

DOI: 10.19663/j.issn2095-9869.20210705001

http://www.yykxjz.cn/

张凯, 王广军, 龚望宝, 郁二蒙, 李志斐, 夏耘, 田晶晶, 谢骏. 草鱼-鳙-鲫零换水池塘有机碳、氮、磷收支研究. 渔业科学进展, 2022, 43(6): 188-198

ZHANG K, WANG G J, GONG W B, YU E M, LI Z F, XIA Y, TIAN J J, XIE J. Study on organic carbon, nitrogen and phosphorus budgets of zero-water exchange ponds of grass carp, bighead carp and crucian carp. Progress in Fishery Sciences, 2022, 43(6): 188-198

## 草鱼-鳙-鲫零换水池塘有机碳、氮、磷收支研究\*

张 凯 王广军 龚望宝 郁二蒙 李志斐 夏 耘 田晶晶 谢 骏<sup>①</sup>

(中国水产科学研究院珠江水产研究所 农业农村部热带亚热带水生资源养护重点实验室  
广东省水产养殖污染修复生态工程技术研究中心 广东 广州 510380)

**摘要** 为研究草鱼(*Ctenopharyngodon idella*)-鳙(*Aristichthys nobilis*)-鲫(*Carassius carassius*)零换水池塘营养盐收支状况, 阐明其零换水机制, 以草鱼-鳙-鲫零换水池塘为实验组, 以草鱼-鳙-鲫常规换水池塘为对照组, 开展了为期 2 年的池塘有机碳(TOC)、氮(N)、磷(P)收支的研究。结果显示, 2 组池塘 TOC、N、P 的主要来源均为饲料投入, 分别为 77.06%和 81.00%, 92.08%和 92.77%, 94.18%和 95.63%; TOC、N、P 的主要输出途径均为底泥积累, 分别占输入营养盐的 43.32%和 22.10%, 61.40%和 52.82%, 78.71%和 79.58%。2 组池塘养殖鱼类收获分别占输入碳(C)、N、P 的 10.08%和 13.05%, 21.00%和 25.57%, 15.41%和 18.60%。零换水池塘的 C、N、P 水体积累量和积累率均显著低于常规池塘( $P<0.05$ ), 其积累率分别降低 92.91%、88.52%和 87.12%。零换水池塘的 N、P 底泥积累量显著高于常规池塘, 但 C、N 底泥积累率显著低于常规池塘( $P<0.05$ ), 分别降低了 48.99%和 13.97%。零换水池塘养殖鱼类的 C、N、P 利用率均显著高于常规池塘( $P<0.05$ ), 分别提高了 29.49%、21.72%和 20.65%。研究表明, 零换水模式能降低营养盐积累, 有效提高系统物质利用率, 是一种绿色高效养殖模式, 具有较好的推广价值。

**关键词** 草鱼; 鳙; 鲫; 零换水; 营养盐收支

**中图分类号** S966 **文献标识码** A **文章编号** 2095-9869(2022)06-0188-11

为满足人们日益增长的蛋白质需求, 世界水产养殖产量逐年增加(Zhang *et al*, 2020)。与此对应的是世界水产养殖池塘总面积急剧增加, 到 2016 年已达到 540 万  $\text{hm}^2$  (FAO, 2016)。但池塘养殖在有效保证水产品供给的同时, 也造成了严重的环境问题(常孟阳等, 2019; 裴泓霖等, 2021)。养殖生物一般只能利用投入饲料中 20%~30%的营养物质, 其余大部分散布于养殖系统内(Jakson *et al*, 2003; Sun *et al*, 2013), 导致养

殖池塘系统内部的废物负荷增加、养殖风险倍增。通常改善池塘养殖环境的方法是换水, 但大量排水不符合我国水资源紧缺的国情。同时, 养殖尾水的排放会影响周边环境。Yang 等(2017)研究表明, 我国海水池塘每年向周边海域排放 N 和 P 约  $4.77 \times 10^4$  t 和  $3.75 \times 10^3$  t。Zhang 等(2020)研究表明, 我国淡水池塘每年向周边水域排放 N 和 P 约  $2.79 \times 10^5$  t 和  $2.89 \times 10^4$  t, 其环境影响更甚。

\* 广东省自然科学基金(2018A030313412)、国家重点研发计划(2019YFD0900302)和国家自然科学基金(42077453)共同资助 [This work was supported by the Natural Science Foundation of Guangdong Province (2018A030313412), National Key Research and Development Program (2019YFD0900302), and National Natural Science Foundation of China (42077453)].

张 凯, E-mail: zhangkaiec@163.com

① 通信作者: 谢 骏, 研究员, E-mail: xiejunhy01@126.com

收稿日期: 2021-07-05, 收修改稿日期: 2021-07-19

为减少养殖尾水对水域环境的影响,联合国粮农组织(FAO)从生态系统水平发展水产养殖的理念,提出致力于通过养殖层面相关技术的综合应用以及多部门之间的协调合作,实现水产养殖与社会经济环境各方面相协调的可持续发展(FAO, 2010)。基于该理念,研究团队在草鱼(*Ctenopharyngodon idella*)-鳙(*Aristichthys nobilis*)-鲫(*Carassius carassius*)集约化混养池塘基础上,综合水质指标、鱼类摄食等参数确定了池塘养殖容量,形成零换水养殖模式。目前,该模式已实现 4 年零换水养殖,年产量达 96 000 kg/hm<sup>2</sup>。

池塘养殖中,养殖生物不能对投入物质全部利用,导致系统营养盐含量升高,造成环境恶化。环境变化会影响生态系统的物质循环和能量流动(Feng *et al.*, 2017)。有机碳(TOC)、N、P 含量可直观反映养殖环境的变化(苏跃朋等, 2009), TOC、N、P 收支可反映营养物质的积累,评估养殖生物对营养盐的利用效率(Acosta-Nassar *et al.*, 1994; Sahu *et al.*, 2003)。因此,量化 TOC、N、P 的收支有助于从物质循环和能量流动层次了解系统,为从生态系统水平提出管理、优化策略具有重要意义(Teichert-Coddington *et al.*, 2000)。本研究以草鱼-鳙-鲫零换水池塘为实验组,以草鱼-鳙-鲫常规池塘为对照组,研究 2 组池塘营养盐收支特征,量化零换水系统 C、N、P 的投入和输出,为优化零换水养殖模式提供理论参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究对象及实验设置

