

## 两种营养源对主养草鱼池塘浮游生物群落结构与碳/氮转化的影响

王龙升<sup>1,2,3</sup>, 周琼<sup>1,2,3\*</sup>, 谢从新<sup>1,2,3</sup>, 申明华<sup>1,2,3</sup>,  
周根根<sup>1,2,3</sup>, 何绪刚<sup>1,2,3</sup>, 李大鹏<sup>1,2,3</sup>

(1. 华中农业大学水产学院, 农业部淡水生物繁育重点实验室, 湖北武汉 430070;

2. 淡水水产健康养殖湖北省协同创新中心, 湖北武汉 430070;

3. 池塘健康养殖湖北省工程实验室, 湖北武汉 430070)

**摘要:** 为探讨主养草鱼池塘主要生源要素的营养循环过程与能量转化效率, 本实验运用稳定同位素( $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$ )与C/N分析技术, 研究两种不同投喂营养源(苏丹草、人工饲料)对主养草鱼池塘浮游生物群落结构、C-N营养转化可能存在的影响。结果显示, 两种投喂营养源对浮游生物的群落结构没有显著的影响, 但投喂苏丹草更有利于浮游生物的群落增长。在投喂苏丹草的池塘, 绝大部分苏丹草的能量被草鱼、团头鲂所利用(84%), 而鲢、鳙利用较少(6.8%)。苏丹草对水体中颗粒有机物(POM)贡献了7.4%的能量。在投喂人工饲料的池塘, 70.9%的人工饲料能量被草鱼和团头鲂利用。由于人工饲料的颗粒性特征, 有少量饲料形成的碎屑被鳙利用(5.1%), 另有8.1%和12%的能量分别贡献于POM和沉积物。研究表明, 两种饲料源的营养元素首先被草食性鱼类利用, 其次通过水体中浮游生物以及残饵、鱼类粪便传递给滤食性鱼类, 最后归于沉积物。与人工饲料相比, 苏丹草的营养元素更多被鱼类利用, 较少浪费于沉积物中, 其传递到沉积物的过程较慢。鱼类的能量转化与投喂的饵料密切相关, 投喂苏丹草池塘的鱼类能量转化效率要高于投喂人工饲料的池塘。

**关键词:** 草鱼; 池塘养殖; 营养循环; 转化效率; 碳氮比; 稳定同位素

**中图分类号:** S 965.1

**文献标志码:** A

池塘养殖是世界淡水水产养殖的主要方式之一<sup>[1]</sup>, 对于世界水产养殖总量的贡献举足轻重<sup>[2]</sup>。主养草鱼(*Ctenopharyngodon idella*)是我国池塘精养的主要放养模式, 其养殖年产量占淡水养殖总产量的20%左右<sup>[3]</sup>。由于主养草鱼池塘在养殖过程中多采用投喂配合饲料的方式, 其过量的营养源在池塘水体和沉积物中得以积累, 不仅污染水质, 而且影响水产品的质量安全, 严重制约水产养殖业的可持续发展。因此, 改变外源性饲料的投喂方式、优化养殖模式已成为草

鱼精养池塘模式亟待解决的关键问题。

利用人工配合饲料与青饲料搭配投喂可在主养草鱼池塘中取得较好的生态及经济效益<sup>[4-6]</sup>。投喂人工配合饲料能满足草鱼生长所需的蛋白质含量高、营养全面、投饲方便、促生长明显等优势, 深受广大养殖户的青睐。然而, 长期摄食配合饲料会使草鱼肠道黏膜细胞及消化腺体细胞代谢受阻, 肝胰脏的生理功能不能正常维持, 导致草鱼维生素缺乏, 同时能引起一系列营养过剩的生理性疾病。投喂人工配合饲

收稿日期: 2016-06-15 修回日期: 2016-10-10

资助项目: 现代农业产业技术体系建设专项(CARS-46); 中央高校基本科研业务费专项(2662015PY119); 华中农业大学“国家级大学生创新创业训练计划”(105042016054); 华中农业大学大学生科技创新基金(2016150)

通信作者: 周琼, E-mail: hainan@mail.hzau.edu.cn

料的草鱼通常身体短胖、脂肪含量高、口感欠佳<sup>[4, 7-8]</sup>。相比较而言, 投喂青饲料不仅能有效降低养殖成本, 在一定程度上降低养殖风险, 解决单纯投喂人工配合饲料的维生素缺乏问题<sup>[5-6]</sup>, 并且能缓解残饵导致的水体氨氮与亚硝态氮过高而引起的水质恶化, 改善草鱼的肌肉品质<sup>[4-5, 9]</sup>。草鱼长期以水陆生青饲料为食, 完全改食人工饲料后, 缺乏维生素等生物活性物质。如果改用颗粒饲料和青饲料搭配投喂, 则可控制脂肪肝的产生, 加速鱼体的生长<sup>[10]</sup>。采用人工配合饲料与青饲料搭配投喂草鱼模式的研究已取得了一些进展, 但主要集中于人工配合饲料与青饲料搭配投喂对草鱼养殖产量和经济效益方面的影响<sup>[4-6]</sup>, 而对于池塘营养循环和水产品转化效率的影响鲜有报道。

稳定同位素作为一种天然的示踪物, 其使用安全、准确、有效, 在水产养殖、水域生态和环境科学等领域中的应用日益广泛。生物的稳定同位素组成总是与其食物的同位素组成一致, 并随着食物组成的改变而发生相应的变化, 是生物生存状况的理想指示物, 为研究水域生态系统食物网结构与功能、物质流动与能量循环提供了有力的技术支撑<sup>[11-14]</sup>。在池塘养殖领域, 碳、氮稳定同位素分析已能用于解决人工饲料对刺参(*Apostichopus japonicus*)幼参生长的食物贡献率<sup>[15]</sup>、东海银鲳(*Pampus argenteus*)的可利用食物来源<sup>[16]</sup>、滤食性鱼类的去污作用<sup>[17]</sup>等实际问题。

本研究主要运用碳、氮稳定同位素技术与稳定同位素模型, 结合浮游生物群落结构、池塘食物网结构对比分析, 在实行限量投喂条件下探讨两种不同投喂方式[人工饲料、苏丹草(*Sorghum sudanense*)]对主养草鱼精养池塘低营养级生物群落结构、物质循环与能量利用可能存在的影响, 为构建水体污染轻、饵料浪费少、鱼类肌肉品质好的主养草鱼池塘健康养殖模式提供理论基础和研究方法。

## 1 材料与方法

### 1.1 实验设计

本实验于2014年5—10月在湖北公安崇湖渔场华中农业大学教学科研基地进行, 选择4口大

小相同的邻近池塘(11#~14#)作为实验池塘, 每口池塘长67 m、宽37 m, 水深2 m左右。实验池塘均主养草鱼, 并混养团头鲂(*Megalobrama amblycephala*)、鲢(*Hypophthalmichthys molitrix*)、鳙(*Aristichthys nobilis*)3种鱼类, 鱼种放养规格相同。具体放养比例为每口池塘草鱼200 kg(平均体质量100 g)、团头鲂30 kg(平均体质量50 g)、鲢20 kg(平均体质量50 g)、鳙20 kg(平均体质量50 g)。由于苏丹草含有丰富的可消化营养物质, 适口性好, 为草鱼、团头鲂等鱼类喜爱的青草饲料<sup>[18]</sup>, 实验前在该基地种植苏丹草, 作为青草饲料投喂的营养源。人工饲料则使用海大公司提供的相同配方草鱼混养成鱼料, 其主要原料组成: 鱼粉、豆粕、棉粕、菜粕、小麦、饲料添加剂、多种维生素及丙酸型防霉剂等。主要营养成分含量: 粗蛋白28%、粗纤维17%、粗脂肪2.5%、赖氨酸1.3%、水分13%。

