

Deng H T, Ran L, Xue Y, *et al.* energy source tracing of four small-sized fish and spatiotemporal differences in the Three Gorges Reservoir area [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2025, 49(10): 102502. [邓华堂, 冉莉, 薛洋, 等. 三峡库区四种小型鱼类能量溯源及时空差异 [J]. 水生生物学报, 2025, 49(10): 102502.]

三峡库区四种小型鱼类能量溯源及时空差异

邓华堂^{1*} 冉莉^{1,2*} 薛洋³ 周春龙³ 陈大庆¹ 段辛斌¹ 田辉伍¹

(1. 中国水产科学研究院长江水产研究所国家农业科学重庆观测实验站, 武汉 430023; 2. 华中农业大学水产学院, 武汉 430070; 3. 重庆市水产技术推广总站, 重庆 401147)

摘要: 为评估三峡库区食物利用和食物链的营养转化效率, 研究运用碳氮稳定同位素方法探究了浮游藻类、沿岸带C₃植物、C₄植物及着生藻类四种基础碳源对银鮡(*Squalidus argentatus*)、蛇鮡(*Saurogobio dabryi*)、似鳊(*Pseudobrama simoni*)和鲮(*Hemiculter leucisculus*)四种小型鱼类能量贡献比例的时空差异。结果显示, 各种碳源生物的 $\delta^{13}\text{C}$ 值和 $\delta^{15}\text{N}$ 值均存在显著性差异($P<0.05$), 能很好地区分各基础碳源。Bayesian混合模型结果表明, 浮游藻类均对四种小型鱼类的能量贡献比例最高, 外源性碳源对小型鱼类能量的贡献率在不同水文时期无显著性差异($P>0.05$), 但是在空间尺度上存在极显著性差异($P<0.01$)。研究表明, 内源性碳源是库区小型鱼类的主要能量来源, 但外源性碳源对小型鱼类的贡献率在三峡库区河流纵向梯度上有较为明显的变化规律。越靠近库首, 外源性碳源的贡献率越高, 这可能与不同区域消落带的淹没特征和在库首静水环境下外源性碳源颗粒沉积有关。

关键词: 三峡库区; 稳定同位素分析; 小型鱼类; 营养溯源; 基础碳源

中图分类号: Q178.1

文献标识码: A

文章编号: 1000-3207(2025)10-102502-10

doi: 10.3724/1000-3207.2025.2024.0475

CSTR: 32229.14.SSSWXB.2024.0475



小型鱼类作为低营养层级的消费者, 在水生生态系统的能量流动中起着承上启下的重要枢纽作用^[1]。在三峡水库蓄水后, 原有的流水河段环境改变, 影响该区域河段的鱼类群落结构组成, 在成库后渔获物组成中小型鱼类重要性越发凸显。根据近年来渔业资源调查表明, 银鮡(*Squalidus argentatus*)、蛇鮡(*Saurogobio dabryi*)、似鳊(*Pseudobrama simoni*)和鲮(*Hemiculter leucisculus*)是三峡库区最为常见的小型鱼类, 是小型鱼类的典型代表。近些年这几种小型鱼类在三峡库区渔获物中的优势度逐步增加^[2-7], 如在三峡库区腹地的巫山至云阳江段, 银鮡的相对重要性指数百分比由2013年的

2.56、2014年的5.13、2015年的10.02增加到2017—2019年的22.79^[5, 6]; 蛇鮡的该指数值由2013年的6.31增加到2017—2019年的12.2^[5, 6]; 似鳊的该指数值由2013年的3.62增加到2017—2019年的8.69^[5, 6]。在三峡库区万州江段, 鲮类的重量百分比由2005—2006年刚蓄水时的0.17%, 在近十年增加到2.34%^[2, 8]。在库尾的木洞江段, 银鮡的重量百分比由2007—2008年的0.66%增加到2017—2019年的3.02%^[6, 9]; 似鳊的值由0.06%(2007—2008年)增加到0.41%(2017—2019年)^[6, 9]。在2022年同步开展的三峡库区常规监测中, 蛇鮡在高水位时期监测站点渔获物中数量占比最高, 达25.98%, 低水位时期渔获