本研究的零换水和对照池塘均位于广东中山市民众镇华辰水产养殖场。选取 3 口零换水池塘为实验组,另选 3 口普通换水池塘为对照组。单个池塘面积约 1.00 hm<sup>2</sup>,平均水深为 2.50 m。实验组池塘草鱼初始规格分别为 0.30 kg/ind.和 0.60 kg/ind.,放养密度均为 1.20 ind./m<sup>2</sup>;鳙初始规格约为 0.50 kg/ind.,放养密度为 0.25 ind./m<sup>2</sup>;鲫初始规格为 0.05 kg/ind.,放养密度为 1.20 ind./m<sup>2</sup>。实验池塘每 40~60 d 撒网捕捞规格达到 1.00 kg/ind.的草鱼、1.50 kg/ind.的鳙和 0.40 kg/ind.的鲫,并补充相同数量的规格为 0.30 kg/ind.的草鱼、0.50 kg/ind.的鳙和 0.05 kg/ind.的鲫。对照池塘初始投放规格与实验组池塘相同,年底时统一捕捞。

2 组池塘均投喂蛋白含量为 27%的草鱼配合饲料。使用自动投料机进行投喂,每天 09:00 和 17:00 各投喂 1 次。日投喂量为草鱼体重的 3%~5%。每天记录投喂量和摄食情况并及时调整。每个池塘配备 4 台

叶轮式增氧机和 1 台水车式增氧机。每天投料时,各开增氧机 1 h, 12:30~14:30 开增氧机 2 h, 夜晚长开增氧机。实验期间,2 组池塘均未使用药物。

### 1.2 参数测定

**1.2.1 理化因子** 实验于 2017—2018 年进行,实验池塘每次捕捞前取样,取样时间分别为 2017 年 1、4、7、8、9、11 月和 2018 年 1、4、7、9、11 月。

采用五点取样法采集样品(先确定池塘 2 条对角线中点为中心采样点,再在 2 条对角线上选择 4 个与中心采样点距离相等的点作为采样点)。

水体样品:每个采样点取上(0.2 m)、中(1.0 m)、下层(2.0 m)水样并混合,低温带回实验室测定水质指标。测定指标包括总氮(TN)、总氨氮(TAN)、硝酸盐氮(NO<sub>3</sub>-N)、亚硝酸盐氮(NO<sub>2</sub>-N)、总磷(TP)、磷酸盐(PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P)和 TOC。N、P 营养盐测定方法参照 Tu 等(2010)和 Laskov 等(2007)的方法;TOC 使用 TOC-5000A 自动分析仪(Shimadzu, Inc., 日本)测定。使用便携式水质分析仪(YSI Professional Plus, 美国)现场测定池塘水温(T)、溶解氧(DO)、pH、电导率(Cond)、总溶解性固体(TDS),采用塞奇圆盘测定水体透明度(SD),叶绿素 *a* 利用丙酮萃取后分光光度计比色测定。

沉积物样品:使用彼得森采泥器采集底泥。60℃ 烘干,粉碎、过筛,使用 Vario ELIII 元素分析仪(Elementar, Dortmund, 德国)测定底泥 TOC、TN 含量,采用碱熔法(HJ 632-2011)测定底泥 TP 含量。

### 1.2.2 有机碳收支

**1.2.2.1 浮游生物生产** 实验期间,利用黑白瓶法测定水体初级生产力。所用黑白瓶体积为 250 mL。毛生产量=白瓶溶氧-黑瓶溶氧;呼吸量=原初溶氧-黑瓶溶氧;净生产量=白瓶溶氧-原初溶氧=毛生产量-呼吸量。取浮游植物群落光合商为 1,按照 1 mg O<sub>2</sub> = 0.375 mg C,将氧量换算为以 C 计的生物量。

**1.2.2.2 养殖鱼类及饵料输入** 实验初始采集养殖鱼类样品,测量体长、体重,然后烘干、研碎,过 100 目筛后,经过 0.1 mol/L HCl 酸化去除 TOC,再通过 Vario ELIII 元素分析仪(Elementar, Dortmund, 德国)测定 TOC 含量。实验期间,记录投入池塘内的饵料量。实验结束时,求出各实验池塘饵料总投入量,其 TOC 含量测定同养殖生物样品。

**1.2.2.3 初始水体及降雨输入** 实验初始,水体 TOC 含量使用 TOC-5000A 自动分析仪(日本)测定。实验期间,使用 3 个 500 mL 烧杯(经过 450℃ 灼烧)接降雨,记录降雨量,采用 TOC-5000A 自动分析仪(日本)测定 TOC 含量。

**1.2.2.4 浮游生物呼吸量测定** 测定方法与浮游生物生产量相同,利用黑白瓶法测定。

**1.2.2.5 养殖鱼类的呼吸利用呼吸箱测定** 根据呼吸箱中水体初始溶解氧(DO<sub>0</sub>, mg/L)、终末水体溶解氧(DO<sub>t</sub>, mg/L)和实验持续时间 *t* (h)测定,同时,设有鱼的空白对照以消除水体呼吸影响。

**1.2.2.6 采用底泥呼吸器原位测定** 根据呼吸器中水体初始溶解氧(mg/L)、终末水体溶解氧(mg/L)和实验持续时间 *t* (h)测定,同时,设有底质的空白对照以消除上覆水体呼吸影响。底泥耗氧速率 SOD [O<sub>2</sub> mg/(m<sup>2</sup>·d)]按公式计算:

$$SOD = \frac{(DO_0 - DO_t) \times V}{A \times t} \times 24 \quad (1)$$

式中, *V*(L)为上覆水体积, *A*(m<sup>2</sup>)为采泥器截面积。

**1.2.2.7 养殖生物收获** 统计养殖生物收获量,其 TOC 含量测定方法同养殖鱼类及饵料输入。

**1.2.2.8 水体及底泥 TOC 积累** 实验开始前,通过沉降物收集管预实验测定 2 种池塘的年沉降量,各池塘设沉降物收集管,开口距水体表面 1.5 m。沉降物收集管采用圆柱形的 PVC 管(直径为 90 mm,高为 550 mm),在管口处覆盖一块尼龙网(网眼为 0.8 cm),以防止鱼类等大型游泳生物进入。沉降物收集管在每次捕捞前取出,带回实验室,低温静置。将上层水虹吸出,剩余的物质倒入大型培养皿(15 cm)中,使用蒸馏水清洗,然后在 60℃ 烘干 48 h。经过预实验发现,常规池塘和零换水池塘年沉降量均为 10 cm。因此,进行本研究时(实验周期为 2 年),常规池塘使用采泥器(直径为 8 cm)采集 10 cm 的底泥,零换水池塘采集 20 cm 的底泥。渗漏输出的 TOC 测定参照 Zhang 等(2020)的方法。

