 ±0.21 ^{cd}

注:表中模式“0”为非养殖区对照组;所给数据为 5 月至 12 月各指标所测值的平均数及标准误,平均数后不同的上标表示差异显著 ($p < 0.05$)。表 5 同

Note: In the table, “0” refers to the control of non-culture areas; the values given in the table are the average values and their standard errors of measured values from May to December. The different superscripts with the average values denotes significant difference ($p < 0.05$). It is the same as in the Tab. 5

2.2 不同营养供给模式的养殖水体浮游生物种群结构和季节演替

在 5—12 月间共检测到 62 种浮游植物、48 种浮游动物。其中浮游植物优势种有微囊藻、细菱形藻、花环锥囊藻、飞燕角甲藻、盘星藻、尖异极藻、隐头舟形藻、颤藻等 (表 3)。对照津田松苗列出的污水指标生物^[14],本试验各养殖水体属于中污带 (轻污)到寡污带水。只有在 8 月高温季节出现中污带 (中污)的指标浮游植物小颤藻和泥生颤藻。但各营养模式间优势种群季节演替存在差异。表 3 显示,10 月下旬当水温下降到 25℃ 以下时,水体优势种由微囊藻转为花环锥囊藻,但微囊藻消退的速率却不同,其中模式 1、2、4、9 到 11 月份基本检测不到微囊藻,转而出现了普通黄丝藻、小黄丝藻等寡污带指标植物,而模式 3、6 的水体到 12 月还有 5% 的微囊藻。浮游动物的优势种群主要是无节幼体和轮虫,其演替情况 (表 4)与浮游植物相似,浮游动物的

优势种群为无节幼体、针簇多肢轮虫、前节晶囊轮虫、螺形龟甲轮虫、长圆疣毛轮虫、曲腿龟甲轮虫、没尾无柄轮虫。对照轮虫指标生物划分水体污染程度的原则^[13,15,16],本试验养殖水体属于中污带到寡污带水。表 4 还显示,寡污带指标生物没尾无柄轮虫在模式 2、4、7、9 的网围内 9 月份就出现了,而模式 3、6 的网围内到 12 月才出现。综合分析,模式 2、4、9 的水体生态修复能力较强,而模式 3、6 则较差。

2.3 不同营养供给模式的养殖水体浮游生物多样性比较

浮游生物多样性指数 *D* 值的变化较好地反映了不同营养供给模式的养殖水体污染程度 (表 5)。模式 2、4 的浮游动 (植)物多样性指数分别为 4.48 (4.85)、2.96 (3.20),均优于其他各组 and 对照区 ($p < 0.05$);而模式 3、6 的动 (植)物生物多样性指数显著地小于其他组及对照区 ($p < 0.05$),分别为

表3 不同营养供给模式的养殖水体浮游植物优势种群动态变化
Tab. 3 The dynamic fluctuations of dominant phytoplankton species in culturing water bodies under different feeding models for Chinese mitten crab

Time Model	May	Jun	Jul	Aug	Sept	Oct	Nov	Dec
1	优势种	微囊藻(41)	微囊藻(40)	微囊藻(36)	微囊藻(40)	花环锥囊藻(39)	花环锥囊藻(38)	花环锥囊藻(41)
		细菱形藻(24)	蓝纤维藻(17)	小颤藻(17)	尖异极藻(17)	微囊藻(25)	普通黄丝藻(19)	小异极藻(12)
		飞燕角甲藻(12)	空球藻(8)	针杆藻(10)	盘星藻(11)	隐头舟形藻(15)	小异极藻(16)	双缝藻(8)
		小颤藻(7)	水绵(7)	盘星藻(9)	隐头舟形藻(7)	水绵(8)	蓝纤维藻(8)	桥穹藻(7)
		美丽星杆藻(5)				盘星藻(5)	桥穹藻(5)	转板藻(6)
2	种类数	31	39	33	42	36	39	35
	优势种	细菱形藻(32)	微囊藻(40)	微囊藻(34)	微囊藻(41)	花环锥囊藻(35)	花环锥囊藻(39)	花环锥囊藻(43)
		微囊藻(15)	细菱形藻(36)	小颤藻(12)	隐头舟形藻(17)	微囊藻(23)	尖异极藻(18)	桥穹藻(9)
		小黄丝藻(8)	飞燕角甲藻(11)	针杆藻(11)	尖异极藻(13)	隐头舟形藻(9)	桥穹藻(9)	转板藻(9)
		针杆藻(8)	蓝纤维藻(7)	单鞭金藻(5)	针杆藻(8)	盘星藻(8)	水绵(5)	尖异极藻(6)
3	种类数	30	40	38	43	38	42	42
	优势种	细菱形藻(32)	微囊藻(45)	微囊藻(40)	微囊藻(41)	花环锥囊藻(37)	花环锥囊藻(38)	花环锥囊藻(46)
		微囊藻(31)	细菱形藻(28)	小颤藻(13)	盘星藻(14)	微囊藻(26)	普通黄丝藻(12)	尖异极藻(14)
		针杆藻(9)	飞燕角甲藻(14)	针杆藻(8)	颗粒直链藻(10)	隐头舟形藻(18)	尖异极藻(12)	普通黄丝藻(8)
		飞燕角甲藻(5)	针杆藻(7)	颗粒直链藻(7)	针杆藻(7)	盘星藻(9)	盘星藻(7)	针杆藻(5)
4	种类数	31	32	24	28	28	29	31
	优势种	小黄丝藻(32)	微囊藻(35)	微囊藻(36)	微囊藻(43)	花环锥囊藻(39)	花环锥囊藻(41)	花环锥囊藻(48)
		微囊藻(16)	飞燕角甲藻(14)	小颤藻(12)	隐头舟形藻(19)	微囊藻(22)	普通黄丝藻(21)	尖异极藻(10)
		细菱形藻(12)	小黄丝藻(12)	胶四抱藻(8)	无常蓝纤维藻(7)	隐头舟形藻(11)	蓝纤维藻(8)	桥穹藻(8)
		飞燕角甲藻(6)	细菱形藻(12)	华丽实球藻(6)	颗粒直链藻(5)	针杆藻(5)	尖异极藻(6)	盘星藻(6)
5	种类数	33	47	37	34	49	47	48
	优势种	胶刺藻(5)	胶刺藻(8)	黄丝藻(4)	小颤藻(4)	蓝纤维藻(4)	盘星藻(5)	双缝藻(5)
		针杆藻(41)	微囊藻(39)	微囊藻(38)	微囊藻(40)	花环锥囊藻(36)	花环锥囊藻(39)	花环锥囊藻(42)
		微囊藻(25)	针杆藻(21)	华丽实球藻(10)	针杆藻(11)	微囊藻(23)	普通黄丝藻(16)	尖异极藻(17)
		飞燕角甲藻(10)	飞燕角甲藻(14)	小颤藻(8)	蓝纤维藻(5)	隐头舟形藻(15)	尖异极藻(13)	盘星藻(7)
		蓝纤维藻(8)	水花拟鱼腥藻(10)	针杆藻(6)	蓝纤维藻(5)	盘星藻(9)	蓝纤维藻(8)	桥穹藻(6)
		细菱形藻(5)	蓝纤维藻(7)	颗粒直链藻(4)	颗粒直链藻(7)	盘星藻(4)	微囊藻(7)	