收稿日期: 2024-12-05; **修订日期:** 2025-03-28

基金项目: 国家重点研发计划(2022YFC3202001); 国家自然科学基金(51909271、51509262和32060274); 重庆市水产科技创新联盟(2021183); 中国水产科学研究院中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金(2023TD09)资助 [Supported by the National Key R & D Program of China (2022YFC3202001); the National Natural Science Foundation of China (51909271, 51509262 and 32060274); Chongqing Aquatic Science and Technology Innovation Alliance (2021183); Central Public-interest Scientific Institution Basal Research Fund, CAFS (2023TD09)]

作者简介: 邓华堂(1985—), 男, 博士; 研究方向为鱼类生态学。E-mail: denght@yfi.ac.cn 冉莉(1998—), 女, 硕士研究生; 主要研究方向为渔业资源。E-mail: 401562328@qq.com *共同第一作者

通信作者: 田辉伍, 博士; 主要研究方向为鱼类生态学。E-mail: tianhw@yfi.ac.cn

物中数量占比最高的鱼类为鲮, 达到30.54%, 4种小型鱼类当年低水位和高水位时期调查渔获物的相对重要性指数百分比分别为42.3和41.9。虽然三峡库区不同河段的渔获组成存在一定差异, 但以银鲃、蛇鲃、似鳊、鲮等为代表的小型鱼类优势度总体而言呈上升趋势。

水库蓄水后流速降低泥沙沉积, 生境的改变继而使水生生物群落结构发生显著变化, 水体容量扩大导致的初级生产力增加, 首先影响到低营养级物种资源丰度, 生态位空缺也为外来物种创造了有利的生存环境^[10]。近些年, 库区外来鱼类数量迅速增长^[5, 6, 10], 部分种类如短颌鲚已成为优势种群^[11, 12], 未来可能与本土鱼类发生激烈的生态位竞争^[13]。小型鱼类作为库区鱼类食物链(网)的中间环节, 不仅影响到初级生产者的营养利用效率, 也能影响上层凶猛性鱼类如鲈、鳊的种群动态。碳源驱动格局的研究不仅有助于我们了解种间竞争关系和竞争强度, 还为生态位状况研究奠定基础^[14]。此外, 对食物溯源研究可揭示低营养级物种的饵料利用及能量转化率, 能为利用初级生产力和计算生态容量提供基础资料。

目前针对三峡库区小型鱼类研究主要集中在渔业资源调查及物种组成^[2, 3, 6]、个体生物学^[12, 15]、遗传多样性^[16]及部分鱼类营养状况和生态位方面^[13, 17]。为了深入了解三峡库区的鱼类对食物利用效率及消费者的生态位状况, 本研究运

用碳氮稳定同位素方法探究了库区主要食物碳源(浮游藻类、沿岸带C₃植物、C₄植物及着生藻类)对银鲃、蛇鲃、似鳊、鲮为代表的小型鱼类能量贡献比例的时空差异, 以期今后库区大水面利用生态容量和能量转化率的估算奠定基础, 亦能为三峡库区生态系统保护和管理提供重要的科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域

本研究分别于2022年5—7月(低水位时期)、10—12月(高水位时期)对三峡库区干流代表性点位巫山、万州、丰都、木洞江段的4种小型鱼类蛇鲃、银鲃、似鳊、鲮, 以及大型河流4种潜在碳源^[18, 19]: 浮游藻类、着生藻类、沿岸带C₃植物和C₄植物进行采集。采样点地理位置详见图1, 采样点的环境特征见表1。

1.2 样品采集与处理

通过定置刺网及地笼对鱼类样品进行捕捞(已获得重庆市鱼类特许捕捞证书)。定置刺网规格: 网目2、6、10和14 cm, 网高2 m, 网长50 m; 地笼规格: 网目0.8 cm, 网长18 m, 网宽0.45 m, 网高0.33 m。下网时间每天17:00至第2天7:00, 每天下网时长为14h, 每个点位调查10d。捕获的鱼类首先进行种类鉴定和测量, 记录体长(mm)和体重(g), 然后取背部白色肌肉2—3 g, 用去离子水冲洗后, 于60℃烘箱中