**1.2.3 N、P 收支** 实验初始时,将养殖鱼 60℃ 烘干至恒重,粉碎过筛,使用 Vario ELIII 元素分析仪(Elementar, Dortmund, 德国)测定其 TN 含量。采用同样的方法测定饲料 TN 含量。养殖鱼类和饲料的 TP 含量通过钼黄分光光度法测定。实验期间,使用 3 个 500 mL 烧杯(经过 450℃ 灼烧)接降雨,记录降雨量。初始水体和降雨的 TN、TP 含量采用过 K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 联合消化法测定。通过乙炔块法(Capone, 1993)测定系统固氮量。

水体、底泥积累:初始、结束时水体、底泥的 N、P 含量差值即为水体、底泥积累。水体 TN、TP 含量采用过 K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 联合消化法测定。底泥处理方法同 TOC,底泥 TN 采用 Vario ELIII 元素分析仪(Elementar, Dortmund, 德国)测定。底泥 TP 的测定采用碱熔法。收获的养殖鱼类 N、P 含量测定方法同初始放养的养殖鱼类。渗漏输出的 N、P 测定参照 Zhang 等(2020)

的方法。氨的挥发量按照 Briggs 等(1994)和 Weiler(2011)的方法计算:

$$F = K \times C_{NH_3} \quad (2)$$

式中, *F* 为气液界面氨的通量; *C*<sub>NH<sub>3</sub></sub> 为非离子氨浓度,测定 TAN 按照邹玲媛等(2002)的方法; *K* 为物质转化系数(cm/h): *K*=1.01+0.33*U* (*U* 为风速, m/s)。

**1.2.4 相关计算** 系统 C、N、P 收支通过元素输入量和输出量计算。

C、N、P 的利用率计算如下:

C、N、P 利用率=养殖生物净产量的 C、N、P 含量/系统输入的 C、N、P 总量 × 100%

C、N、P 的水体或底泥积累率计算如下:

C、N、P 积累率=系统水体或底泥 C、N、P 积累量/系统输入的 C、N、P 总量 × 100%

**1.2.5 统计分析** 使用 SPSS 21.0 软件对数据进行分析,采用独立样本 *T* 检验进行分析处理, *P*<0.05 为差异显著性水平。

## 2 结果

### 2.1 环境因子

在整个实验期间,零换水池塘水体的电导率、总溶解性固体和底泥 TOC 含量均显著低于常规池塘 (*P*<0.05),而透明度显著高于常规池塘 (*P*<0.05); 2 组池塘水体温度、pH、DO、叶绿素和其营养盐指标相比均无显著差异 (*P*>0.05)(表 1)。

### 2.2 养殖生物产量及投喂情况

从表 2 可以看出,在整个实验期间,零换水池塘的产量、投喂量均显著高于常规池塘 (*P*<0.05),但饲料系数(feed conversion rate)显著低于常规池塘 (*P*<0.05)。

### 2.3 营养盐收支情况

从表 3 可以看出,饲料投入是常规池塘和零换水池塘 TOC 的主要输入途径,分别占 TOC 总输入的 77.06%和 81.00%;其次是浮游植物初级生产,分别占 TOC 总输入的 20.05%和 15.30%。养殖鱼类输入占 TOC 总输入的 1.93%和 3.38%。初始水体和降雨输入分别占总输入的 0.28%~0.90%、0.24%~0.26%和 0.03%~0.06%。饲料是 2 组池塘 N、P 的主要来源,分别占 N、P 总输入的 92.08%~92.77%和 94.18%~95.63%。养殖鱼类输入占 N、P 总输入的 4.19%~6.95%和 3.34%~5.49%。初始水体输入分别占 N、P 总输入的 0.89%~2.89%和 0.31%~0.98%。降雨输入的 N、P 比例较低,低于 0.1%。2 组池塘固氮作用则仅占系统氮输入的 0.03%和 0.05%。

表 1 2 组池塘的环境指标变化  
Tab.1 Variation of environmental factors in the two treatments

环境因子 Environmental factors		范围 Range		平均值 (Means±SD)	
		常规池塘 Control ponds	零换水池塘 Treatment ponds	常规池塘 Control ponds	零换水池塘 Treatment ponds
水体 Water	水温 $T/^{\circ}\text{C}$	16.2~31.5	15.80~33.60	27.15±5.40	26.48±4.97
	电导率 Cond /(uS/cm)	358.00~3 664.00	512.00~876.00	1 641.18±1 002.22	714.22±97.29*
	总溶解性固体 TDS /(mg/L)	248.50~2 379.00	370.50~624.00	1 198.60±669.52	478.76±62.77*
	pH	6.96~8.51	6.81~8.30	7.48±0.32	7.58±0.37
	溶解氧 DO /(mg/L)	3.48~11.87	2.16~10.63	6.66±1.85	5.67±2.01
	透明度 SD /cm	8.00~18.00	10.00~28.00	14.45±2.06	17.06±3.86*
	叶绿素 $a$ Chl- $a$ /(μg/L)	0.09~0.40	0.09~0.43	0.209±0.080	0.221±0.085
	总氨氮 TAN /(mg/L)	0.04~4.04	0.02~1.17	0.83±0.84	0.40±0.34
	硝酸盐氮 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ /(mg/L)	0.18~11.57	0.46~9.69	0.25±0.16	0.29±0.17
	亚硝酸盐氮 $\text{NO}_2^- \text{-N}$ /(mg/L)	0.04~0.79	0.06~0.61	2.80±2.79	3.60±2.92
	磷酸盐 $\text{PO}_4^{3-} \text{-P}$ /(mg/L)	0.02~0.29	0.01~0.12	7.89±3.71	8.57±4.64
	总氮 TN /(mg/L)	1.58~16.10	3.49~25.02	0.052±0.050	0.052±0.033
	总磷 TP /(mg/L)	0.17~3.26	0.27~3.33	0.99±0.71	0.91±0.63
	有机碳 TOC /(mg/L)	6.46~17.67	8.55~20.71	11.56±2.67	12.08±2.76
	底泥 Sediment	化学耗氧量 $\text{COD}_{\text{Cr}}$ /(mg/L)	34.00~93.00	45.00~109.00	60.85±14.06
总氮 TN /(mg/L)		800.00~2 200.00	900.00~2600.00	1 407.58±388.39	1 750.30±445.73
总磷 TP /(mg/L)		700.00~1 510.00	700.00~2000.00	1 089.88±237.36	1 011.45±256.79
	有机碳 TOC /(mg/L)	17 920.00~52 100.00	10 000.00~36 900.00	30 621.82±7 869.42	27 103.03±6 298.44*

注: \*表示处理组间差异显著( $P < 0.05$ ), 下同。

Note: Data with \* in the same row means significant difference ( $P < 0.05$ ), the same as below.