续表

Time Model	May	Jun	Jul	Aug	Sept	Oct	Nov	Dec
6	种类数	41	35	30	34	35	33	34
	优势种	微囊藻(47)	微囊藻(45)	微囊藻(38)	微囊藻(45)	花环锥囊藻(36)	花环锥囊藻(35)	花环锥囊藻(48)
		飞燕角甲藻(23)	小颤藻(13)	小颤藻(10)	盘星藻(9)	微囊藻(27)	普通黄丝藻(13)	桥穹藻(15)
		蓝纤维藻(10)	大颤藻(12)	蓝纤维藻(7)	盘星藻(14)	盘星藻(14)	微囊藻(12)	尖异极藻(12)
		颗粒直链藻(7)	泥生颤藻(7)	水绵藻(6)	水绵(8)	水绵(8)	桥穹藻(7)	转板藻(6)
7		直链(5)	蓝纤维藻(7)	盘星藻(4)			泥生颤藻(5)	微囊藻(5)
	种类数	33	28	23	23	25	26	27
	优势种	微囊藻(37)	微囊藻(36)	微囊藻(35)	微囊藻(41)	花环锥囊藻(35)	花环锥囊藻(37)	花环锥囊藻(47)
		飞燕角甲藻(23)	小颤藻(11)	针杆藻(10)	盘星藻(10)	微囊藻(25)	普通黄丝藻(15)	蓝纤维藻(11)
		针杆藻(11)	大颤藻(10)	小颤藻(4)	尖异极藻(10)	尖异极藻(10)	微囊藻(13)	桥穹藻(7)
8		针杆藻(7)	泥生颤藻(9)		蓝纤维藻(6)		尖异极藻(6)	双缝藻(5)
		颗粒直链藻(5)	空球藻(8)				桥穹藻(5)	
	种类数	45	38	35	35	33	45	45
	优势种	微囊藻(39)	微囊藻(37)	微囊藻(35)	微囊藻(40)	花环锥囊藻(33)	花环锥囊藻(39)	花环锥囊藻(46)
		飞燕角甲藻(22)	大颤藻(12)	水绵(15)	盘星藻(10)	微囊藻(28)	普通黄丝藻(12)	桥穹藻(12)
9		蓝纤维藻(10)	小颤藻(10)	小颤藻(10)	隐头舟形藻(5)	隐头舟形藻(13)	尖异极藻(11)	尖异极藻(11)
		颗粒直链藻(13)	泥生颤藻(10)	泥生颤藻(9)	桥穹藻(5)	盘星藻(8)	微囊藻(11)	小颤藻(5)
		大颤藻(7)	空球藻(9)				桥穹藻(7)	普通黄丝藻(4)
	种类数	36	37	31	43	43	34	34
	优势种	微囊藻(36)	微囊藻(39)	微囊藻(33)	微囊藻(43)	花环锥囊藻(39)	花环锥囊藻(40)	花环锥囊藻(47)
		飞燕角甲藻(24)	大颤藻(14)	小颤藻(14)	盘星藻(12)	微囊藻(25)	桥穹藻(11)	桥穹藻(11)
		颗粒直链藻(22)	空球藻(12)	水绵(11)	小颤藻(11)	盘星藻(10)	尖异极藻(11)	尖异极藻(10)
		蓝纤维藻(7)	小颤藻(9)	泥生颤藻(5)	隐头舟形藻(10)	大颤藻(8)	普通黄丝藻(9)	蓝纤维藻(8)
		四尾栅列藻(5)			泥生颤藻(5)	泥生颤藻(5)	颗粒直链藻(6)	转板藻(6)
	种类数	33	35	27	36	40	38	32

注:1. 学名:细菱形藻(*N. acicularis*)、微囊藻(*Microcystis*)、飞燕角甲藻(*Ceratium hirundinella*)、蓝纤维藻(*Melosira culeate*)、泥生颤藻(*O. limosa*)、四尾栅列藻(*S. quadricauda*)、隐头舟形藻(*Navicula cryptocephala*)、水绵(*Spirogyra*)、水华鱼腥藻(*Anabaena flos-aquae*)、盘星藻(*O. princeps*)、小颤藻(*O. tenuis*)、花环锥囊藻(*D. sertularia*)、桥穹藻(*Cymbella*)、尖异极藻(*G. acuminatum*)、转板藻(*Mougeotia*)、普通黄丝藻(*T. vulgare*); 2. 括号内数据为优势度(%)。The numbers inside parentheses represent the dominance(%)

表 4 不同营养供给模式的养殖水体浮游动物优势种群动态变化
Tab. 4 The dynamic fluctuations of dominant zooplankton species in culturing water bodies under different feeding models for Chinese mitten crab