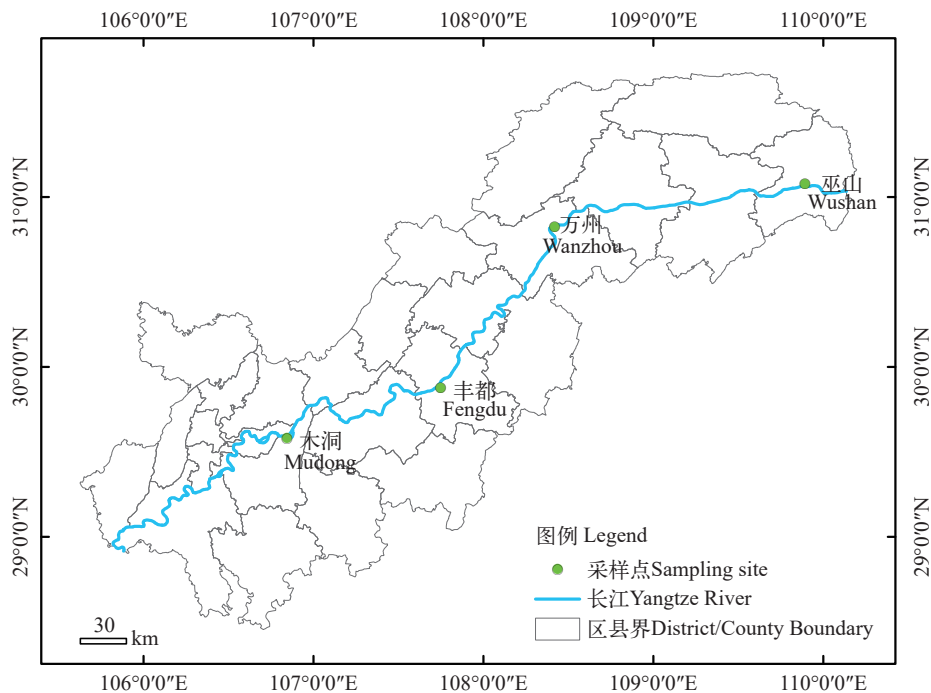


图1 三峡库区采样点示意图

Fig. 1 Map of sampling sites in the Three Gorges Reservoir

烘干至恒重。浮游藻类在各采样点利用浮游植物网(网目64 μm)在表层至0.5 m处划8字来回拖曳至少5min进行过滤收集,收集样品至EP管中,收集后,利用镊子除去大型杂质,再用浮游动物网(网目112 μm)过滤除去浮游动物。水样同步处理2份,1份利用玻璃纤维滤膜(Whatman GF/C)抽滤,抽滤后的滤膜在烘箱中60℃烘干至恒重,用锡箔纸包裹密封保存;另1份用甲醛保存回实验室鉴定。根据相关文献[20]及现场观察, C₃植物和C₄植物主要选择沿岸带优势种植物,小型植物采集全株,大型植物采集新鲜叶片,样品用去离子水冲洗干净,后放入烘箱中60℃烘干至恒重,用锡箔纸包裹密封保存。着生藻类样品在沿岸的石头和趸船等附着物上刮取^[19],用去离子水反复冲洗附着的碎屑和杂质,后放入烘箱中60℃烘干至恒重,用锡箔纸包裹后密封保存。所有同位素样本带回实验室后用研磨器(Scientz-24)在2000 r/s转速下研磨70s。

1.3 同位素样本的检测

对研磨后的同位素样本,用百万分之一精密电子天平称取,每个鱼类肌肉样本称取0.350—0.420 mg,浮游藻类(滤膜)样本称取1.500—2.000 mg,每个植物和着生藻样本称取0.400—0.500 mg,装入锡杯(5 mm × 8 mm)中进行包裹,折叠。样品的碳、氮稳定同位素比值利用Thermo公司Flash 2000 EA-HT元素分析仪和DELTA V Advantage稳定同位素质谱仪测定。碳、氮稳定同位素分析分别采用国际标准物质VPDB (Vienna Pee Dee Belemnite)和标准大气氮(N₂)对比, $\delta^{13}\text{C}$ 分析精度为0.1‰, $\delta^{15}\text{N}$ 分析精度为0.15‰。

碳、氮稳定同位素比值计算公式:

$$\delta X = (R_s - R_{st})/R_{st} \times 1000$$

式中, R_s 表示样品重同位素与轻同位素比值($^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$,