表 2 2 组池塘产量及投喂量

Tab.2 Yield and feed of the two treatments

指标 Parameter	常规池塘 Control ponds	零换水池塘 Treatment ponds
产量 Production ( $\text{kg}/\text{hm}^2$ )	35 537.50±4 391.29	84 750.00±8256.82*
投喂量 Feed ( $\text{kg}/\text{hm}^2$ )	60 582.50±11 045.91	111 481.67±14 372.47*
饲料系数 Feed conversion rate	2.37±0.05	2.07±0.05*

实验期间, 常规池塘和零换水池塘 TOC 主要输出途径是底泥积累, 分别占系统输入 TOC 的 43.32% 和 22.10%; 其次是养殖鱼类呼吸, 分别占总输入的 14.09% 和 20.41%。浮游生物呼吸分别占输入 TOC 的 16.08% 和 12.10%。养殖鱼类收获分别占输入 TOC 的 10.08% 和 13.05%; 底泥呼吸分别占输入 TOC 的 2.66% 和 1.85%。终末水体积、渗漏占输入 TOC 的比例很低。实验期间, 底泥积累是 2 组池塘 N、P 输出的主要途径, 分别占系统输入 N、P 的 52.82%~

61.40% 和 78.71%~79.58%。养殖鱼类收获分别占输入 N、P 的 21.00%~25.57% 和 15.41%~18.60%。终末水体积积累分别占输入 N、P 的 1.26%~6.20% 和 0.81%~4.83%。氨挥发占输入 N 的 0.33%~0.65%。渗漏占的比例很低。

### 2.4 营养盐积累

从表 4 可以看出, 实验期间, 零换水池塘的 C、N、P 水体积量和积累率均显著低于常规池塘( $P < 0.05$ ), 其占总输入比例分别降低 92.91%、88.52% 和 87.12%。零换水池塘的 N、P 底泥积累量显著高于常规池塘( $P < 0.05$ ), C、N 底泥积累率显著低于常规池塘( $P < 0.05$ )。

### 2.5 营养盐利用率

零换水池塘和常规池塘养殖鱼类对 C、N、P 的利用率分别为 13.05% 和 10.08%, 25.57% 和 21.00%, 18.60% 和 15.41%。从图 1 可以看出, 零换水池塘养殖鱼类的 C、N、P 利用率均显著高于常规池塘( $P < 0.05$ ), 分别提高 29.49%、21.72% 和 20.65%。

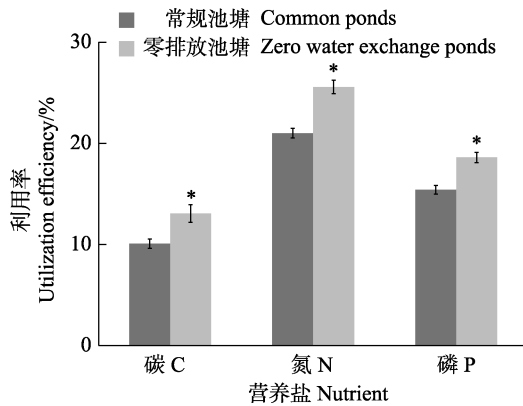


图1 2组池塘养殖鱼类的C、N、P利用率

Fig.1 Utilization efficiency of organic carbon, nitrogen and phosphorus by the cultured animals in different groups

同一指标标有\*表示差异显著。

“\*” means significant difference compared with control group ( $P < 0.05$ ).

### 3 讨论

#### 3.1 环境因子

本研究发现, 实验期间零换水池塘水体的电导率、总溶解性固体和底泥 TOC 含量显著低于常规池塘( $P < 0.05$ ), 而透明度显著高于常规池塘( $P < 0.05$ ); 2组池塘其他指标相比均无显著差异( $P > 0.05$ )。电导率是水体导电能力指标, 反映了水体存在各种电解质或离子的数量, 如无机盐浓度, 是评价池塘水质的一个重要指标(李志斐等, 2017)。溶解性固体包括水体中溶解性盐类和部分有机物等物质, 能反映水中的溶解性物质含量。Thirumalinis 等(2009)研究表明, 池塘水体中总溶解性固体与电导率呈正相关。本研究中, 常规池塘水体的总溶解性固体和电导率均显著高于零换水池塘( $P < 0.05$ )。透明度可反映养殖池塘水体中悬浮颗粒物的多少。在整个养殖期间, 零换水池塘透明度显著高于常规池塘( $P < 0.05$ ), 由此可知, 零换水养殖降低了池塘悬浮颗粒物和底泥 TOC 等的积累, 减轻了池塘的负荷。

#### 3.2 养殖生物收获

在养殖生产中, 养殖户会根据水色、水质、鱼类生长和健康等情况适量换水, 以保证养殖顺利进行。本研究中, 尽管未换水, 但零换水池塘鱼类的产量显著高于常规池塘, 饲料系数显著低于常规池塘( $P < 0.05$ )。原因首先是鱼类在不同发育时期的生长速率不同, 幼鱼阶段一般高于成鱼阶段(Du *et al.*, 2005; Aslam *et al.*, 2021), 零换水池塘定期捕捞成鱼, 补充

幼鱼, 因而提高了产量, 降低了饲料系数; 其次是常规池塘中养殖鱼类的生物量随养殖时间的延长呈上升的趋势, 在养殖中后期易超过池塘的生态容量; 零换水养殖轮捕轮放, 控制了池塘内鱼类生物量, 可降低养殖中后期高密度造成的鱼类应激反应, 提高了产量。最后是前期研究发现, 零换水养殖提高了池塘原核生物和真核生物的多样性, 降低了假单胞菌属(*Pseudomonas*)、克雷伯氏菌属(*Klebsiella*)和黄杆菌属(*Flavobacterium*)等致病菌丰度, 可减少疾病的发生(陆洋等, 2020a, b)。

#### 3.3 营养盐收支情况

Alongi 等(2009)、Zhang 等(2020)研究表明, 浮游生物初级生产是 TOC 的主要来源, 占系统 TOC 总输入的 60%~80%; 浮游生物呼吸是 TOC 输出的主要途径, 占系统输入 N 的 45%~80%。饵料是系统 N、P 输入的主要来源, 占 N、P 输入的 70%~98%; 底泥积累是系统 N、P 输出的主要途径, 占系统输入 N 的 20%~75%、系统输入 P 的 40%~95%(Jakson *et al.*, 2003; Casillas-Hernandez *et al.*, 2012; Zhang *et al.*, 2018)。于上述研究结果不同的是本研究中, 2组池塘有 TOC、N、P 的主要来源均为饲料投入, 分别为 77.06%和 81.00%、92.08%和 92.77%、94.18%和 95.63%; TOC、N、P 的主要输出途径均为底泥积累, 分别为 43.32%和 22.10%、61.40%和 52.82%、78.71%和 79.58%。TOC 输入、输出比例的差异可能是养殖模式的不同造成的。本研究中, 2组池塘由于高密度精养, 水体透明度较低, 仅为 10~15 cm, 最高不超过 20 cm, 抑制了浮游植物的生长, 因此, 降低了浮游植物初级生产和呼吸的比例。