Time Model	May	Jun	Jul	Aug	Sept	Oct	Nov	Dec
1	优势种	无节幼体 (33)	无节幼体 (36)	无节幼体 (40)	针簇多肢轮虫 (48)	螺形龟甲轮虫 (46)	螺形龟甲轮虫 (30)	长圆疣毛轮虫 (49)
		针簇多肢轮虫 (12)	针簇多肢轮虫 (30)	针簇多肢轮虫 (28)	无节幼体 (15)	针簇多肢轮虫 (26)	长圆疣毛轮虫 (23)	螺形龟甲轮虫 (18)
		前节晶囊轮虫 (9)	桡足幼体 (7)	长圆疣毛轮虫 (9)	长圆疣毛轮虫 (9)	无节幼体 (7)	曲腿龟甲轮虫 (11)	针簇多肢轮虫 (5)
		桡足幼体 (8)	前节晶囊轮虫 (5)	巨腕轮虫 (7)	桡足幼体 (4)	没尾无柄轮虫 (4)	没尾无柄轮虫 (7)	没尾无柄轮虫 (5)
		叉角拟聚花轮虫 (5)	螺形龟甲轮虫 (3)	桡足幼体 (6)	巨腕轮虫 (3)	曲腿龟甲轮虫 (4)	针簇多肢轮虫 (7)	跃进三肢轮虫 (2)
2	种类数	38	30	27	38	33	26	36
	优势种	无节幼体 (31)	无节幼体 (35)	无节幼体 (40)	针簇多肢轮虫 (60)	螺形龟甲轮虫 (46)	螺形龟甲轮虫 (41)	长圆疣毛轮虫 (43)
		针簇多肢轮虫 (14)	针簇多肢轮虫 (33)	针簇多肢轮虫 (40)	无节幼体 (16)	针簇多肢轮虫 (27)	针簇多肢轮虫 (14)	螺形龟甲轮虫 (20)
		前节晶囊轮虫 (9)	针棘匣壳虫 (8)	巨腕轮虫 (7)	长圆疣毛轮虫 (5)	无节幼体 (6)	长圆疣毛轮虫 (12)	针簇多肢轮虫 (9)
		桡足幼体 (8)	长圆疣毛轮虫 (5)	长圆疣毛轮虫 (6)	桡足幼体 (4)	没尾无柄轮虫 (4)	蒲达臂尾轮虫 (8)	没尾无柄轮虫 (5)
3	种类数	39	31	28	39	34	26	38
	优势种	无节幼体 (32)	针簇多肢轮虫 (39)	无节幼体 (53)	针簇多肢轮虫 (62)	螺形龟甲轮虫 (41)	螺形龟甲轮虫 (34)	长圆疣毛轮虫 (40)
		针簇多肢轮虫 (17)	无节幼体 (33)	针簇多肢轮虫 (28)	无节幼体 (22)	针簇多肢轮虫 (27)	长圆疣毛轮虫 (20)	螺形龟甲轮虫 (24)
		前节晶囊轮虫 (10)	前节晶囊轮虫 (5)	巨腕轮虫 (9)	长圆疣毛轮虫 (8)	蒲达臂尾轮虫 (9)	针簇多肢轮虫 (10)	针簇多肢轮虫 (5)
		桡足幼体 (8)	针棘匣壳虫 (5)	长圆疣毛轮虫 (3)	舞跃无柄轮虫 (3)	无节幼体 (7)	曲腿龟甲轮虫 (9)	蒲达臂尾轮虫 (5)
4	种类数	31	27	23	26	33	23	31
	优势种	无节幼体 (31)	针簇多肢轮虫 (44)	无节幼体 (50)	针簇多肢轮虫 (50)	螺形龟甲轮虫 (44)	长圆疣毛轮虫 (30)	长圆疣毛轮虫 (51)
		针簇多肢轮虫 (14)	无节幼体 (29)	针簇多肢轮虫 (23)	无节幼体 (16)	针簇多肢轮虫 (26)	螺形龟甲轮虫 (25)	螺形龟甲轮虫 (16)
		前节晶囊轮虫 (9)	舞跃无柄轮虫 (5)	腕轮虫 (7)	长圆疣毛轮虫 (4)	蒲达臂尾轮虫 (10)	曲腿龟甲轮虫 (8)	针簇多肢轮虫 (5)
		桡足幼体 (8)	针棘匣壳虫 (4)	长圆疣毛轮虫 (7)	没尾无柄轮虫 (3)	无节幼体 (6)	没尾无柄轮虫 (8)	没尾无柄轮虫 (5)
5	种类数	37	32	28	38	35	29	43
	优势种	无节幼体 (35)	无节幼体 (37)	无节幼体 (49)	针簇多肢轮虫 (53)	螺形龟甲轮虫 (35)	螺形龟甲轮虫 (31)	长圆疣毛轮虫 (41)
		针簇多肢轮虫 (15)	针簇多肢轮虫 (25)	针簇多肢轮虫 (31)	无节幼体 (14)	针簇多肢轮虫 (22)	长圆疣毛轮虫 (17)	螺形龟甲轮虫 (20)
		桡足幼体 (9)	桡足幼体 (9)	巨腕轮虫 (8)	桡足幼体 (5)	蒲达臂尾轮虫 (8)	针簇多肢轮虫 (17)	针簇多肢轮虫 (7)
		针棘匣壳虫 (7)	长圆疣毛轮虫 (4)	长圆疣毛轮虫 (3)	长圆疣毛轮虫 (5)	无节幼体 (8)	蒲达臂尾轮虫 (8)	蒲达臂尾轮虫 (6)
		圆钵沙壳虫 (4)	针棘匣壳虫 (3)	舞跃无柄轮虫 (2)	舞跃无柄轮虫 (4)	没尾无柄轮虫 (4)	曲腿龟甲轮虫 (6)	没尾无柄轮虫 (6)