$^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$); R_{st} 为国际标准物质VPDB或标准大气氮同位素比值。

1.4 数据分析

使用Kolmogorov-Smirnov检验对样品碳、氮稳定同位素数据进行正态分布检验,使用双因素方差分析法(Two-way ANOVA)分别检验各江段不同水位时期4种小型鱼类的 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$ 值是否存在显著性差异,不同小型鱼类种间贡献率比较采用配对样本 t 检验,设定当 $P < 0.05$ 时为差异显著, $P < 0.01$ 时差异极显著。以上数据处理与分析均在R Studio (4.1.2)中使用stats数据包进行。

各基础碳源对每个鱼类消费者的相对贡献利用Bayesian混合模型估算^[21]。同位素数据在建模前检验是否为正态分布(未正态分布的数据通过数据转换),模型能考虑了采样误差和营养富集因子的不确定性。本研究在不同水文时期,利用各自区域内的碳源生物和鱼类消费者 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$ 的平均值和标准差构建不同鱼类在不同区域的模型。在模型中,碳同位素的营养富集因子设定为 $(0.4 \pm 0.19)\text{‰}$ ^[22]、氮同位素的为 $(3.4 \pm 0.13)\text{‰}$ ^[23]。通过马尔科夫链蒙特卡罗方法(Markov chain Monte Carlo method),每个混合模型都将生成贡献比例的合理数值模拟区间。每种鱼类构建的模型均进行一万次迭代运行,使用95%的置信区间来描述每个食物来源对每个鱼类消费者的可行贡献范围^[21]。利用模型产生的概率最大的解,来评估和比较不同区域和不同种类之间的差异。Bayesian混合模型采用R Studio (4.1.2)中的SIMMR (Stable Isotope Mixing Models in R)数据包进行构建,用于食物源贡献率的计算^[24, 25]。参考相关文献[18, 19, 26],将C₃植物和C₄植物作为外源性碳源,浮游藻类和着生藻类作为内源性碳源开展进一步分析。绘图通过GraphPad Prism 8完成。

表1 三峡库区采样点生境特征

Tab. 1 Environmental characteristics of three sampling stations in the Three Gorges Reservoir

江段 Section	坐标位点 Longitude/latitude	时期 Season	水位高度 Water level (m)	水深 Water depth (m)	透明度 Transparency (cm)	流速 Velocity (m/s)	浮游植物密度 Density of phytoplankton (million cells/L)	浮游植物生物量 Biomass of phytoplankton (mg/L)
巫山Wushan	E 109°53'7"; N 31°4'22"	LWL	150	74.7±3.1	204.3±30.2	0.16±0.15	1.89	3.20
		HWL	175	97.7±1.2	171.3±5.1	0.01±0.004	1.29	30.79
万州Wanzhou	E 108°23'11"; N 30°48'43"	LWL	150	45.3±6.7	100.4±3.0	0.05±0.01	1.49	4.16
		HWL	175	66.0±5.2	159.7±1.5	0.02±0.003	1.47	36.81
丰都Fengdu	E 107°44'45"; N 29°53'28"	LWL	152	28.0±6.2	101.2±4.5	0.26±0.17	1.62	3.01
		HWL	175	53.3±8.1	204.3±5.1	0.18±0.01	1.20	17.62
木洞Mudong	E 106°50'12"; N 29°34'36"	LWL	153	3.7±0.6	82.7±3.5	0.38±0.13	1.69	3.12
		HWL	175	28.0±1.7	104.3 ±1.1	—	1.10	20.87

注: LWL代表低水位时期, HWL代表高水位时期

Note: LWL represent low water level period, HWL represent high water level period

2 结果

2.1 三峡库区4种小型鱼类稳定同位素特征及种间差异

本研究共采集了银鮡、蛇鮡、似鳊、鲮4种鱼类稳定同位素样本共154尾, 不同水文时期鱼类采集信息见表2。采用Pearson相关性分析检验4种小型鱼类个体的 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$ 值与其体长和体重的相关关系。结果显示, 除了似鳊的体长与其 $\delta^{13}\text{C}$ 值存在显著相关($P=0.038$)外, 似鳊的体长与其 $\delta^{15}\text{N}$ 值、体重与其 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$ 值, 以及银鮡、蛇鮡和鲮的体长、体重与其 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$ 值均不存在显著的相关关系($P>0.05$)。