本研究中, TOC 和 N 的总输入 > 总输出。零换水池塘和常规池塘 TOC 分别有 30.12%和 12.35%的输入, 19.94%和 10.74%的输入 N “失踪”。造成这种现象的原因可能是反硝化作用。在反硝化过程中, 微生物利用有机物作为碳源和电子供体, 将  $\text{NO}_2^-$ -N 和  $\text{NO}_3^-$ -N 还原为气态氮(Hargreaves, 1998), 可分为厌氧和好氧反硝化(Wang *et al.*, 2018)。鉴于本研究中养殖水体中 DO 较高(一般  $\geq 4$  mg/L), 因此, 推测好氧反硝化在本研究中发挥了重要作用, 其主要产物为气态  $\text{N}_2$ 。前期研究发现, 2组池塘均存在好氧反硝化菌, 对 TN 的去除率可达 80%以上, 对  $\text{NO}_3^-$ -N 的去除率可达 90%以上, 且零换水池塘好氧反硝化菌的丰度高于常规池塘(朱云等, 2020), 因此, 导致零换水池塘 C、N “失踪”比例高于常规池塘。由于 P 为沉积型循环, 无气体形态, 其总输入与总输出基本一致。

表 3 2 组池塘 TOC、TN、TP 收支  
Tab.3 TOC, TN and TP budget of the two treatments

项目 Items	有机碳 TOC (kg/hm <sup>2</sup> )		总氮 TN (kg/hm <sup>2</sup> )		总磷 TP (kg/hm <sup>2</sup> )	
	常规池塘 Control ponds	零换水池塘 Treatment ponds	常规池塘 Control ponds	零换水池塘 Treatment ponds	常规池塘 Control ponds	零换水池塘 Treatment ponds
输入 Inputs						
浮游植物生产 Primary production of phytoplankton	8 357.56±1 365.06	11 660.33±2 879.37	-	-	-	-
饲料 Feed	32 114.78±6 122.40	59 096.43±7 457.21*	4 776.81±910.66	8 790.11±1 109.20*	1 066.25±203.27	1 962.08±247.59*
养殖鱼类 Stocked fish	802.92	2 467.12	215.80	663.08	37.21	114.32
初始水体 Initial water	374.93±33.20	206.47±22.91*	148.99±5.17	85.24±15.23	10.94±1.95	6.45±0.95*
降雨 Rain	24.79	24.79	5.18	5.18	0.56	0.56
固氮作用 Nitrogen fixation	-	-	2.53±0.44	2.53±0.46	-	-
总输入 Total	41 674.99±5 149.44	72 955.15±6 921.18*	5 149.31±905.79	9 546.13±1 122.07*	1 114.95±205.19	2 083.41±247.89*
输出 Outputs						
浮游生物呼吸 Respiration of plankton	6 579.36±1 074.62	8 785.80±2 266.74	-	-	-	-
底泥呼吸 Respiration of sediment	1 084.35±218.10	1 326.43±273.73	-	-	-	-
养殖鱼类呼吸 Respiration of fish	5 860.74±588.58	14 860.29±1 088.39*	-	-	-	-
养殖鱼类收获 Harvest of fish	4 215.32±713.95	9 517.87±1 088.11*	1 080.41±182.99	2 439.49±278.89*	171.49±29.05	387.22±44.27*
终末水体 Final water	590.27±69.27	231.80±30.16*	308.14±79.23	119.68±26.65*	56.05±3.33	16.44±4.41*
底泥积累 Sediment accumulation	18 294.67±5 741.57	16 210.67±3 030.13	3 166.67±602.42	5 019.73±295.31*	878.37±175.67	1 660.00±226.00*
渗漏 Seepage	97.72±19.62	93.32±14.97	18.76±4.78	22.74±6.59	3.50±0.61	3.82±0.74
氨挥发 Volatilization of NH <sub>3</sub> -N	-	-	33.75±7.58	31.25±1.15	-	-
总输出 Total	36 624.70±6 467.16	50 963.96±4 563.33*	4 588.97±756.36	7 617.73±559.88*	1 106.41±208.11	2 067.48±265.02*

表4 2组池塘 TOC、TN 和 TP 积累

Tab.4 TOC, TN and TP accumulation of the two treatments

项目 Items	有机碳 TOC		总氮 TN		总磷 TP	
	常规池塘 Control ponds	零换水池塘 Treatment ponds	常规池塘 Control ponds	零换水池塘 Treatment ponds	常规池塘 Control ponds	零换水池塘 Treatment ponds
水体积累量 Accumulation in water /(kg/hm <sup>2</sup> )	215.33±62.48	25.33±21.94*	159.15±77.05	34.44±20.66*	42.12±1.40	9.99±4.04*
水体积累率 Accumulation ratio in water /%	0.52±0.14	0.04±0.03*	3.24±2.01	0.37±0.25*	3.85±0.56	0.50±0.23*
底泥积累量 Accumulation in sediment /(kg·hm <sup>2</sup> )	18 294.67±5741.57	16 210.67±3030.13	3 166.67±602.42	5 019.73±295.31*	878.37±175.67	1 660.00±226.00*
底泥积累率 Accumulation ratio in sediment /%	43.32±8.50	22.10±2.07*	61.40±0.88	52.82±3.01*	78.71±3.46	79.58±1.70