为研究苏丹草与人工饲料两种不同投喂饲料源对主养草鱼池塘营养循环与转化效率的影响, 同时避免实验前池塘之间存在的差异对实验结果可能造成的影响, 实验前期(2—5月)4口池塘均采用人工饲料投喂。6月开始向11#和12#池塘投喂苏丹草并持续至实验结束(10月), 而13#和14#池塘在整个养殖过程中的饲料均保持不变。本实验以13#、14#池塘作为对照, 从7月份开始逐月监测11#、12#池塘在改变投入饲料之后的浮游生物群落结构与C-N营养归趋。由于养殖周期较长, 为确保青草饲料能满足鱼类不断生长的需要, 同时不造成浪费, 本实验采取限量投喂: 苏丹草投喂量由6月80 kg/d逐渐提高到10月的150 kg/d, 人工饲料从6月20 kg/d逐步提高到10月的40 kg/d。

### 1.2 实验方法与样品处理

本实验在2014年6—10月逐月采样, 收集鱼类肌肉、水体颗粒有机物(POM)、沉积物以及浮游生物等样品。在每个采样日期, 开投饵机诱鱼进食并撒网捕鱼, 每种鱼捕获5~10条。尽量选择大小相近的个体, 取鱼的背部肌肉, 用蒸馏水冲洗干净, 防止残留血液和鳞片影响样品测定的精确度, 将所取的背部肌肉放入EP管<sup>[12-13]</sup>。在养殖基地池塘埂随机采集苏丹草叶片5份样品, 放于封口袋中, 同时收集投喂的人工饲料

样品5份,使用塑料EP管保存。用5 L有机玻璃采水器采集池塘近投饵台和远离投饵台表层水,充分混匀,通过真空泵抽滤至预烧过的Whatman GF/F滤膜,作为POM样品。通过彼得逊采泥器采集池塘底泥表层沉积物样品,装入塑料封口袋保存,每口池塘设置2个采样位置——近投饵台和远离投饵台。

所有用于稳定同位素与元素比分析的样品通过便携式冰箱带回实验室,放入烘箱60 °C、48 h烘干至恒重,并用石英研钵和研棒将样品研磨成均匀粉末,保存于干燥器用作稳定性同位素和元素分析测定<sup>[12-13, 19]</sup>。在碳稳定同位素( $\delta^{13}\text{C}$ )分析前,颗粒有机物与沉积物样品需加1 mol/L的盐酸酸化处理,然后进入稳定同位素分析质谱测定<sup>[20]</sup>。

浮游生物的采样与定量分析方法参照《淡水浮游生物研究方法》<sup>[21-22]</sup>。浮游植物与浮游动物的密度、生物量测算方法参照<sup>[21-23]</sup>。

### 1.3 稳定同位素分析与同位素模型

稳定性同位素分析所用的仪器为Carlo Erba EA-1110元素分析仪与Delta Plus Finnigan (Thermo Scientific, USA)同位素比率质谱连用仪。分析碳( $\delta^{13}\text{C}$ )、氮( $\delta^{15}\text{N}$ )同位素的参照物分别为VPDB (Pee Dee Belemnite)和空气中纯净的 $\text{N}_2$ 。标准物质分别为国际通用的IAEA-USGS24和IAEA-USGS-25。分析结果表示为( $\delta^{13}\text{C}$ )和( $\delta^{15}\text{N}$ ):

$$\delta R(\text{‰}) = [(X_{\text{sample}} - X_{\text{standard}})/X_{\text{standard}}] \times 10^3 \quad (1)$$

式中, $R$ 代表测量的重同位素 $^{13}\text{C}$ 或 $^{15}\text{N}$ , $X$ 代表某一同位素重轻之比,如 $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ 或 $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$ 。根据 $\delta$ 值的正负判断重轻同位素之间的比重,若 $\delta$ 为正值,说明所测样品的重同位素含量大于轻同位素含量,当 $\delta$ 为负值时则相反。同时记录肌肉样品的碳( $\delta^{13}\text{C}$ )、氮同位素( $\delta^{15}\text{N}$ )分析误差<sup>[12-13, 19, 24]</sup>。本实验中生物样品的 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$ 分析精确度分别为0.1‰和0.3‰。

IsoSource是基于微软Visual Basic语言开发的Windows操作系统软件,由Robert Gibson (Computer Sciences Corp.)公司开发完成,用于稳定同位素混合模型的计算。利用稳定同位素比值的计算进行资源的分区,处理多种食物资源的情况。需要注意的是,每个解代表了一个资源百分比的组合,在混合模型中要满足同位素质量

守恒<sup>[25]</sup>。本研究运用IsoSource软件评价两种不同投喂饲料源分别在相应池塘系统中的营养归趋。假定饲料源(苏丹草、人工饲料)在投入池塘后其营养和能量主要有3种去向:鱼类(草食性和滤食性)、POM和沉积物,则饲料源对池塘养殖鱼类、水体和沉积物的能量贡献可通过稳定同位素质量平衡混合模型<sup>[25]</sup>进行评价:

$$\delta^{13}\text{C}_{\text{feed}} = F_{\text{fish}}\delta^{13}\text{C}_{\text{fish}} + F_{\text{POM}}\delta^{13}\text{C}_{\text{POM}} + F_{\text{sediment}}\delta^{13}\text{C}_{\text{sediment}} \quad (2)$$

$$\delta^{15}\text{N}_{\text{feed}} = F_{\text{fish}}(\delta^{15}\text{N}_{\text{fish}} - 3.4\text{‰}) + F_{\text{POM}}\delta^{15}\text{N}_{\text{POM}} + F_{\text{sediment}}\delta^{15}\text{N}_{\text{sediment}} \quad (3)$$

$$1 = F_{\text{fish}} + F_{\text{POM}} + F_{\text{sediment}} \quad (4)$$

式(2)~(4)中:下标feed与fish、POM、sediment分别代表饲料源与鱼类、颗粒有机物、沉积物; $F_{\text{fish}}$ 、 $F_{\text{POM}}$ 、 $F_{\text{sediment}}$ 为饲料源对池塘鱼类肌肉、水体、沉积物的贡献百分比; $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$ 代表池塘中各种物质的稳定性碳、氮同位素比值。式(3)中由于鱼类摄食饲料源之后其氮同位素值在饲料的基础上会增加3.4‰<sup>[19, 26]</sup>,而饲料在进入水体和沉积物后其 $\delta^{15}\text{N}$ 值基本不变,因此在模型计算时式(3)中鱼类的 $\delta^{15}\text{N}$ 值要减去3.4‰。

### 1.4 数据处理

#### 多样性的分析

$$\text{Shannon-Wiener 指数 } H' = -\sum(N_i/N)\log_2(N_i/N) \quad (5)$$

$$\text{Simpson 指数 } D = 1 - \text{SUM}[N_i(N_i - 1)/N(N - 1)] \quad (6)$$

$$\text{Margalef 指数 } d = (S - 1)/\log_2 N \quad (7)$$

$$\text{Pielou 指数 } J = H'/\log_2 S \quad (8)$$

式中, $N_i$ 为*i*种的个体数, $N$ 为所有种类总个体数, $S$ 为物种数。

**优势种的确定** 全年调查周丛藻类的优势种,根据每个种类的优势度值( $Y$ )来确定:

$$Y = (N_i/N) \times F_i \quad (9)$$

式中, $F_i$ 为第*i*种出现的频率。 $Y$ 值大于0.02的种类为全年调查的优势种<sup>[27]</sup>。

**统计分析** 本研究所有数据的分析与图表的制作采用Excel 2003和Origin 9.0软件完成。所有的统计检验均通过SPSS 19.0软件分析,差异显著性检验采用One-Way ANOVA方法,当 $P < 0.05$ 时被认为存在显著性差异。