续表

Time Model	May	Jun	Jul	Aug	Sept	Oct	Nov	Dec
种类数	40	28	28	16	33	35	25	31
优势种	无节幼体(37) 针簇多肢轮虫(24) 长圆疣毛轮虫(6) 螺形龟甲轮虫(6) 四齿单趾轮虫(12)	针簇多肢轮虫(54) 无节幼体(27) 长圆疣毛轮虫(4) 螺形龟甲轮虫(3) 巨腕轮虫(3)	无节幼体(55) 巨腕轮虫(13) 针簇多肢轮虫(9) 舞跃无柄轮虫(8) 桡足幼体(6)	无节幼体(49) 针簇多肢轮虫(33) 巨腕轮虫(4) 舞跃无柄轮虫(3) 长圆疣毛轮虫(2)	针簇多肢轮虫(52) 无节幼体(24) 舞跃无柄轮虫(8) 长圆疣毛轮虫(4) 巨腕轮虫(3)	螺形龟甲轮虫(34) 针簇多肢轮虫(28) 蒲达臂尾轮虫(9) 无节幼体(9) 曲腿龟甲轮虫(4)	螺形龟甲轮虫(50) 长圆疣毛轮虫(14) 曲腿龟甲轮虫(10) 针簇多肢轮虫(7) 蒲达臂尾轮虫(6)	长圆疣毛轮虫(45) 螺形龟甲轮虫(15) 没尾无柄轮虫(8) 针簇多肢轮虫(8) 蒲达臂尾轮虫(5)
种类数	31	27	22	16	25	24	23	30
优势种	无节幼体(37) 针簇多肢轮虫(205) 针棘匣壳虫(8) 长圆疣毛轮虫(5) 桡足幼体(5)	针簇多肢轮虫(35) 无节幼体(32) 针棘匣壳虫(7) 长圆疣毛轮虫(6) 桡足幼体(4)	无节幼体(70) 巨腕轮虫(12) 桡足幼体(5) 舞跃无柄轮虫(3) 囊形单趾轮虫(3)	无节幼体(49) 针簇多肢轮虫(27) 巨腕轮虫(9) 长圆疣毛轮虫(4) 舞跃无柄轮虫(3)	针簇多肢轮虫(53) 无节幼体(18) 没尾无柄轮虫(9) 长圆疣毛轮虫(4) 螺形龟甲轮虫(4)	螺形龟甲轮虫(43) 针簇多肢轮虫(20) 蒲达臂尾轮虫(13) 没尾无柄轮虫(5) 无节幼体(4)	螺形龟甲轮虫(31) 针簇多肢轮虫(15) 长圆疣毛轮虫(14) 曲腿龟甲轮虫(9) 桡足幼体(5)	长圆疣毛轮虫(45) 螺形龟甲轮虫(21) 针簇多肢轮虫(8) 恩氏筒壳虫(5) 没尾无柄轮虫(5)
种类数	34	29	25	20	30	31	33	42
优势种	无节幼体(36) 针簇多肢轮虫(16) 桡足幼体(8) 长圆疣毛轮虫(6) 湖沼似铃壳虫(5)	无节幼体(48) 针簇多肢轮虫(20) 桡足幼体(8) 长圆疣毛轮虫(6) 剑水蚤(5)	无节幼体(56) 巨腕轮虫(12) 针簇多肢轮虫(7) 舞跃无柄轮虫(7) 桡足幼体(3)	无节幼体(47) 针簇多肢轮虫(26) 巨腕轮虫(5) 长圆疣毛轮虫(3) 刺盖异尾轮虫(3)	针簇多肢轮虫(51) 无节幼体(22) 舞跃无柄轮虫(8) 长圆疣毛轮虫(5) 桡足幼体(2)	螺形龟甲轮虫(40) 针簇多肢轮虫(26) 蒲达臂尾轮虫(8) 无节幼体(7) 没尾无柄轮虫(3)	螺形龟甲轮虫(34) 长圆疣毛轮虫(26) 针簇多肢轮虫(13) 曲腿龟甲轮虫(9) 蒲达臂尾轮虫(5)	长圆疣毛轮虫(53) 螺形龟甲轮虫(11) 恩氏筒壳虫(6) 蒲达臂尾轮虫(5) 没尾无柄轮虫(4)
种类数	31	28	25	19	37	38	27	32
优势种	无节幼体(38) 针簇多肢轮虫(29) 针棘匣壳虫(4) 巨腕轮虫(5) 盖氏晶囊轮虫(4)	无节幼体(41) 针簇多肢轮虫(39) 针棘匣壳虫(4) 巨腕轮虫(4) 长圆疣毛轮虫(3)	无节幼体(60) 巨腕轮虫(13) 针簇多肢轮虫(6) 桡足幼体(6) 长圆疣毛轮虫(4)	无节幼体(48) 针簇多肢轮虫(28) 长圆疣毛轮虫(10) 巨腕轮虫(3) 桡足幼体(2)	针簇多肢轮虫(56) 无节幼体(19) 没尾无柄轮虫(5) 长圆疣毛轮虫(5) 桡足幼体(4)	螺形龟甲轮虫(36) 针簇多肢轮虫(22) 蒲达臂尾轮虫(9) 无节幼体(7) 没尾无柄轮虫(4)	螺形龟甲轮虫(37) 长圆疣毛轮虫(23) 曲腿龟甲轮虫(11) 针簇多肢轮虫(7) 蒲达臂尾轮虫(4)	长圆疣毛轮虫(47) 螺形龟甲轮虫(11) 没尾无柄轮虫(6) 恩氏筒壳虫(6) 梨形沙壳虫(4)
种类数	33	28	17	21	36	32	32	37

注:1. 学名:无节幼体(Nauplius)、针簇多肢轮虫(*Polyarthra trigla*)、长圆疣毛轮虫(*Synchaeta oblonga*)、螺形龟甲轮虫(*Keratella cochlearis*)、四齿单趾轮虫(*M. quadidentata*)、针棘匣壳虫(*Centropyxis culcate*)、桡足幼体(Nauplius larva)、湖沼似铃壳虫(*T. Lacustris*)、巨腕轮虫(*Pedalia*)、前节晶囊轮虫(*A. priodonta*)、盖氏晶囊轮虫(*Ascomorpha ecaudis*)、恩氏筒壳虫(*Tintinnidium entzii*)、梨形沙壳虫(*D. pyriformis*)、舞跃无柄轮虫(*A. saltans*)、蒲达臂尾轮虫(*B. budapestiensis*)、曲腿龟甲轮虫(*K. ualga*)、剑水蚤(*Cyclops*)、大肚须足轮虫(*Euchlaena dilatata*)、叉角拟聚花轮虫(*Conochiloides ossuarius*) ; 2. 括号内数据为优势度(%) The numbers inside parentheses represent the dominance (%)

3.73 (3.28)、2.11 (1.87),证明模式 2、4 对水体污染较轻而模式 3、6 对水体污染较重。按照东太湖水体质量,结合本次水化学指标及指标生物检测分析结果,把 Margalef 浮游植物多样性指数 D 值划分成 5 个水质等级:0—1 为重度污染,1—2 为严重污染,2—2.5 为中度污染,2.5—3.5 为轻度污染,3.5 以

上为寡污水体。动物多样性 D 值也划分成 5 个水质等级:0—1 为重度污染,1—2 为严重污染,2—4 为中度污染,4—5 为轻度污染,5 以上为寡污水体。依据这种等级划分标准,9 种营养供给模式的养殖水体水质可排序如下:模式 3、6 属中污水,模式 4 接近寡污水,其余属轻污水。

表 5 不同营养供给模式对水体浮游生物多样性指数的影响
Tab. 5 The effects of different feeding models for Chinese mitten crab on the plankton diversity index