### 3.4 营养盐积累

为了保持水质、促进养殖生物生长,多数养殖模式需要换水。据估计,池塘养殖生产1 kg鱼需要3~13.4 m<sup>3</sup>的水(Effendi *et al.*, 2020),而根据Hopkin等(1992)的研究,生产1 kg对虾则需要换水39~199 m<sup>3</sup>。水体积累的C、N和P是水产养殖活动重要的污染形式,随尾水排放对周边水域生态系统造成影响(Yang *et al.*, 2017; Zhang *et al.*, 2020)。本研究中,尽管2年期间一直未换水,但零换水池塘水体营养盐平均含量与常规池塘相比无显著差异(表1),而水体TOC、N、P积累量和积累率则均显著低于常规池塘( $P<0.05$ )(表4),其积累率分别降低92.91%、88.52%和87.12%,说明零换水养殖模式可有效降低池塘养殖造成的水污染。原因可能首先是常规池塘中,养殖鱼类的生物量随养殖时间的延长呈上升的趋势,在养殖中后期易超过池塘的生态容量,进而对池塘环境造成负面影响;零换水池塘中,鱼类的生物量通过轮捕轮放、捕大留小始终维持在一个相对恒定的水平,与常规池塘相比更接近池塘的生态容量,对池塘的环境负荷更低;其次是尽管鱼类终生生长,但有研究发现,鱼类不同发育时期的生长速率不同,幼鱼阶段一般高于成鱼阶段,其对营养盐的利用率也高于成鱼(Du *et al.*, 2005; Aslam *et al.*, 2021)。零换水池塘捕大留小后补充幼鱼,相比常规池塘的成鱼,提高了系统投入的营养盐利用率;最后是前期研究发现,零排放池塘水体中脱氮除磷的微生物,如脱氯单胞菌(*Dechloromonas*)、噬几丁质菌属(*Chitinophaga*)、发酵单胞菌属(*Zymomonas*)、玫瑰单胞菌(*Roseomonas*)等丰度显著高于常规池塘,对水

体中C、N、P的去除强于对照池塘,降低了水体营养盐积累(陆洋等, 2020a; 朱云等, 2020)。

底泥积累是C、N、P输出的重要途径。本研究中,零换水池塘的N、P底泥积累量显著高于常规池塘( $P<0.05$ ),这可能是由2种池塘管理模式差别造成的。零换水池塘投喂量显著高于常规池塘,尽管该模式内鱼类对饲料的利用率较高,但其沉积到池塘底部的饲料仍高于常规池塘;此外,实验期间,常规池塘在第1年实验结束时进行了干塘、曝晒、清淤等操作,而零换水池塘一直处于运行状态,其每年养殖周期相比常规池塘长50~60 d,因此,造成零换水池塘N、P底泥积累量高于常规池塘。尽管零换水池塘的N、P底泥积累量显著高于常规池塘,但其N、P底泥积累率显著低于常规池塘( $P<0.05$ )。原因可能是零换水池塘轮捕轮放时,对底质的搅动促进了沉积物中营养盐释放至水体中,被水体浮游生物利用,进而随鳙的滤食而被利用,而释放营养盐的沉积物则在捕放周期内再次吸收水体中的营养盐,从而处于营养盐“释放-藻类利用-吸收”的动态循环中。该模式虽然在每次捕捞时短期内增加水体的营养盐含量,但在长期调控了零换水池塘水体和沉积物中营养盐积累。此外,本研究中养殖的草鱼、鳙、鲫均对底质具有扰动作用(赵蕾等, 2011; Adamek *et al.*, 2013)。在实验周期内,零换水池塘养殖的鱼类具有较高的生物量,其鱼类的扰动作用较强,促进了底泥中营养盐的再释放,被微生物和浮游植物再利用。两种作用综合导致零换水池塘底泥具有较低的N、P积累率。相比常规池塘,零换水池塘底泥N、P积累率分别降低了48.99%和13.97%。由于底泥对P的强吸附作用以及P的沉积型循环方式,2组

池塘底泥P积累率相比无显著差异。

### 3.5 营养盐利用率及优化

与常规池塘相比,零换水池塘养殖鱼类的C、N、P利用率分别提高了29.49%、21.72%、20.65%。原因可能是轮捕轮放的综合效应,使零换水池塘养殖鱼类具有较高的成活率和较低的饵料系数,因而提高了营养盐利用率。

本研究中,底泥积累是本研究中C、N、P的主要归宿,与Guo等(2017)和Zhang等(2020)研究结果相一致。研究表明,混养底栖滤食性动物,如缢蛭(*Sinonovacula constricta*)(Tian *et al.*, 2001; Guo *et al.*, 2017)、三角帆蚌(*Hyriopsis cumingii*)(刘其根等, 2014),可提高对营养盐尤其是P的利用效率,降低其积累。因此,引入底栖滤食动物是提高养殖系统生态效率的一种途径,有可能进一步提高草鱼-鳙-鲫零换水池塘的营养盐利用率。

## 4 结论

本研究结果表明,草鱼-鳙-鲫零换水养殖可有效提高养殖鱼类产量,降低饲料系数;减少系统营养盐积累,提高营养盐的利用率。鉴于我国水产养殖营养盐年排放量(N为9.91万t/年,P为1.61万t/年)(第二次全国污染源普查公报,2020)较高,因地制宜地进一步优化和推广此类节能减排的池塘养殖模式具有广阔的应用前景,对促进我国水产养殖业可持续发展具有重要意义。