## 2 结果

### 2.1 投喂苏丹草与人工饲料池塘的浮游植物群落结构

**浮游植物种类组成** 投喂苏丹草的实验池塘(11#、12#)共鉴定出浮游植物6门32属54种(图1), 其中硅藻门7属15种, 蓝藻门4属5种, 绿藻门15属24种, 裸藻门3属7种, 甲藻门1属1种, 隐藻门2属2种。优势种为嗜蚀隐藻(*Cryptomonas erosa*)、普通小球藻(*Chlorella vulgaris*)、尖尾蓝隐藻(*Chroomonas acuta*)、卷曲纤维藻(*Ankistrodesmus convolutus*)和银灰平裂藻(*Merismopedia glauca*)。投喂人工饲料的实验池塘(13#、14#)共鉴定出浮游植物5门28属47种(图1), 其中硅藻门8属13种, 蓝藻门4属4种, 绿藻门13属22种, 裸藻门1属6种, 隐藻门2属2种。优势种为嗜蚀隐藻、普通小球藻、四足十字藻(*Crucigenia tetrape-dia*)、尖尾蓝隐藻、卷曲纤维藻和银灰平裂藻。

**浮游植物密度与生物量** 总体来说苏丹草池塘浮游植物的密度高于人工饲料池塘(图2),

除了8月份, 人工饲料池塘的密度( $11.0 \times 10^6$ 个/L)比苏丹草池塘( $10.8 \times 10^6$ 个/L)的高 $0.2 \times 10^6$ 个/L; 7月份苏丹草池塘的浮游植物平均密度( $7.3 \times 10^6$ 个/L)比人工饲料池塘( $6.0 \times 10^6$ 个/L)高出 $1.3 \times 10^6$ 个/L; 9月份苏丹草池塘的浮游植物平均密度( $4.3 \times 10^6$ 个/L)比人工饲料池塘( $2.5 \times 10^6$ 个/L)高出 $1.8 \times 10^6$ 个/L; 10月份苏丹草池塘( $8.7 \times 10^6$ 个/L)比人工饲料池塘( $7.6 \times 10^6$ 个/L)高出 $1.1 \times 10^6$ 个/L。投喂苏丹草与人工饲料池塘的浮游植物密度之间无显著性差异( $P=0.95$ ,  $t$ -test)。4个月份的苏丹草池塘浮游植物的生物量均高于人工饲料池塘。依次为9.2与8.7 mg/L、18.4与15.9 mg/L、7.4与3.4 mg/L、14.6与12.4 mg/L。

**浮游植物多样性指数** 苏丹草池塘7—10月Shannon-Wiener多样性指数( $H'$ )、Simpson多样性指数( $D$ )、Pielou均匀度指数( $J$ )和Margalef丰富度指数( $d$ )的平均值分别为2.89、0.78、0.68和2.32, 变化范围依次为2.49~3.44、0.74~0.87、0.62~0.80和2.15~2.50(图3)。人工饲料池塘7—10月Shannon-Wiener多样性指数( $H'$ )、

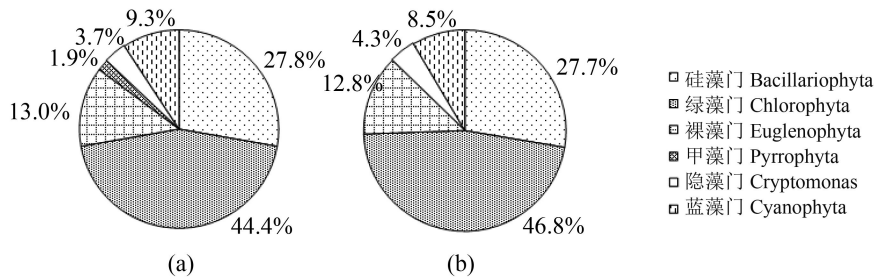


图1 投喂苏丹草与人工饲料池塘的浮游植物种类组成

(a)苏丹草池塘; (b)人工饲料池塘

Fig. 1 Species composition of phytoplankton in ponds fed by Sudan grass and formula feed

(a)Sudan grass pond; (b)formula feed pond

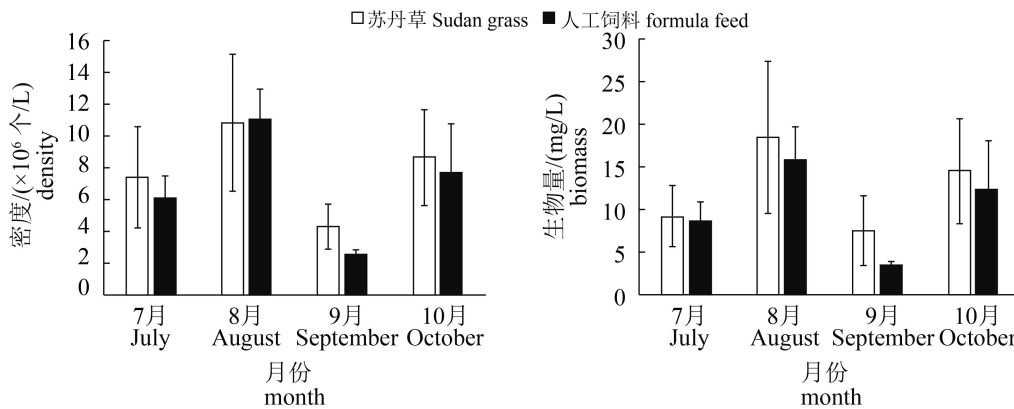


图2 投喂苏丹草与人工饲料池塘的浮游植物密度和生物量

Fig. 2 The density and biomass of phytoplankton in ponds fed by Sudan grass and formula feed

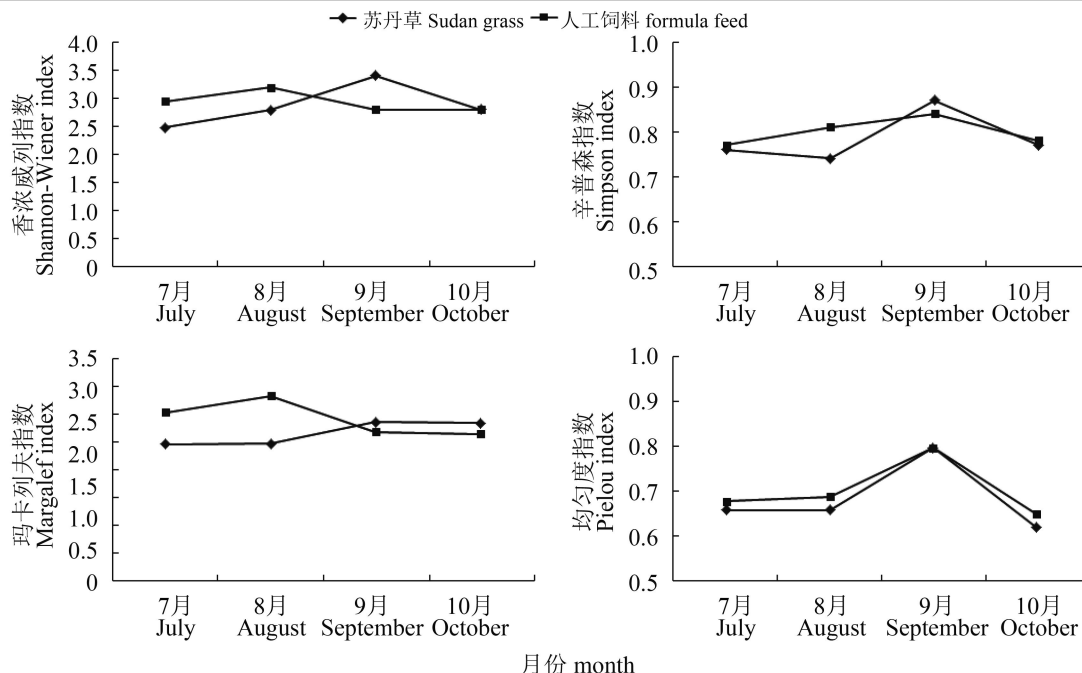


图3 投喂苏丹草与人工饲料池塘浮游植物的多样性指数

Fig. 3 The biodiversity index of phytoplankton in ponds fed by Sudan grass and formula feed