4种小型鱼类种内碳氮稳定同位素存在显著的

时空差异(表3), 如除蛇鮡外, 其他3种鱼类的 $\delta^{13}\text{C}$ 值在不同江段均有显著差异, 而似鳊和鲮在不同水位时期并没有显著差异; 4种鱼类的 $\delta^{15}\text{N}$ 值在不同水位时期均有具有显著差异, 蛇鮡和似鳊的 $\delta^{15}\text{N}$ 值在不同江段也具有显著差。另外, 4种小型鱼类种间在三峡库区不同江段的稳定同位素特征也存在一定差异。在巫山、万州和丰都江段, 四者的 $\delta^{13}\text{C}$ 值有显著差异($P<0.05$), 似鳊的 $\delta^{13}\text{C}$ 值最高, 蛇鮡的 $\delta^{13}\text{C}$ 值最低; 在木洞江段, 四者的 $\delta^{13}\text{C}$ 值无显著差异($P>0.05$)。在巫山和万州江段, 四者的 $\delta^{15}\text{N}$ 存在显著差异($P<0.05$), 但在丰都和木洞江段, 四者的 $\delta^{15}\text{N}$ 值无显著差异($P>0.05$)。

2.2 三峡库区基础碳源生物稳定同位素特征

三峡库区4种基础碳源生物的 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$ 值如

表2 三峡库区四种小型鱼类样品收集信息

Tab. 2 Basic sample information on four small-sized fish species in the Three Gorges Reservoir area

种类 Species	时期Season	样本数 Number of sample	平均体长 Average body length (mm)	平均体重 Average body weight (g)	$\delta^{13}\text{C}$ (‰)	$\delta^{15}\text{N}$ (‰)
银鮡 <i>Squalidus argentatus</i>	LWL	20	110.0±9.2	22.3±6.0	-23.09±1.41	11.31±1.03
	HWL	20	110.7±10.2	20.4±4.5	-24.12±0.66	10.66±0.87
蛇鮡 <i>Saurogobio dabryi</i>	LWL	20	128.4±26.6	23.0±11.4	-23.73±1.41	13.13±1.63
	HWL	18	144.1±16.2	29.2±11.5	-28.01±2.83	11.33±1.55
似鳊 <i>Pseudobrama simoni</i>	LWL	20	112.5±21.4	29.8±22.8	-22.21±2.36	11.02±0.92
	HWL	19	113.6±15.8	24.0±8.8	-23.34±2.37	9.69±1.26
鲮 <i>Hemiculter leucisculus</i>	LWL	20	117.8±6.6	20.8±4.2	-24.03±1.57	12.24±1.50
	HWL	17	123.4±12.4	21.2±5.4	-24.91±2.12	10.84±1.31

注: LWL代表低水位时期; HWL代表高水位时期

Note: LWL represent low water level period; HWL represent high water level period

表3 三峡库区四种小型鱼类碳氮稳定同位素时空差异分析(F值)

Tab. 3 Two-way ANOVA analysis F-ratios for $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ comparisons of four small-sized fish species across seasons and sections in the Three Gorges Reservoir area

种类 Species	$\delta^{13}\text{C}$			$\delta^{15}\text{N}$		
	时期 Season	江段 Section	时期×江段 Season×Section	时期 Season	江段 Section	时期×江段 Season×Section
银鮡 <i>Squalidus argentatus</i>	8.69**	2.91*	2.54	4.60*	2.52	0.78
蛇鮡 <i>Saurogobio dabryi</i>	35.98**	0.50	0.91	12.11**	5.52**	2.37
似鳊 <i>Pseudobrama simoni</i>	2.22	3.41*	1.98	14.14**	3.22*	1.76
鲮 <i>Hemiculter leucisculus</i>	2.06	3.14*	0.68	8.93**	0.58	2.22

注: 加粗字体代表存在显著性差异; *, **分别代表 $P<0.05$ 和 $P<0.01$

Note: The bold represent significant difference; * and ** represent $P<0.05$ and $P<0.01$, respectively