模式 Model	浮游植物 Phytoplankton			浮游动物 Zooplankton		
	种数	密度 ($\times 10^4$ ind/L)	浮游植物多样性指数 D	种数	密度 (ind/L)	浮游动物多样性指数 D
1	37	56.07 \pm 1.56 ^b	2.72 \pm 0.02 ^b	30	809.04 \pm 8.98 ^b	4.33 \pm 0.03 ^b
2	40	51.97 \pm 2.01 ^a	2.96 \pm 0.05 ^{ab}	31	804.82 \pm 7.65 ^b	4.48 \pm 0.03 ^{ab}
3	29	59.47 \pm 1.49 ^c	2.11 \pm 0.10 ^c	27	1064.15 \pm 5.21 ^c	3.73 \pm 0.02 ^c
4	43	49.49 \pm 1.32 ^a	3.20 \pm 0.07 ^a	33	733.31 \pm 2.99 ^a	4.85 \pm 0.01 ^a
5	35	56.84 \pm 1.46 ^b	2.57 \pm 0.03 ^{bc}	28	845.67 \pm 7.01 ^c	4.01 \pm 0.04 ^{bc}
6	26	63.29 \pm 2.09 ^d	1.87 \pm 0.01 ^{cd}	24	1111.64 \pm 5.09 ^e	3.28 \pm 0.05 ^d
7	39	55.18 \pm 1.37 ^b	2.87 \pm 0.04 ^{ab}	30	856.12 \pm 8.61 ^c	4.29 \pm 0.00 ^b
8	37	59.22 \pm 1.71 ^c	2.71 \pm 0.01 ^b	29	942.15 \pm 4.43 ^d	4.23 \pm 0.02 ^b
9	35	59.30 \pm 1.26 ^c	2.56 \pm 0.02 ^{bc}	29	978.13 \pm 6.55 ^{de}	4.07 \pm 0.01 ^{bc}
0	36	60.83 \pm 1.21 ^c	2.63 \pm 0.01 ^{bc}	30	940.11 \pm 4.03 ^d	4.24 \pm 0.03 ^b

从各营养模式水体生物多样性指数季节变化(图 1、2)结果表明,模式 2、4 在养殖后期生物多样性的恢复程度和恢复速率均优于其他各组及对照组 ($p < 0.05$),而模式 3、6 的生物多样性恢复程度和恢复速率却十分迟缓。这一结果与各模式之间污水指标生物及水化学指标的变化趋势一致。值得一提的是模式 7,在养殖中期 8 月前的生物多样性不高,但从 9 月份以后其生物多样性指数上升很快。我们对试验蟹的生长情况也进行了分析,发现模式 7 的回捕率、增肉倍数与模式 4 接近,分别达 70% 和 18.13 倍^[17],说明模式 7 饲料利用率较高,散失在水体的较少,因而减轻了对水体的污染。

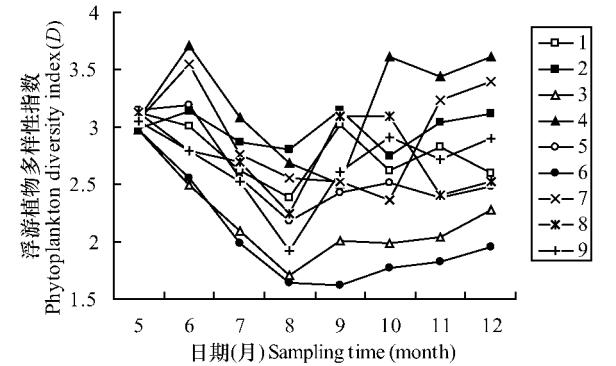


图 1 9 种不同营养供给模式养蟹水体浮游植物多样性指数的动态变化
Fig. 1 The dynamic fluctuations of phytoplankton diversity index under nine different feeding models for Chinese mitten crab

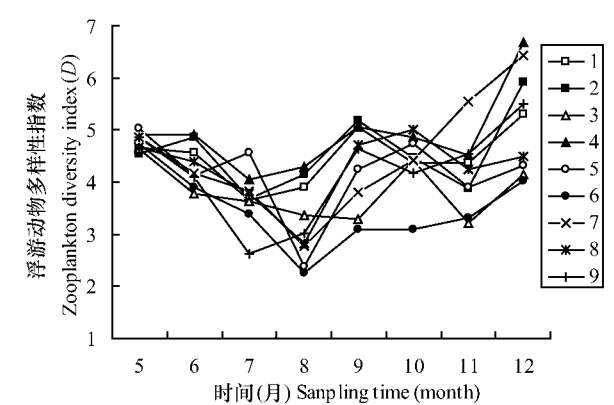


图 2 9 种不同营养供给模式养蟹水体浮游动物多样性指数的季节变化
Fig. 2 The dynamic fluctuations of zooplankton diversity index under nine different feeding models for Chinese mitten crab

2.4 中华绒螯蟹生态养殖较适宜的营养供给模式

对试验结果进行有重复观察值的多因子方差分析并进行多重比较(表 6)。结果显示,水草覆盖率对养殖水体浮游生物多样性及主要水化学指标 COD_{Cr} 、TN、TP、Chl a 的作用最大 ($p < 0.05$),可判定为影响水质的主要因子,其中 70% 的覆盖率为最好;投饵方式对 TN、Chl a 的影响达显著水平 ($p < 0.05$),其作用仅次于水草覆盖率,其中以 5 月前投 7.5%,从 6 月开始到销售投 5% 为最好;螺蛳的投放量及动物性饵料的比例对养殖水体浮游生物多样性

性及主要水化学指标的影响未达显著水平。综合 4 个因子对养殖水体水质作用结果,其影响顺序为:水草覆盖率 >投饵方式 >螺蛳投放量 >动物性饵料比例,其较适宜的组合为模式 4。

表 6 各营养因子对水质指标、生物多样性影响的分析统计
Tab. 6 The effects of nutritional factors on the water quality and biodiversity by statistical analysis