Simpson多样性指数(D)、Pielou均匀度指数(J)和Margalef丰富度指数(d)的平均值分别为2.96、0.80、0.70和2.55,变化范围依次为2.82~3.22、0.77~0.84、0.65~0.80和2.31~2.91。

2.2 投喂苏丹草与人工饲料池塘的浮游动物群落结构

浮游动物种类组成 投喂苏丹草池塘中共鉴定出浮游动物36属75种(图4),其中原生动物15属25种、轮虫17属44种、枝角类2属4种、桡足类2属2种,优势种主要为放射太阳虫(*Actinophrys*

*sol*)、盘状鞍甲轮虫(*Lepadella patella*)、裂足轮虫(*Schizocerca diversicornis*)、舞跃无柄轮虫(*Ascomorpha saltans*)。投喂人工饲料池塘共鉴定出40属83种,其中原生动物18属25种,轮虫18属46种,枝角类2属4种,桡足类2属2种,优势种主要为放射太阳虫、矩形龟甲轮虫(*Keratella quadrata*)、绿急游虫(*Strombidium viride*)、壶状臂尾轮虫(*Brachionus urceus*)、舞跃无柄轮虫、针簇多肢轮虫(*Polyarthra trigla*)。

浮游动物密度与生物量 7月份苏丹草养殖池塘中浮游动物平均密度为 $5.24 \times 10^2$ 个/L,而

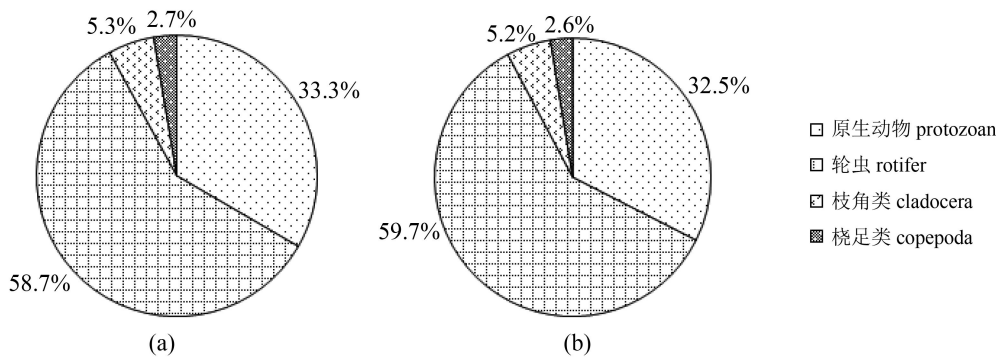


图4 投喂苏丹草和人工饲料池塘的浮游动物种类组成

(a)苏丹草池塘; (b)人工饲料池塘

Fig. 4 Species composition of zooplankton in ponds fed by Sudan grass and formula feed

(a)Sudan grass pond; (b)formula feed pond

人工饲料池塘平均密度为 $4.44 \times 10^2$ 个/L(图5); 8月份苏丹草与人工饲料养殖池塘平均密度分别为 $1.28 \times 10^2$ 和 $3.06 \times 10^2$ 个/L; 9月份苏丹草养殖池塘浮游动物的平均密度分别为 $1.47 \times 10^2$ 和 $2.57 \times 10^2$ 个/L; 10月份苏丹草池塘浮游动物的平均密度分别为 $8.48 \times 10^2$ 和 $8.95 \times 10^2$ 个/L。2种类型池塘的浮游动物密度均在10月份达到最大, 8—9月份最低,

2种投喂池塘的浮游动物密度无显著性差异( $P=0.23$ ,  $t$ -test), 但是浮游动物密度的整体趋势为苏丹草池塘低于人工饲料池塘(图5)。浮游动物的生物量在7和10月较高, 8—9月较低, 2种投喂模式下浮游动物的生物量无显著性差异( $P=0.17$ ,  $t$ -test), 浮游动物生物量的月份变化与密度变化趋势保持一致(图5)。

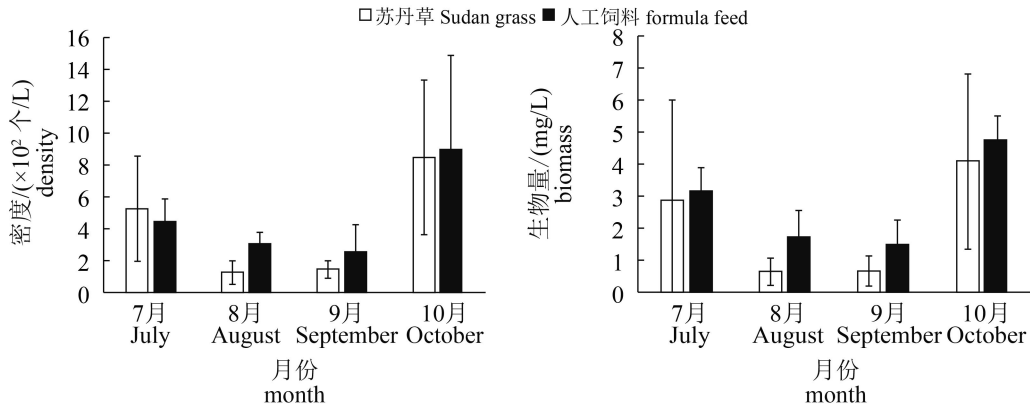


图5 投喂苏丹草与人工饲料的浮游动物密度与生物量

Fig. 5 Density and biomass of zooplankton in ponds fed by Sudan grass and formula feed

浮游动物多样性指数 苏丹草池塘7—10月Shannon-Wiener多样性指数( $H'$ )和Margalef丰富度指数( $d$ )的平均值分别为2.26和1.32, 变化范围依次为2.11~2.46和1.12~1.47(图6)。人工饲料池塘7—10月Shannon-Wiener多样性指数( $H'$ )和Margalef丰富度指数( $d$ )的平均值分别为2.28和1.48, 变化范围分别为2.15~2.42和1.23~1.68。

丹草比人工饲料具有更为富集的 $\delta^{13}C$ 值, 分别为 $-12.96\text{‰}$ 和 $-23.73\text{‰}$ 。投喂苏丹草的池塘中草鱼、团头鲂、鲢、鳙的 $\delta^{13}C$ 值分别为 $-11.97\text{‰}$ 、 $-12.11\text{‰}$ 、 $-18.72\text{‰}$ 和 $-19.15\text{‰}$ , 而在人工饲料池塘几种鱼类的 $\delta^{13}C$ 值分别为 $-22.78\text{‰}$ 、 $-22.99\text{‰}$ 、 $-28.41\text{‰}$ 和 $-27.11\text{‰}$ 。POM和沉积物的 $\delta^{13}C$ 值在苏丹草池塘中为 $-15.26\text{‰}$ 和 $-23.79\text{‰}$ , 而在人工饲料池塘中为 $-25.52\text{‰}$ 和 $-24.61\text{‰}$ 。对于 $\delta^{15}N$ 值而言, 苏丹草和人工饲料分别为 $1.58\text{‰}$ 和 $4.02\text{‰}$ 。投喂苏丹草池塘中草鱼、团头鲂、鲢、鳙的 $\delta^{15}N$ 值分别为 $5.46\text{‰}$ 、 $5.10\text{‰}$ 、 $6.77\text{‰}$ 和 $7.24\text{‰}$ , 而在人工饲料池塘几