表4 四种基础碳源的稳定同位素值

Tab. 4 Stable isotope values of four basic carbon sources

潜在碳源Potential carbon source	样本数Number of sample	范围Range (‰)		平均值Mean (‰)	
		$\delta^{13}\text{C}$	$\delta^{15}\text{N}$	$\delta^{13}\text{C}$	$\delta^{15}\text{N}$
浮游藻类Planktonic algae	40	-28.22—(-17.25)	5.63—9.61	-23.32	7.14
C ₃ 植物 C ₃ Plants	15	-32.07—(-28.34)	1.3—7.22	-30.27	3.73
C ₄ 植物 C ₄ Plants	15	-15.89—(-12.82)	1.65—6.24	-14.26	4.39
着生藻类Epiphytic algae	22	-27.28—(-16.73)	2.9—8.31	-21.57	5.45

表 4 所示。4 种碳源生物的 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$ 值均存在显著性差异 ($P < 0.05$), 并且呈现为 C_4 植物 $>$ 着生藻类 $>$ 浮游藻类 $>$ C_3 植物的趋势, 其中 C_3 植物拥有相对较低的 $\delta^{13}\text{C}$ 值, 为 -32.07‰ — $(-28.34)\text{‰}$, C_4 植物拥有相对较高的 $\delta^{13}\text{C}$ 值, 为 -15.89‰ — $(-12.82)\text{‰}$ 。浮游藻类的 $\delta^{15}\text{N}$ 值平均值为 -23.32‰ , 显著高于其他 3 种碳源生物。在不同水文时期的各个点位, 4 种碳源生物的 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$ 值间均具有显著差异 ($P < 0.05$)。

2.3 四种潜在碳源的相对贡献率

Bayesian 混合模型结果显示, 在不同点位四种碳源对各小型鱼类能量贡献存在一定差异 (图 2、

图 3 和表 5)。高水位时期, 浮游藻类对银鮡、似鳊和鲮的贡献比例最高, 均值分别为 45.8% 、 40.7% 和 40.0% , 对蛇鮡而言, C_3 植物的贡献比例最高 (33.3%), C_4 植物对 4 种小型鱼类的贡献比例均最低 (表 5)。低水位时期, 银鮡、蛇鮡、似鳊、鲮 4 种小型鱼类食物中, 浮游藻类的贡献比例最高, 均值依次分别为 44.2% 、 35.3% 、 43.9% 和 40.4% ; 除 C_3 植物对似鳊的贡献比例最低外, C_4 植物的贡献比例最低, 对银鮡、蛇鮡、鲮的贡献均值分别为 15.5% 、 14.9% 和 12.7% 。通过配对样本 t 检验, 浮游藻类和着生藻类对小型鱼类在不同水文时期的贡献率无

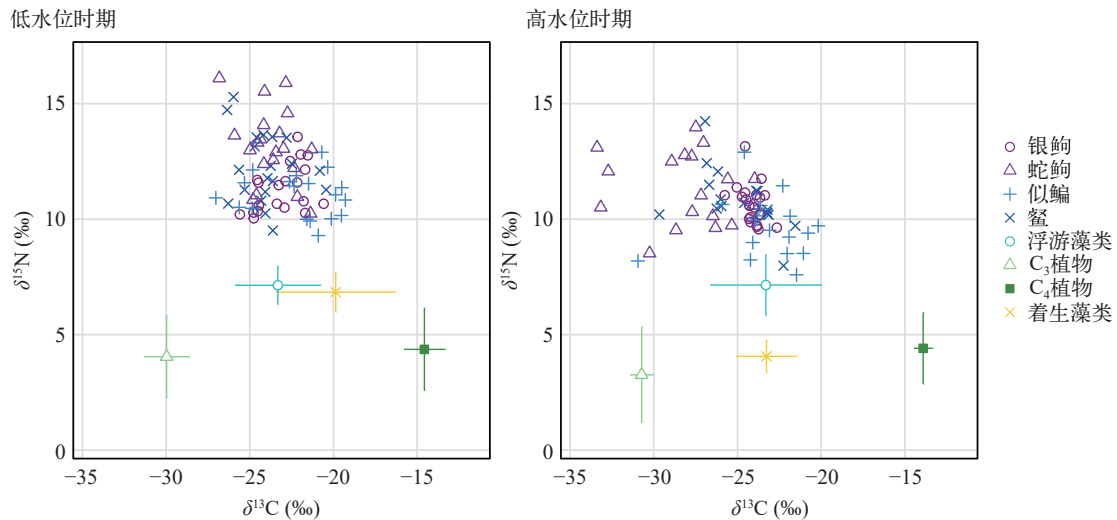


图 2 不同水文时期四种小型鱼类及碳源生物碳、氮同位素特征

Fig. 2 Carbon and nitrogen isotope characteristics of four small-sized fish species and carbon source in different hydrological periods