指标 Parameters 营养因子 Nutritional factors			浮游植物 <i>D</i> 值		浮游动物 <i>D</i> 值		COD _{Cr} (mg/L)	TN (mg/L)	TP (μg/L)	Chl <i>a</i> (μg/L)
			<i>D</i> value of phytoplankton	<i>D</i> value of zooplankton						
水草覆盖率 The coverage of aquatic plants (%)	Level	70	2.99	4.70	17.12	0.53	13.27	8.46		
		30	2.82	4.44	17.74	0.60	15.10	8.98		
		0	2.23	3.81	18.29	0.65	18.63	9.16		
	Range		0.76	0.89	1.17	0.12	5.36	0.70		
	Better level		P ₁	P ₁	P ₁	P ₁	P ₁	P ₁		
	Variance analysis		<i>p</i> < 0.05	<i>p</i> < 0.05	<i>p</i> < 0.05	<i>p</i> < 0.05	<i>p</i> < 0.05	<i>p</i> < 0.05		
螺蛳投放量 The input of live snail (kg/ha)	Level	9000	2.65	4.39	17.61	0.56	14.47	8.66		
		4500	2.63	4.25	17.79	0.61	16.00	8.87		
		0	2.77	4.31	17.76	0.61	16.52	9.07		
	Range		0.14	0.14	0.18	0.05	2.05	0.41		
	Better level		S ₃	S ₁	S ₁	S ₁	S ₁	S ₁		
	Variance analysis		<i>p</i> = 0.728	<i>p</i> = 0.767	<i>p</i> = 0.613	<i>p</i> = 0.125	<i>p</i> = 0.112	<i>p</i> = 0.123		
动物性饵料比例 The percentage of animal based feed (%)	Level	100	2.61	4.24	17.88	0.62	16.16	8.78		
		50	2.76	4.35	17.36	0.55	15.42	8.81		
		0	2.67	4.38	17.92	0.62	15.43	9.00		
	Range		0.15	0.14	0.56	0.07	0.74	0.22		
	Better level		A ₂	A ₃	A ₂	A ₂	A ₂	A ₁		
	Variance analysis		<i>p</i> = 0.713	<i>p</i> = 0.771	<i>p</i> = 0.088	<i>p</i> = 0.066	<i>p</i> = 0.58	<i>p</i> = 0.424		
投饵方式 Feed casting patterns	Level	1	2.94	4.64	17.35	0.55	14.81	8.58		
		2	2.51	4.11	17.94	0.63	16.21	9.22		
		3	2.60	4.21	17.88	0.61	15.98	8.80		
	Range		0.43	0.53	0.59	0.08	1.40	0.64		
	Better level		F ₁	F ₁	F ₁	F ₁	F ₁	F ₁		
	Variance analysis		<i>p</i> = 0.264	<i>p</i> = 0.223	<i>p</i> = 0.073	<i>p</i> < 0.05	<i>p</i> = 0.287	<i>p</i> < 0.05		
因子主次顺序 Factors in the order of importance			P ₁ F ₁ A ₂ S ₃	P ₁ F ₁ S ₁ A ₃	P ₁ F ₁ A ₂ S ₁	P ₁ F ₁ A ₂ S ₁	P ₁ S ₁ F ₁ A ₂	P ₁ F ₁ S ₁ A ₁		

注:综合影响作用顺序:水草覆盖率 >投饵方式 >螺蛳投放量 >动物性饵料比例,最佳组合为:P₁F₁S₁A₂
Note: As evaluated by their comprehensive effects, the order of the four factors is listed as follows: the coverage of aquatic plants > feed casting patterns > the input of live snail > the percentage of animal based feed. The best combination is P₁F₁S₁A₂

在本试验范围内,4个因子与养殖水体的水化学指标及生物多样性有一定的相关关系。将表 6 中不同水平间差异显著 ($p<0.05$)的各因子与 COD_{Cr}、TN、TP、Chl a 等到化学指标及生物多样性指数之间进行回归发现:本试验养殖水体的水草覆盖率 (X_1)与 COD_{Cr}、TN、TP、Chl a 之间呈线性关系,水草覆盖率较优水平为 70%;与浮游植物 (Y_1)、浮游动物 (Y_2)多样性指数 D 之间有近似于抛物线分布, $Y_1 =$

$2.745 + 0.459X_1 - 0.210X_1^2$ ($r=0.847, p=0.023$),当水草覆盖率为 66%时,浮游植物 D 值最高; $Y_2 = 4.593 + 0.295X_1 - 0.185X_1^2$ ($r=0.8, p=0.029$),当水草覆盖率为 76%时,浮游动物 D 值最高。投饵方式与 TN、Chl a 之间呈线性关系,第 1 种投饵方式的 TN 及 Chl a 值最低。

综合以上结果,本试验使养殖水体污染较低的中华绒螯蟹营养供给模式为:水草覆盖率为 66%—

76%、投饵方式为全程投喂 7.5%—5.0%、螺蛳投放量为 9000kg/ha、动物性饵料比例为 50%。

3 讨论

3.1 中华绒螯蟹养殖中各营养因子与养殖水体生态的关系

网围养蟹对湖泊水体造成一定程度污染^[1-4,18],这主要源于散失在水体未被利用的饲料、蟹粪及被蟹夹断的水草腐屑等有机物。国内外研究证明,浮游生物多样性在淡水生态系统中起着重要作用^[15,16,19-21]。因此,采用水化学与浮游生物多样性指数综合评价营养供给模式对养殖水体生态影响具有重要的生态学意义。

在中华绒螯蟹养殖生产中,水草既可作为隐蔽物防止中华绒螯蟹脱壳遭受其他敌害生物侵袭或自残^[22];又可作为养殖蟹植物性饵料补充和维生素及微量元素来源^[23];更重要的是吸收水中氮、磷,并藉光合作用产生氧气^[24],从而调节水质、改善水生态环境^[25]。本研究在二龄蟹养殖密度及蟹种规格一致的情况下,分析了水草覆盖率、动植物性饵料比例、投喂量、投饵方式等 4 个因子综合作用造成的养殖水体生态变化,发现水草覆盖率是影响水生态环境的主要因子,水草覆盖率高的实验组水体总磷、总氮、铵态氮、亚硝态氮、叶绿素等含量相对较低,具有较好的净水作用,这与童昌华等^[26]研究结果也一致。投饵方式是仅次于水草覆盖率的影响水环境的第二大因子,Montoya, *et al.* 用不同投饵模式喂养南美养白对虾时发现,投饵量太多,大量残饵沉积在池底腐败氧化,严重影响水质^[27],因此,适宜投饵量不但可节约饵料成本,而且保护了水生态环境。本研究采用的全程投饵、早期和中后期分别投喂体重的 7.5%和 5.0%的投饵方式,水质较好,表明这种投饵方式中华绒螯蟹对饵料利用率较高,残饵少。有趣的是,从整个养殖周期饵料投入量看,第 3 种模式投饵量最少,但水体总磷、总氮、叶绿素等体现污染程度的指标值反而高于投饵量最高的第 1 种模式,这是因为模式 3 前期不投饵又没有水草,因而造成中华绒螯蟹营养缺乏而成活率下降^[17]。但 6 月份开始的投饵量是按照蟹初始放养数量推算的,实际投饵量高,饲料大量散失造成水体污染,因此种好水草、养殖前期投饵是中华绒螯蟹生态养殖获得成功的必备条件。此外,螺蛳投放量及动物性饵料比例也在一定程度上影响养殖水环境。