2.3 两种池塘稳定同位素值与C/N值

2种投喂池塘的饲料源、鱼类肌肉、POM与沉积物样品的稳定同位素和元素比值见表1。苏

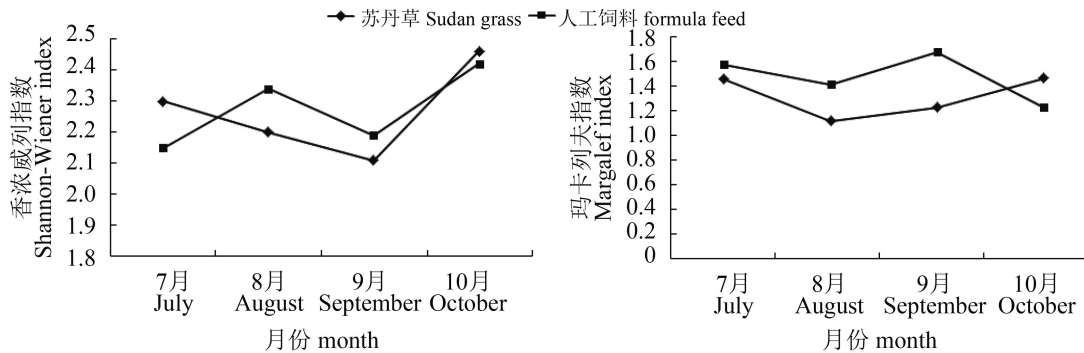


图6 投喂苏丹草与人工饲料池塘的浮游动物的多样性指数

Fig. 6 The biodiversity index of zooplankton in ponds fed by Sudan grass and formula feed

表 1 两种养殖池塘饲料源、鱼类肌肉、颗粒有机物与沉积物的稳定同位素和C/N值

Tab. 1 Isotopic compositions and C/N ratios of food web components in ponds fed by Sudan grass and formula feed

池塘类型 pond type	样品类别 sample category	$\delta^{13}\text{C}/\text{‰}$	$\delta^{15}\text{N}/\text{‰}$	C/%	N/%	C/N
苏丹草 <i>S. sudanense</i>	苏丹草 <i>S. sudanense</i>	-12.96±0.35	1.58±0.40	26.58±3.8	10.60±1.6	2.5 : 1
	草鱼 <i>C. idella</i>	-11.97±0.17	5.46±0.51	41.76±4.1	13.01±1.4	3.2 : 1
	团头鲂 <i>M. amblycephala</i>	-12.11±0.27	5.10±0.28	39.72±3.7	13.01±1.8	3.1 : 1
	鳊 <i>A. nobilis</i>	-19.15±0.32	7.24±0.54	38.73±1.9	12.10±1.3	3.2 : 1
	鲢 <i>H. molitrix</i>	-18.72±0.43	6.77±0.45	38.84±2.5	12.22±1.7	3.2 : 1
	POM	-15.26±0.32	4.68±0.57	0.86±0.05	0.12±0.04	7.2 : 1
	沉积物 sediment	-23.79±0.14	2.03±0.33	2.44±0.24	0.23±0.05	10.6 : 1
人工饲料 formula feed	人工饲料 formula feed	-23.73±0.38	4.02±0.28	22.19±1.7	17.29±1.6	1.3 : 1
	草鱼 <i>C. idella</i>	-22.78±0.23	6.25±0.18	41.08±2.7	12.74±1.3	3.2 : 1
	团头鲂 <i>M. amblycephala</i>	-22.99±0.45	6.79±0.32	38.74±3.2	12.04±1.6	3.2 : 1
	鳊 <i>A. nobilis</i>	-27.11±0.27	7.38±0.42	41.53±2.4	13.03±1.2	3.2 : 1
	鲢 <i>H. molitrix</i>	-28.41±0.30	6.92±0.56	42.22±2.7	13.01±1.5	3.2 : 1
	POM	-25.52±0.29	3.87±0.22	0.76±0.13	0.07±0.01	10.3 : 1
	沉积物 sediment	-24.61±0.12	2.77±0.18	2.44±0.29	0.22±0.03	11.1 : 1

种鱼类的  $\delta^{15}\text{N}$  值分别为 6.25‰、6.79‰、6.92‰和7.38‰。POM和沉积物的  $\delta^{15}\text{N}$  值在苏丹草池塘中为4.68‰和2.03‰，而在人工饲料池塘中为3.87‰和2.77‰。

苏丹草与人工饲料的C:N分别为2.5:1与1.3:1，投喂苏丹草的池塘中草食性的草鱼和团头鲂的C:N分别为3.2:1和3.1:1，滤食性鱼类鳊和鳊的C:N比均为3.2:1，POM的C:N为7.2:1，沉积物的C:N为10.6:1。投喂人工饲料的池塘中草鱼和团头鲂的C:N均为3.2:1，鳊、鳊的C:N均为3.2:1，POM的C:N为10.3:1，沉积物的C:N为11.1:1。

2.4 两种营养源投喂池塘的食物网结构图

水体消费者与其食物间稳定同位素比率存在有规律的联系，消费者的氮稳定同位素比值较其食物高3.4‰，而碳稳定同位素比值较其食物高0~1‰，通常可忽略不计<sup>[12-13, 19, 24, 26, 28]</sup>。基于2种类型池塘生物样品与非生物样品的  $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$  值构建其食物网结构(图7)。无论是在投喂苏丹草还是投喂人工饲料的养殖池塘，鳊和鳊均以POM为主要食物源，而池塘POM主要组成成分为浮游生物、残饵颗粒及细菌。在投喂苏丹

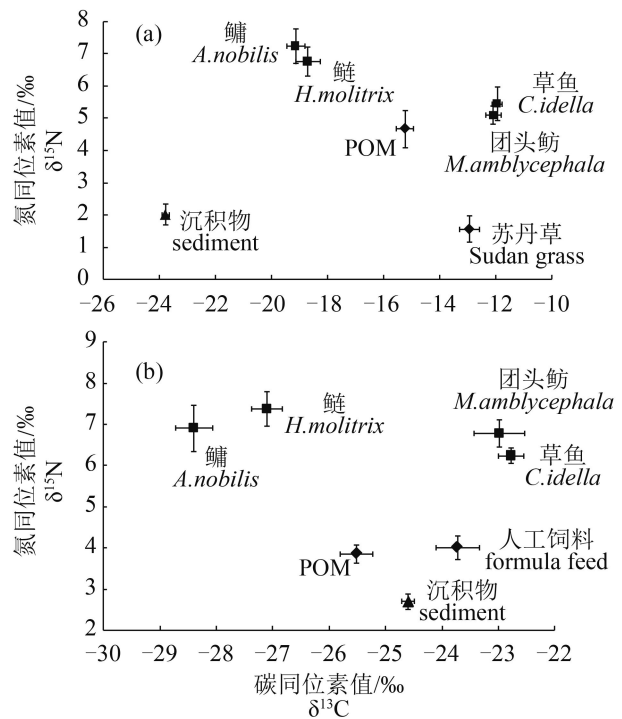


图 7 投喂苏丹草池塘(a)和人工饲料池塘(b)的食物网结构图

Fig. 7 Food web structures of ponds fed by Sudan grass (a) and formula feed (b) based on the values of  $\delta^{13}\text{C}$  and  $\delta^{15}\text{N}$

草池塘中, 草鱼和团头鲂主要摄食苏丹草, 而在投喂人工饲料的池塘中, 草鱼和团头鲂主要摄食人工饲料。此外, 苏丹草碎屑对沉积物的贡献要远小于人工饲料对沉积物的贡献, 苏丹草碎屑对POM的贡献要略小于人工饲料对POM的贡献。

### 2.5 两种营养源投喂池塘的营养归趋

运用IsoSource软件分析2种投喂饲料源对养殖鱼类、POM和沉积物的贡献比例, 2种池塘中鱼类的主要营养和能量来源与投喂的饵料密切相关

相关(图8)。在投喂苏丹草的池塘, 绝大部分苏丹草被草食性的鱼类(草鱼和团头鲂)所利用(84%), 而鲢、鳙较少利用来自苏丹草的能量源(6.8%), 这与其为滤食性鱼类有关, 苏丹草对POM贡献了7.4%的能量。相比较而言, 在投喂人工饲料的池塘中, 人工饲料70.9%的能量贡献于草鱼和团头鲂, 由于颗粒性人工饲料本身的特性, 有12%的人工饲料归于沉积物, 另有小部分饲料碎屑被鳙利用(5.1%), 人工饲料对POM贡献了8.1%的能量。