## 参 考 文 献

- ACOSTA-NASSAR M V, MOREL J M, CORREDOR J E. The nitrogen budget of a tropical semi-intensive freshwater fish culture pond. *Journal of the World Aquaculture Society*, 1994, 25 (2): 261-270
- ADAMEK Z, MARSALEK B. Bioturbation of sediments by benthic macroinvertebrates and fish and its implication for pond ecosystems: A review. *Aquaculture International*, 2013, 21(1): 1-17
- ALONGI D M, MCKINNON A D, BRINKMAN R, *et al.* The fate of organic matter derived from small-scale fish cage aquaculture in coastal waters of Sulawesi and Sumatra, Indonesia. *Aquaculture*, 2009, 295(1/2): 60-75
- ASLAM S, ZUBERI A, CHAN M W H, *et al.* Effect of *Lemna minor* and *Glycine max* on hematological parameters, glucose level, total protein content and anti-oxidant enzyme activities in *Ctenopharyngodon idella* and *Hypophthalmichthys molitrix*. *Aquaculture Reports*, 2021, 19: 100616
- BRIGGS M R P, FVGNE-SMITH S J. A nutrient budget of some intensive marine shrimp ponds in Thailand. *Aquaculture Research*, 1994, 25: 789-811
- CAPONE D G. Determination of nitrogenase activity in aquatic samples using the acetylene reduction procedure. In: KEMP, P F, SHERR, B F, SHERR, E B, *et al.* (Eds.). *Current Methods in Aquatic Microbial Ecology*. Lewis Publishers, New York, 1993, 621-631
- CASILLAS-HERNNANDEZ R, ONTIVEROS C A S, ESTRADA M A C, *et al.* Water quality and nutrient budget in experimental closed tilapia *Oreochromis niloticus* culture systems. *Revista Latinoamericana de Recursos Naturales*, 2012, 8(2): 46-55
- CHANG M Y, LI C L, DONG J, *et al.* Dynamic changes of phytoplankton composition during cyanobacteria blooms in aquaculture ponds. *Progress in Fishery Sciences*, 2019, 40(1): 36-45 [常孟阳, 李晨露, 董静, 等. 蓝藻水华暴发期间养殖池塘浮游藻类动态变化. *渔业科学进展*, 2019, 40(1): 36-45]
- DU Z Y, LIU Y J, TIAN L X, *et al.* Effect of dietary lipid level on growth, feed utilization and body composition by juvenile grass carp (*Ctenopharyngodon idella*). *Aquaculture Nutrition*, 2005, 11(2): 139-146
- EFFENDI H, WIDYATMOKO, UTOMO B A, *et al.* Ammonia and orthophosphate removal of tilapia cultivation wastewater with *Vetiveria zizanioides*. *Journal of King Saud University-Science*, 2020, 32(1): 207-212
- FAO. The state of world fisheries and aquaculture 2016 contributing to food security and nutrition for all. (Rome), 2016
- FENG J, TIAN X L, DONG S L, *et al.* Model-based analysis of the energy fluxes and trophic structure of a *Portunus trituberculatus* polyculture ecosystem. *Aquaculture Environment Interaction*, 2017, 9(1): 479-490
- GUO K, ZHAO W, JIANG Z Q, *et al.* A study of organic carbon, nitrogen and phosphorus budget in jellyfish-shellfish-fish-prawn polyculture ponds. *Aquaculture Research*, 2017, 48(1): 68-76
- HARGREAVES J A. Nitrogen biogeochemistry of aquaculture ponds. *Aquaculture*, 1998, 166(3): 181-212
- HOPKIN J S, VILLALON J. Synopsis of industrial panel input on shrimp pond management. In: WYBAN J A (Ed.). *Proceeding of the Special Session on Shrimp Farming*. World Aquaculture Society, Baton Rouge, LA, USA, 1992, 281-290
- JAKSON C, PRESTON N, THOMPSON P J, *et al.* Nitrogen budget and effluent nitrogen components at an intensive shrimp farm. *Aquaculture*, 2003, 218(1): 397-411
- LASKOV C, HERZOG C, LEWANDOWSKI J, *et al.* Miniaturized photometrical methods for the rapid analysis of phosphate, ammonium, ferrous iron and sulfate in pore



- water of freshwater sediments. *Limnology and Oceanography Methods*, 2007, 5(1): 63–71
- LI Z F, XIE J, WANG G J, *et al.* Community characteristics of the macrozoobenthos and bioassessment of water quality in aquaculture ponds of the Pearl River Delta. *Journal of Lake Sciences*, 2017, 29(4): 896–906 [李志斐, 谢骏, 王广军, 等. 珠江三角洲养殖池塘底栖动物群落结构及水质生物学评价. *湖泊科学*, 2017, 29(4): 896–906]
- LIU Q G, YANG Y, TANG Y T, *et al.* Experimental study on structure optimization for polyculture of giant freshwater prawn with triangle sail mussel, silver carp and bighead carp. *Journal of Fisheries of China*, 2014, 38(11): 1855–1864 [刘其根, 杨洋, 唐永涛, 等. 罗氏沼虾与三角帆蚌、鲢和鳙混养模式优化. *水产学报*, 2014, 38(11): 1855–1864]
- LU Y, YU E M, WANG G J, *et al.* Effect of *Bacillus* on eukaryotic microorganism in grass carp ponds. *Journal of Shanghai Ocean University*, 2020a, 29(2): 218–225 [陆洋, 郁二蒙, 王广军, 等. 添加芽孢杆菌对草鱼池塘中真核微生物的影响. *上海海洋大学学报*, 2020a, 29(2): 218–225]
- LU Y, YU E M, XIE J, *et al.* Analysis of the effect of adding *Bacillus* on the physicochemical factors and bacterial community structure in ponds. *Journal of Fisheries of China*, 2020b, 44(1): 130–141 [陆洋, 郁二蒙, 谢骏, 等. 添加芽孢杆菌对池塘中理化因子和细菌群落结构的影响分析. *水产学报*, 2020b, 44(1): 130–141]
- PEI H L, WANG L, TAN B M, *et al.* Environmental factors influence the seasonal characteristics of bacterial community in the sediment of *Apostichopus japonicus* culture ponds. *Progress in Fishery Sciences*, 2021, 42(3): 89–99 [裴泓霖, 王萃, 谭八梅, 等. 不同季节刺参养殖池塘沉积物菌群结构及其影响因素. *渔业科学进展*, 2021, 42(3): 89–99]
- SAHU B C, ADHIKARI S, DEV L. Carbon, nitrogen and phosphorus budget in shrimp (*Penaeus monodon*) culture ponds in eastern India. *Aquaculture International*, 2013, 21(2): 453–466
- SU Y P, MA S, TIAN X L, *et al.* An experimental study on nitrogen, phosphorus and carbon budgets in intensive pond of shrimp *Fenneropenaeus chinensis*. *South China Fisheries Science*, 2009, 5(6): 54–58 [苏跃朋, 马甦, 田相利, 等. 中国明对虾精养池塘氮、磷和碳收支的研究. *南方水产*, 2009, 5(6): 54–58]
- SUN W, BOYD C E. Phosphorus and nitrogen budgets for inland, saline water shrimp ponds in Alabama. *Fisheries and Aquaculture Journal*, 2013, 4(2): 1–5
- TEICHERT-CODDINGTON D R, MARTINEZ D, RAMIREZ E. Partial nutrient budgets for semi-intensive shrimp farms in Honduras. *Aquaculture*, 2000, 190(1/2): 139–154
- THIRUMALINI S, JOSEPH K. Correlation between electrical conductivity and total dissolved solids in natural waters. *Malaysian Journal of Science*, 2009, 28(1): 55–61
- TIAN X L, LI D S, DONG S L, *et al.* An experimental study on closed-polyculture of penaeid shrimp with tiapia and constricted tagelus. *Aquaculture*, 2001, 202: 57–77
- TU X H, XIAO B D, XIONG J, *et al.* A simple miniaturised photometrical method for rapid determination of nitrate and nitrite in freshwater. *Talanta*, 2010, 82(3): 976–983
- WANG C C, ZHANG K, XIE J, *et al.* Denitrification potential evaluation of a newly indigenous aerobic denitrifier isolated from largemouth bass *Micropterus salmoides* culture pond. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 2018, 36(3): 913–925
- WERLER R R. Rate of loss of ammonia from water to the atmosphere. *Journal of the Fisheries Research Board of Canada*, 2011, 36(6): 685–689
- YANG P, LAI D Y F, JIN B S, *et al.* Dynamics of dissolved nutrients in the aquaculture shrimp ponds of the Min river estuary, China: Concentrations, fluxes and environmental loads. *Science of the Total Environment*, 2017, 603/604: 256–267
- ZHANG K, XIE J, YU D G, *et al.* A comparative study on the budget of nitrogen and phosphorus in polyculture systems of snakehead with bighead carp. *Aquaculture*, 2018, 483: 69–75
- ZHANG K, YU D G, LI Z F, *et al.* Influence of eco-substrate addition on organic carbon, nitrogen and phosphorus budgets of intensive aquaculture ponds of the Pearl River, China. *Aquaculture*, 2020, 520: 734868
- ZHAO L, WANG F, SUN D, *et al.* Distribution of nutrients in the pore water and overlying water in grass carp *Ctenopharyngodon idellus* polyculture system. *Progress in Fishery Sciences*, 2011, 32(2): 70–77 [赵蕾, 王芳, 孙东, 等. 草鱼复合养殖系统间隙水与上覆水中营养盐分布特征. *渔业科学进展*, 2011, 32(2): 70–77]
- ZHU Y, GONG W B, XIE J, *et al.* Identification and denitrification characteristics of the aerobic denitrifying bacteria *Pseudomonas furukawa* II ZS1. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2020, 44(4): 895–903 [朱云, 龚望宝, 谢骏, 等. 好氧反硝化细菌的鉴定及其脱氮特性研究. *水生生物学报*, 2020, 44(4): 895–903]
- ZOU L Y, CHENG X C. Water quality evaluation index and conversion method of UIA. *Fisheries Science*, 2002, 21(2): 42–43 [邹玲媛, 承宪成. 非离子氨(UIA)水质评价指标及换算方法. *水产科学*, 2002, 21(2): 42–43]