3.2 中华绒螯蟹营养供给模式与养殖水体生态及其自净速率的关系

中华绒螯蟹为杂食性偏肉食性动物,野生状态下以大型水生植物、藻类、原生动物、轮虫、节肢动物、环节动物、软体动物、鱼类和颗粒碎屑为食。当一定的蟹种放养密度下,养殖水体中水草覆盖率、动植物饵料比例、螺蛳投放量、投饵方式等因子综合作用影响着水质和中华绒螯蟹养殖效果。当完全投喂动物性饵料和养殖水体没有水草时,残饵的高污染与缺少水草净化功能的双重作用导致水体中度污染,总磷、总氮水平最高,浮游生物多样性恢复程度和速率也最低,相应地养殖效果也最差,这与 Montoya, *et al.* 对南美白对虾集约化养殖模式研究结果一致^[27]。当水体中有一定数量水草和螺蛳,且动物性饵料比例及投饵方式适宜时,其综合作用使水体污染程度较低,模式 2 的水体接近寡污染水,浮游生物多样性恢复的程度和速率最高,养殖效果也最好。

3.3 有利于湖泊渔业可持续发展的适宜的中华绒螯蟹营养供给模式

根据各营养因子对水质指标、生物多样性及其演替速率的影响结果显示,模式 4 的养殖水体水质最好,生物多样性恢复速率最快。经进一步统计分析发现,对水体污染轻、养殖效果好、有利于湖泊渔业可持续发展的适宜的中华绒螯蟹营养供给模式为:水草覆盖率为 66%—76%、投饵方式为全程投喂 7.5%—5.0%、螺蛳投放量为 9000kg/ha、动物性饵料比例为 50%。

参考文献:

- [1] Yang Z F, Shi W G, Chen L Q, *et al* Effect of pen fish culture on the ecological environment of Taihu Lake [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2004, 37(6): 928—932 [杨再福, 施伟纲, 陈立侨, 等. 网围养殖对太湖生态环境的影响. 中国农业科学, 2004, 37(6): 928—932]
- [2] Wu Q L, Chen K N, Hu Y H, *et al* Impacts of pen crab farming on environment in East Lake Taihu [J]. *Agro-Environmental Protection*, 2001, 20(6): 432—434, 442 [吴庆龙, 陈开宁, 胡耀辉, 等. 东太湖中华绒螯蟹网围养殖的环境效应. 农业环境保护, 2001, 20(6): 432—434, 442]
- [3] Guan Y L, Chen Y, Zu G Z Effects of pen culture of the Chinese crab on the main ecological factors and fisheries [J]. *Reservoir Fisheries*, 2001, 21(1): 47—48 [管远亮, 陈宇, 祖国掌. 围栏养蟹对湖区主要生态因子及渔业的影响. 水利渔业, 2001, 21(1): 47—48]
- [4] Gu X H, Wang X R. Effect of fishery development on water envi-