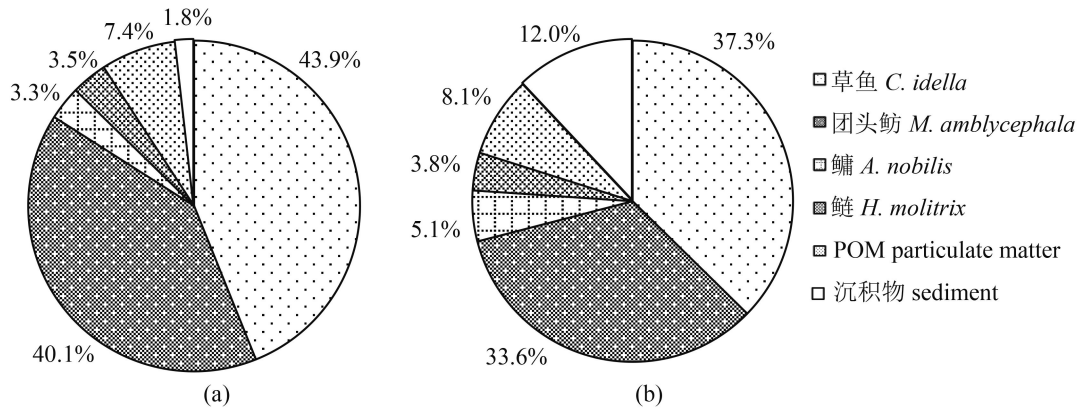


图 8 苏丹草和人工饲料在主养草鱼池塘中的营养去向

(a)苏丹草; (b)人工饲料

Fig. 8 Trophic fate of Sudan grass and formula feed in *C. idella* polyculture ponds

(a)Sudan grass pond; (b)formula feed pond

## 3 讨论

### 3.1 不同营养源投喂对主养草鱼池塘浮游生物群落的影响

藻类和微生物对养殖池塘产能、营养物质循环、饵料生物量、水质和病害控制方面起着十分关键的作用<sup>[29]</sup>。投喂苏丹草的池塘共鉴定出浮游植物6门32属54种, 而投喂人工饲料的实验池塘共鉴定出浮游植物5门28属47种, 尽管没有统计上的显著性差异, 但投喂苏丹草池塘中浮游植物种类仍多于投喂人工饲料的池塘, 并且2种池塘中浮游植物密度之间的比较也符合这个规律(图2)。这表明, 投喂苏丹草池塘的水体环境和营养水平更有利于浮游植物的生长。养殖水体的浮游动物不仅是鱼虾的饵料, 而且是水体生态系统中物质循环和能量流动的重要环节。浮游动物的组成和季节变化与池塘水质、系统内的能量和物质流动密切相关, 影响着养

殖鱼类的生长和系统的生产性能<sup>[30]</sup>。本研究中投喂人工饲料与苏丹草池塘的浮游动物种类和比例组成基本相同(图4), 这与张念<sup>[31]</sup>对主养草鱼池塘的研究结果相一致。尽管如此, 投喂苏丹草池塘的浮游动物密度仍要高于投喂人工饲料的池塘。

两种不同的投喂营养源在短期内对浮游生物群落结构没有显著的影响, 但整体上投喂苏丹草的池塘更利于浮游植物和浮游动物的生长。因此, 在投喂人工饲料的草鱼精养池塘搭配一定比例的青饲料将有利于平衡低营养级生物群落结构的作用, 保持合理的藻相和微生物群落, 有利于改善池塘生态系统的物质循环并提高生产效益。

### 3.2 不同营养源投喂对池塘营养物质循环的影响

混养模式可以优化养殖系统生态结构, 使多物种协调共生, 能有效提高系统营养物质与



能量利用率<sup>[32]</sup>。在主养草鱼的混养池塘中,草鱼和团头鲂形成的排泄物及残饵是浮游生物的主要营养来源,间接为滤食性的鲢、鳙提供食物。

本实验中,苏丹草与人工配合饲料的 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$ 值以及C/N值表现出了较大的差异(表1,图7),这为基于稳定同位素与C/N分析评价2种不同饲料源对池塘营养循环的影响提供了充分的前提条件。根据 $\delta^{13}\text{C}$ 值每隔一个营养级增加0~1‰的富集特征<sup>[12-13, 19, 26]</sup>,2种池塘中草鱼和团头鲂均快速响应其食物源的同位素特征,从而2种池塘中草鱼和团头鲂的 $\delta^{13}\text{C}$ 值存在较大差异(表1,图7)。尽管2种池塘中鲢、鳙的 $\delta^{13}\text{C}$ 值均响应了其饲料源的稳定同位素值特征,然而鲢、鳙的同位素值与相应的饲料源之间仍存在较大差距(5‰),表明鲢、鳙没有直接利用投喂的饲料源,而是在残饵和鱼粪进入水体之后增殖浮游生物,再通过浮游生物和颗粒有机物的形式间接被鲢、鳙利用(图7)。2种营养源投喂池塘中沉积物的C/N值远超过饲料源,并为饲料源C/N值的4~5倍,表明2种池塘中饲料源对沉积物的贡献较小,这与图8中稳定同位素模型计算的结果相一致。在投喂苏丹草的池塘,苏丹草与POM、沉积物的 $\delta^{13}\text{C}$ 值差异较大(尤其是苏丹草与沉积物之间),而在投喂人工饲料的池塘中,配合饲料与POM、沉积物的 $\delta^{13}\text{C}$ 值差异均较小(1‰~2‰),这表明苏丹草对于池塘POM、沉积物的贡献要低于人工饲料对于池塘POM和沉积物的贡献(图8)。此外,苏丹草的C/N值为人工配合饲料的2倍以上,但投喂苏丹草池塘中沉积物的C/N值要低于人工饲料池塘沉积物的C/N值。因此,本实验中C/N值与稳定同位素技术的研究结果均证明:苏丹草对沉积物的贡献要小于人工配合饲料对池塘沉积物的贡献。与投喂人工饲料池塘相比,投喂苏丹草池塘中苏丹草的营养更多地被鱼类利用,较少浪费在沉积物中,其营养传递到沉积物的过程要慢于投喂人工饲料的池塘。

### 3.3 不同营养源投喂对池塘营养转化效率的影响

以往的研究表明,投入池塘中的饲料仅有一小部分转化为鱼产量,而大部分的营养要素溶失在水体中或沉降到池底<sup>[17, 33]</sup>。这可能是在投喂过量饲料的情况下产生的结果,而在投喂适量饲料、搭配合理的情况下,饲料能被养殖

鱼类充分利用,排放到水体和沉积物中的营养要素将会大幅度减少<sup>[34]</sup>。毕香梅等<sup>[4]</sup>对比分析摄食青草饲料和人工配合饲料的草鱼肌肉营养成分,发现青草投喂的草鱼肌肉水分、灰分、粗脂肪、粗蛋白含量显著高于人工配合饲料组草鱼肉,表明青草组草鱼肌肉品质更高。然而仅只投喂青草饲料则降低了草鱼的生长性能,原因是青草饲料的蛋白质含量较低、氨基酸含量不平衡<sup>[35]</sup>。本实验通过单纯投喂青草饲料和人工配合饲料的方法揭示主养草鱼池塘鱼类的能量转化效率,这为研究草鱼养殖过程中合理的搭配投喂模式提供了理论基础。