## Study on Organic Carbon, Nitrogen, and Phosphorus Budgets of Zero-Water Exchange Ponds of Grass Carp, Bighead Carp, and Crucian Carp

ZHANG Kai, WANG Guangjun, GONG Wangbao, YU Ermeng,  
LI Zhifei, XIA Yun, TIAN Jingjing, XIE Jun<sup>①</sup>

(Pearl River Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Key Laboratory of Tropical and Subtropical Fishery Resource Application and Cultivation, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Guangdong Ecological Remediation of Aquaculture Pollution Research Center, Guangzhou, Guangdong 510380, China)

**Abstract** Presently, aquaculture production is increasing to meet the increasing demand for protein, and the total area of aquaculture ponds worldwide was 5.4 million hectares in 2016. However, pond aquaculture causes serious environmental problems. Animals generally use only 20%~30% of the input nutrients in feed, and the majority of the remainder are dispersed in the aquaculture system, leading to an increasing waste load inside the aquaculture pond system. The conventional way to improve the aquaculture pond environment is by changing water, however, wastewater drainage is not in accordance with the water shortage situation in China. Additionally, aquaculture wastewater discharge affects the surrounding environment. It showed that China's seawater ponds discharge  $4.77 \times 10^4$  and  $3.75 \times 10^3$  tons of nitrogen and phosphorus, respectively, into surrounding seas annually. According to our previous research results, it is estimated that China's freshwater aquaculture ponds discharge  $2.79 \times 10^5$  and  $2.89 \times 10^4$  tons of nitrogen and phosphorus, respectively, into the surrounding waters annually.

To reduce the impact of aquaculture wastewater on the environment, our research team built a zero-water exchange aquaculture mode based on the polyculture system of grass carp (*Ctenopharyngodon idella*), bighead carp (*Aristichthys nobilis*), and crucian carp (*Carassius carassius*). At present, this mode has achieved zero-water exchange for four years, and the annual yield is 96 000 kg/hm<sup>2</sup>. However, the mechanism of zero-water exchange is unclear.

In aquaculture ponds, the organic carbon, nitrogen, and phosphorus contents can directly reflect changes in the aquaculture environment, and the budget of organic carbon, nitrogen, and phosphorus can reflect the nutrient accumulation and utilization efficiency of nutrients by aquaculture animals. Quantifying the budget of organic carbon, nitrogen, and phosphorus can aid the understanding of the system from the material cycle and energy flow, and is of considerable significance for the management and optimization of the system at the ecosystem level. Therefore, this study used the zero-water exchange pond of grass, bighead, and crucian carp as the experimental group, and a common pond for grass, bighead, and crucian carp as the control group. The carbon, nitrogen, and phosphorus budget characteristics of these two groups were studied to provide a theoretical reference for optimizing the zero-water exchange culture mode. This study was conducted between January, 2017 and November, 2018. The results showed that feed was the main source of organic carbon, nitrogen, and phosphorus in the experimental and control groups, contributing 77.06%, 92.08%, and 94.18% in the experimental group, and 81.00%, 92.77%, and 95.63% in the control group, respectively. The main output of organic carbon, nitrogen, and phosphorus was sediment accumulation, which accounted for 43.32%, 61.40%, and 78.71% of the input nutrients in the experimental group and 22.10%, 52.82%, and 79.58% of that in the control group, respectively. Harvesting the fish in the experimental and control groups accounted for 10.08% and

① Corresponding author: XIE Jun, E-mail: xiejunhy01@126.com

13.05% of input carbon, 21.00% and 25.57% of input nitrogen, and 15.41% and 18.60% of input phosphorus, respectively. The water accumulation amount and accumulation rates of carbon, nitrogen, and phosphorus in the zero-water exchange ponds were significantly lower than those in the common pond ( $P<0.05$ ), and the water accumulation rates decreased by 92.91%, 88.52%, and 87.12%, respectively. The sediment accumulation of nitrogen and phosphorus in the zero-water exchange pond was significantly higher than that in the common pond; however, the sediment accumulation rates of carbon and nitrogen in the zero-water exchange pond were significantly lower than those in the common pond ( $P<0.05$ ), decreasing by 48.99% and 13.97%, respectively. The carbon, nitrogen, and phosphorus utilization rates of the zero-water exchange pond were significantly higher than those of the normal pond ( $P<0.05$ ), increasing by 29.49%, 21.72%, and 20.65%, respectively. These results indicate that the zero-water exchange mode can effectively reduce nutrient accumulation and improve the material utilization rate, representing a green and efficient aquaculture mode. Considering the nutrient emissions of Chinese aquaculture, the zero-water exchange mode has a good application potential.

**Key words** *Ctenopharyngodon idella*; *Aristichthys nobilis*; *Carassius carassius*; Zero-water exchange; Nutrient