- ronment and its eco-countermeasure in East Lake Taihu [J]. *Shanghai Environmental Science*, 2003, **22** (10): 702—704, 711 [谷孝鸿, 王晓蓉. 东太湖渔业发展对水环境的影响及其生态对策. 上海环境科学, 2003, **22** (10): 702—704, 711]
- [5] Song X H, Cheng J X, Zhu M X, *et al* Studies on the pathogenic factors of albinism in hepatopancreas of Chinese mitten crab *Eriocheir sinensis* (Decapoda: Grapsidae) [J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2007, **14** (5): 762—769 [宋学宏, 程建新, 朱茂晓, 等. 中华绒螯蟹肝胰腺白化症的病因研究. 中国水产科学, 2007, **14** (5): 762—769]
- [6] 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 [金刚, 李钟杰, 谢平. 草型湖泊河蟹养殖容量初探. 水生生物学报, 2003, **27** (4): 345—351]
- [7] Chen H S. It is urgent to protect the water environment in East Lake Taihu [J]. *Water Resources Protection*, 2000, **61** (3): 17—20 [陈荷生. 东太湖水环境保护迫在眉睫. 水资源保护, 2000, **61** (3): 17—20]
- [8] Jin X C, Tu Q Y. The standard methods in lake eutrophication investigation [M]. Beijing: China Environmental Science Press 1990 [金相灿, 屠清英. 湖泊富营养化调查规范. 北京: 中国环境科学出版社. 1990]
- [9] Zhang Z S, Huang X F. Methods for study on freshwater plankton [M]. Beijing: Academic Press 1991 [章宗涉, 黄祥飞. 淡水浮游生物研究方法. 北京: 科学出版社. 1991]
- [10] Yang C G, Song X H, Sun B Y. Comparison of simple methods for extraction and measurement of phytoplanktonic chlorophyll-*a* [J]. *Marine Sciences*, 2007, **31** (1): 6—9 [杨彩根, 宋学宏, 孙丙耀. 浮游植物叶绿素 *a* 含量简易测定方法的比较. 海洋科学, 2007, **31** (1): 6—9]
- [11] Margalef D R. Information theory in ecology [J]. *General Systems*, 1958, **3**: 36—71
- [12] Xue W. SPSS statistical method and application [M]. Beijing: Publishing House of Electronic Industry. 2004 [薛薇. SPSS统计分析方法及应用. 北京: 电子工业出版社. 2004]
- [13] Huang Y Y. Pollution ecology of inland waters [M]. Beijing: Science Press 2001 [黄玉瑶. 内陆水域污染生态学. 北京: 科学出版社. 2001]
- [14] Dalian Fisheries College. Freshwater Hydrobiology [M]. Beijing: China Agricultural Press 1985 [大连水产学院主编. 淡水生物学. 北京: 农业出版社. 1985]
- [15] Xiong J L, Mei X G, Hu Z L. Relationship between the trophication classification and the community structure of rotifers in four lakes [J]. *Chinese Journal of Zoology*, 2003, **38** (6): 8—14 [熊金林, 梅兴国, 胡传林. 湖北四湖泊营养类型与轮虫群落的关系. 动物学杂志, 2003, **38** (6): 8—14]
- [16] Li G G, Yu Z M. Community structure of rotifera and ecological assessment of water quality in Qiandao Lake [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2003, **15** (2): 169—176 [李共国, 虞左明. 千岛湖轮虫群落结构及水质生态学评价. 湖泊科学, 2003, **15** (2): 169—176]
- [17] Song X H, Yang C G, Cheng J X, *et al* Effects of different feeding models on growth of Chinese mitten crabs and their relation to its incidence of hepatopancreas albinism [J]. *Journal of Fisheries of China*, 2007, **31** (4): 496—503 [宋学宏, 杨彩根, 程建新, 等. 不同营养供给模式对中华绒螯蟹生长及肝胰腺白化症发病率的影响. 水产学报, 2007, **31** (4): 496—503]
- [18] Bai X L, Gu X H, Yang L Y. Analyses on water quality and its protection in East Lake Taihu [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2006, **18** (1): 91—96 [白秀玲, 谷孝鸿, 杨龙元. 东太湖水环境现状及保护对策. 湖泊科学, 2006, **18** (1): 91—96]
- [19] Lambou V W, Taylor W D, Hem S C, *et al* Comparisons of trophic state measurements [J]. *Water Research*, 1983, **17**: 1619—1626
- [20] Zhan Y T, Yang C S, Fan Z N. Study on interrelation between distribution of phytoplankton and water pollution in Fugu River [J]. *China Environmental Science*, 1991, **11** (1): 29—33 [詹玉涛, 杨昌述, 范正年. 釜溪河浮游植物分布及其水质污染的相关性研究. 中国环境科学, 1991, **11** (1): 29—33]
- [21] Xu M Q. Evaluation of self-purification efficiency of Fuhe Stream-Baiyangdian Lake through zooplankton [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 1996, **20** (3): 212—220 [许木启. 从浮游动物群落结构与功能的变化看府河—白洋淀水体的自净效果. 水生生物学报, 1996, **20** (3): 212—220]
- [22] Wang H Z, Wang H J, Liang X M, *et al* Stocking models of Chinese mitten crab (*Eriocheir japonica sinensis*) in Yangtze lakes [J]. *Aquaculture*, 2006, **255**: 456—465
- [23] Jensen G C, Asplen M K. Omnivory in the diet of juvenile dungeness crab, *Cancer magister* Dana [J]. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 1998, **226** (2): 175—182
- [24] Park S S, Na Yumee, Uchir C G. An oxygen equivalent model for water quality dynamics in a macrophyte dominated river [J]. *Ecological Modelling*, 2003, **168** (1/2): 1—12
- [25] Takamura N, Kadono Y, Fukushima M, *et al* Effects of aquatic macrophytes on water quality and phytoplankton communities in shallow lakes [J]. *Ecological Research*, 2003, **18** (4): 381—395
- [26] Tong C H, Yang X E, Pu P M. Purification of eutrophicated water by aquatic plant [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, **15** (8): 1447—1450 [童昌华, 杨肖娥, 濮培民. 富营养化水体的水生植物净化试验研究. 应用生态学报, 2004, **15** (8): 1447—1450]
- [27] Montoya R A, Lawrence A L, Grant W E, *et al* Simulation of phosphorus dynamics in an intensive shrimp culture system: effects of feed formulations and feeding strategies [J]. *Ecological Modelling*, 2000, **129**: 131—142

EFFECTS OF FEEDING MODELS ON WATER QUALITY FOR CHINESE MITTEN CRAB *ERIOCHEIR SINENSIS*

CHEN Jian-Xin¹, SONG Xue-Hong², WU Lin-Kun¹, YANG Cai-Gen², CAI Chun-Fang² and CAO Ping¹

(1. Taihu Lake Fisheries Management Committee Jiangsu Province, Suzhou 215004; 2. School of Life Sciences, Suzhou University, Suzhou 215123)

Abstract: Four factors, including the coverage of aquatic plants, the input of live snail, the ratio of animal based feed to total feed, different feeding patterns, and three levels were followed to construct nine different feeding models by table L₉ (3⁴) of the orthogonal design method. After feeding 540 two-year old Chinese mitten crabs with even weight and size in 27 separate pens (6m × 5m × 2.5m) in the raising areas of east Taihu Lake for 240d, the effects of these feeding models with three replicates on the dynamic fluctuations of water quality parameters and plankton species were comparatively analyzed. The results showed that under the same density of released crabs, different feeding models exerted significantly different effects on the water quality and plankton diversity index. Under the feeding model IV, the water quality was higher than that of class water listed in the state environmental quality standards for surface water (GB3838-2002), and even higher than that of non-raising areas outside the pens, which was evidenced by its chemical indices of DO, COD_{Cr}, TP, TN, NH₄⁺-N, NO₂⁻-N and Chl *a* at 8.45mg/L, 16.46mg/L, 12.50μg/L, 0.46mg/L, 0.10mg/L, 3.60μg/L and 8.12μg/L, respectively. The results from variance analysis indicated that the effects of the four factors on the water quality were listed in the order of importance as: the coverage of aquatic plants > feed casting patterns > the input of live snail > the ratio of animal based feed to total feed. The results of "indicator organism" and Margalef's indices showed that the water biodiversity from model IV was significantly higher than that in non-culture areas, and its water body could be regarded as oligotrophic. Based on the four factors, water quality parameters of COD_{Cr}, TP, TN, Chl *a*, and plankton diversity index, a statistical regression analysis was conducted. The results confirmed that the coverage of aquatic plants and the feed casting patterns had close relations to these parameters. It is suggested that the feeding model, which is suitable for the culture of Chinese mitten crabs and beneficial to ecological protection of lakes, be characterized as follows: the coverage of aquatic plants ranged from 66% to 76%, the feed was given during whole growth and developmental stages and in the amount of 7.5% — 5.0% of the crab weight, the amount of live snail input was 9000kg/ha, and the animal based feed accounted for 50% of total.

Key words: Chinese mitten crab (*Eriocheir sinensis*); Feeding model; Water environment