基于IsoSource软件分析投喂饲料源对池塘各组分的贡献比例,养殖鱼类的主要营养来源与投喂饲料密切相关。在投喂苏丹草的池塘,苏丹草的营养大部分被草鱼和团头鲂利用(84%),而滤食性的鲢、鳙不能直接摄食苏丹草,只能通过浮游生物和颗粒有机物的形式间接利用苏丹草的能量源(6.8%)。在投喂人工饲料的池塘,人工饲料的大部分能量同样贡献于草鱼和团头鲂(70.9%)。由于颗粒性人工饲料的特性,部分沉降到池塘底部并为沉积物贡献了12%的能量。本研究中2种池塘中饲料源主要的能量均归于养殖鱼类,而以前的大多数研究则认为投入池塘中的饲料大部分营养要素流向水体中或沉降到池底<sup>[17, 33]</sup>,这主要是与本实验设计中采取定量投喂饲料源的方式有关。投喂的苏丹草由于材质较轻而漂浮于水面,能被草鱼和团头鲂充分利用,进入水体和沉积物的残饵较少。相比之下,由于自身颗粒性的特征,人工饲料既能被草食性鱼类摄取,也可以残饵和粪便的形式被滤食性鱼类直接利用。尽管如此,仍然有部分人工配合饲料沉降于池塘沉积物中。

研究表明,在定量投喂的条件下,投喂苏丹草与人工配合饲料的主养草鱼池塘中C-N营养元素大部分被主养和套养鱼类利用,仅有少量归于沉积物。与人工饲料相比,苏丹草的营养元素更多地被鱼类利用,较少浪费于沉积物中,其营养传递到沉积物的过程较慢。投喂苏丹草池塘的鱼类营养转化效率高于投喂人工饲料的池塘。

### 参考文献:

- [1] Mischke C C. Aquaculture pond of fertilization: impacts of nutrient input on production[M]. Oxford: Wiley-

- Blackwell, 2012.
- [ 2 ] 范立民, 徐跑, 吴伟. 淡水养殖池塘微生态环境调控研究综述[J]. 生态学杂志, 2013, 32(11): 3094-3100.  
Fan L M, Xu P, Wu W. Regulation of micro-ecological environment in freshwater aquaculture pond: a review[J]. Chinese Journal of Ecology, 2013, 32(11): 3094-3100(in Chinese).
- [ 3 ] 宋硕, 田相利, 王芳. 不同草鱼池塘混养系统结构优化的实验研究[J]. 水生生物学报, 2012, 36(4): 704-714.  
Song Q, Tian X L, Wang F. An experimental study on structure optimization for polyculture of grass carp with different species[J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2012, 36(4): 704-714(in Chinese).
- [ 4 ] 毕香梅, 郁二蒙, 王广军. 摄食青草和人工配合饲料的草鱼肌肉营养成分分析及比较[J]. 广东农业科学, 2011, 38(1): 132-134.  
Bi X M, Yu E M, Wang G J. Comparison and analysis of nutrition composition of grass carp raised with grass and artificial feed[J]. Guangdong Agricultural Sciences, 2011, 38(1): 132-134(in Chinese).
- [ 5 ] 陈丽婷, 肖光明, 王晓清. 投喂不同饲草的草鱼主养池塘中鱼类的生长和效益比较[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2013, 39(4): 419-422.  
Chen L T, Xiao G M, Wang X Q. Effect of different herbages on fish growth and economic efficiency in pond mainly culturing grass carp (*Ctenopharyngodon idella*)[J]. Journal of Hunan Agricultural University (Natural Science Edition), 2013, 39(4): 419-422(in Chinese).
- [ 6 ] 谭情, 王荣华, 肖光明. 不同饲喂模式对草鱼的生长性能和免疫器官的影响[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2013, 39(6): 646-649.  
Tan Q, Wang R H, Xiao G M. The growth performance and the characteristics of immune organ of grass carp under different feeding conditions[J]. Journal of Hunan Agricultural University (Natural Science Edition), 2013, 39(6): 646-649(in Chinese).
- [ 7 ] 张国辉, 何瑞国, 高红梅. 鱼类营养代谢病[J]. 北京水产, 2003(5): 16-18.  
Zhang G H, He R G, Gao H M. Diseases in fish nutrient metabolism[J]. Journal of Beijing Fisheries, 2003(5): 16-18(in Chinese).
- [ 8 ] 黄小丽. 配合饵料养殖草鱼存在问题及对策[J]. 河北渔业, 2007(2): 46, 51.  
Huang X L. Problems and countermeasures of grass carp culture raised by formula feed[J]. Hebei Fisheries, 2007(2): 46, 51(in Chinese).
- [ 9 ] 马利, 黄峰, 吴建开. 不同菜粕水平对草鱼生长, 血清生化指标和毒素残留的影响[J]. 水产学报, 2005, 29(6): 798-803.  
Ma L, Huang F, Wu J K. Effects of different rapeseed meal levels on growth, serum biochemical indices and toxins residues in *Ctenopharyngodon idella*[J]. Journal of Fisheries of China, 2005, 29(6): 798-803(in Chinese).
- [10] 张洁月. 池塘养鱼[M]. 北京: 高等教育出版社, 1992.  
Zhang J Y. Pond Aquaculture[M]. Beijing: Higher Education Press, 1992 (in Chinese).
- [11] 李忠义, 金显仕, 庄志猛. 稳定同位素技术在水域生态系统研究中的应用[J]. 生态学报, 2005, 25(11): 3052-3060.  
Li Z Y, Jin X S, Zhuang Z M. Applications of stable isotope techniques in aquatic ecological studies[J]. Acta Ecologica Sinica, 2005, 25(11): 3052-3060(in Chinese).
- [12] Zhou Q, Xie P, Xu J. Seasonal variations in stable isotope ratios of two biomanipulation fishes and seston in a large pen culture in hypereutrophic Meiliang Bay, Lake Taihu[J]. Ecological Engineering, 2009, 35(11): 1603-1609.
- [13] Zhou Q, Xie P, Xu J. Growth and food availability of silver and bighead carps: Evidence from stable isotope and gut content analysis[J]. Aquaculture Research, 2009, 40(14): 1616-1625.
- [14] 孙明, 刘修泽, 李轶平. 应用氮稳定同位素技术研究辽东湾海域主要渔业生物的营养级[J]. 中国水产科学, 2013, 20(1): 189-197.  
Sun M, Liu X Z, Li Y P. Trophic level analysis of key species in Liaodong Bay using stable nitrogen isotopes[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2013, 20(1): 189-197(in Chinese).
- [15] 金波昌, 董双林, 田相利. 人工饲料对刺参幼参生长贡献的碳稳定同位素法分析[J]. 水产学报, 2013, 37(2): 269-274.  
Jin B C, Dong S L, Tian X L. Using carbon stable isotope ratio ( $\delta^{13}\text{C}$ ) to evaluate contribution of artificial feeds to growth of pond cultured juvenile sea cucumber *Apostichopus japonicus* (Selenka)[J]. Journal of Fisheries of China, 2013, 37(2): 269-274(in Chinese).
- [16] 彭士明, 施兆鸿, 尹飞. 利用碳氮稳定同位素技术分析东海银鲳食性[J]. 生态学杂志, 2011, 30(7): 1565-1569.  
Peng S M, Shi Z H, Yin F. Feeding habits of silver

- pomfret (*Pampus argenteus*) in east China sea based on stable isotope techniques[J]. Chinese Journal of Ecology, 2011, 30(7): 1565-1569(in Chinese).
- [17] 夏斌. 草鲢复合养殖池塘主要营养要素生物学循环过程的研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2013.
- Xia B. Study on the biological recycling of nutrients in polyculture ponds of grass carp *Ctenopharyngodon idellus* and silver carp *Hypophthalmichthys molitrix*[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2013 (in Chinese).
- [18] 王国钟. 优质高产的青绿饲料—苏丹草[J]. 内蒙古草业, 1997(1): 62.
- Wang G Z. Green forage of good quality and high yield[J]. Inner Mongolia Prataculture, 1997(1): 62(in Chinese).
- [19] Li J, Zhou Q, Yuan G L. Mercury bioaccumulation in the food web of Three Gorges Reservoir (China): Temporal-spatial patterns and effect of reservoir management[J]. Science of the Total Environment, 2015, 527-528: 203-210.
- [20] 曾庆飞, 孔繁翔, 张恩楼. 稳定同位素技术应用于水域食物网的方法学研究进展[J]. 湖泊科学, 2008, 20(1): 13-20.
- Zeng Q F, Kong F X, Zhang E L. Assessment of sample processing methods for stable isotope analysis of aquatic food webs[J]. Journal of Lake Sciences, 2008, 20(1): 13-20(in Chinese).
- [21] 章宗涉, 黄祥飞. 淡水浮游生物研究方法[M]. 北京: 科学出版社, 1991.
- Zhang Z S, Huang X F. Research techniques of freshwater plankton[M]. Beijing: Science Press, 1991 (in Chinese).
- [22] 胡韧, 蓝于倩, 肖利娟. 淡水浮游植物功能群的概念、划分方法和应用[J]. 湖泊科学, 2015, 27(1): 11-23.
- Hu R, Lan Y Q, Xiao L J. The concepts, classification and application of freshwater phytoplankton functional groups[J]. Journal of Lake Sciences, 2015, 27(1): 11-23(in Chinese).
- [23] 杨丽丽, 何光喜, 胡忠军. 鲢鳙占优势的千岛湖浮游动物群落结构特征及其与环境因子的相关性[J]. 水产学报, 2013, 37(6): 894-903.
- Yang L L, He G X, Hu Z J. Community structure of zooplankton and its relation to environmental factors in the silver-carp-and bighead-carp-dominated Qiandao Lake[J]. Journal of Fisheries of China, 2013, 37(6): 894-903(in Chinese).
- [24] Fry B. Stable isotope diagrams of freshwater food webs[J]. Ecology, 1991, 72(6): 2293-2297.
- [25] Phillips D L, Gregg J W. Source partitioning using stable isotopes: coping with too many sources[J]. Oecologia, 2003, 136(2): 261-269.
- [26] Post D M. Using stable isotopes to estimate trophic position: models, methods, and assumptions[J]. Ecology, 2002, 83(3): 703-718.
- [27] 王云龙, 袁骐, 沈新强. 长江口及邻近水域春季浮游植物的生态特征[J]. 中国水产科学, 2005, 12(3): 300-306.
- Wang Y L, Yuan Q, Shen X Q. Ecological character of phytoplankton in spring in the Yangtze River estuary and adjacent waters[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2005, 12(3): 300-306(in Chinese).
- [28] Estep M L F, Vigg S. Stable carbon and nitrogen isotope tracers of trophic dynamics in natural populations and fisheries of the Lahontan Lake system, Nevada[J]. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 1985, 42(11): 1712-1719.
- [29] Moriarty D J W. The role of microorganisms in aquaculture ponds[J]. Aquaculture, 1997, 151(1-4): 333-349.
- [30] 赵文, 董双林, 张美昭. 盐碱池塘浮游动物的种类组成和生物量[J]. 水产学报, 2001, 25(1): 26-31.
- Zhao W, Dong S L, Zhang M Z. Species composition and biomass of zooplankton in saline alkaline ponds[J]. Journal of Fisheries of China, 2001, 25(1): 26-31(in Chinese).
- [31] 张念. 草鱼池塘浮游动物群落结构特征及与池塘环境关系的研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2014.
- Zhang N. Community structure characteristics of zooplankton in *Ctenopharyngodon idella* ponds and correlations between zooplankton and environmental factors[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2014 (in Chinese).
- [32] 刘朋. 草鱼不同混养系统有机碳、氮和磷收支及变动的初步研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2012.
- Liu P. A preliminary study on budget and variation of organic carbon, nitrogen and phosphorus of grass carp in different polyculture systems[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2012 (in Chinese).
- [33] 周劲风, 温琰茂. 珠江三角洲基塘水产养殖对水环境的影响[J]. 中山大学学报(自然科学版), 2004, 43(5): 103-106.
- Zhou J F, Wen Y M. Effects of fish aquaculture on water

- environment in the Zhujiang river delta[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni, 2004, 43(5): 103-106(in Chinese).
- [34] 孙侦龙. 刺参养殖主要营养要素代谢过程的研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2012.
- Sun Z L. Study on the main nutrient metabolism of the farming sea cucumber[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2012 (in Chinese).
- [35] 艾庆辉, 谢小军. 水生动物对植物蛋白源利用的研究进展[J]. 中国海洋大学学报, 2006, 35(6): 929-935.
- Ai Q H, Xie X J. Advance in utilization of plant proteins by aquatic animals[J]. Periodical of Ocean University of China, 2006, 35(6): 929-935(in Chinese).

## The effects of two nutrient sources on the plankton community structure and C/N trophic shift in *Ctenopharyngodon idella* poly-culture ponds

WANG Longsheng<sup>1,2,3</sup>, ZHOU Qiong<sup>1,2,3\*</sup>, XIE Congxin<sup>1,2,3</sup>, SHEN Minghua<sup>1,2,3</sup>,  
ZHOU Gengen<sup>1,2,3</sup>, HE Xugang<sup>1,2,3</sup>, LI Dapeng<sup>1,2,3</sup>

(1. Key Lab of Freshwater Animal Breeding, Ministry of Agriculture, College of Fisheries,  
Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China;

2. Freshwater Aquaculture Collaborative Innovation Center of Hubei Province, Wuhan 430070, China;

3. Hubei Provincial Engineering Laboratory for Pond Aquaculture, Wuhan 430070, China)

**Abstract:** To figure out the nutrient cycling process and energy conversion efficiency of major biogenic elements in grass carp (*Ctenopharyngodon idella*) poly-culture ponds, this study investigated the potential effects of two different foodstuff sources (Sudan grass *S. Sudanense*, and formula feed) on the plankton community structure, and C/N trophic shift in grass carp poly-culture ponds using analytical techniques of stable isotope ( $\delta^{13}\text{C}$  and  $\delta^{15}\text{N}$ ) and C/N ratio. Our results showed that two feeding modes yielded no statistically significant impact on the community structure of plankton, but the feeding mode with Sudan grass helped promote the plankton growth in the water column. In the ponds fed with Sudan grass, Sudan grass contributed 84% and 6.8% of energy to herbivorous and filter-feeding fishes (silver carp *H. michthysmolitrix* and bighead carp *A. nobilis*), respectively. Moreover, Sudan grass contributed 7.4% of energy to particulate organic matter. In the ponds fed with artificial feed, herbivorous fish derived 70.4% of energy source from formula feed. Formula feed contributed 5.1%, 8.1% and 12% of energy source to bighead carp, POM and sediment, respectively. Our findings suggested that, first of all, the carbon and nitrogen elements of two foodstuff sources were utilized by herbivorous fish (grass carp and blunt-snout bream *M. amblycephala*), and then transferred the nutrients to filter-feeding fishes through the pathways of plankton, residual feeds and fish feces. Ultimately, the biogenic elements were dedicated to the sediment. In contrast with formula feed, the nutrient of Sudan grass could be more utilized by cultured fish than that deposited in the sediment. The trophic transfer was slower in ponds fed by Sudan grass than that in ponds fed by formula feed. Energy transfer of cultured fish was extremely relevant to foodstuff sources. In particular, the conversion efficiency in Sudan grass ponds was higher than that in formula feed ponds.

**Key words:** *Ctenopharyngodon idella*; pond culture; nutrients cycling; conversion efficiency; C/N ratio; stable isotopes

**Corresponding author:** ZHOU Qiong. E-mail: hainan@mail.hzau.edu.cn

**Funding projects:** the Earmarked Fund for China Agriculture Research System (CARS-46); Fundamental Research Funds for the Central Universities (2662015PY119); National Undergraduate Training Program of Innovation and Business Start (105042016054); Scientific and Technological Innovation Funds in Huazhong Agricultural University (2016150)