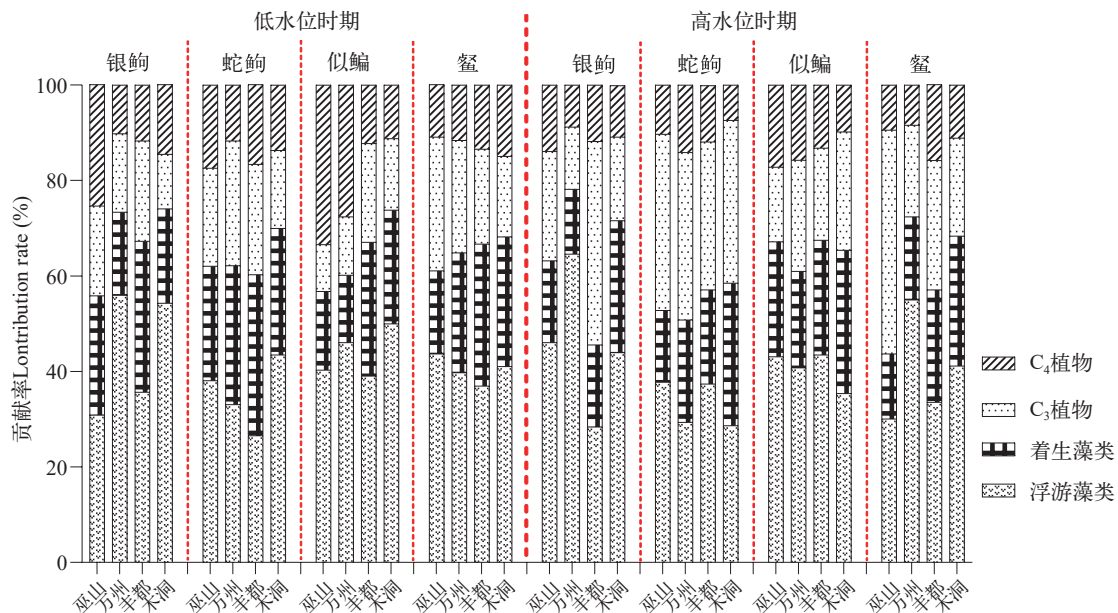


图 3 四种潜在碳源在不同水文时期和不同江段对四种小型鱼类的相对贡献率

Fig. 3 The relative contribution rates of four potential carbon sources to four small-sized fish species during different hydrological periods and in various river sections

表 5 四种潜在碳源在不同水文时期对四种小型鱼类的相对贡献率

Tab. 5 The relative contribution rate of four potential carbon sources to four small-sized fish species in different hydrological periods (%)

种类Species	时期Season	浮游藻类Planktonic algae	着生藻类Epiphytic algae	C ₃ 植物C ₃ Plants	C ₄ 植物C ₄ Plants
银鲈 <i>Squalidus argentatus</i>	LWL	44.2±12.8	23.5±6.3	16.9±4.1	15.48±6.9
	HWL	45.8±14.8	18.9±6.1	24.0±13.0	11.3±2.1
蛇鮈 <i>Saurogobio dabryi</i>	LWL	35.3±7.2	28.3±4.1	21.5±4.2	14.9±2.7
	HWL	33.3±4.9	21.5±6.2	34.3±2.5	10.9±2.8
似鲮 <i>Pseudobrama simoni</i>	LWL	43.9±5.1	20.6±6.4	14.4±4.7	21.1±11.1
	HWL	40.7±3.7	24.6±4.0	20.8±4.1	14.0±3.2
鲮 <i>Hemiculter leucisculus</i>	LWL	40.4±2.8	24.8±5.3	22.1±4.8	12.7±1.8
	HWL	40.0±11.0	20.4±6.1	28.4±12.8	11.2±3.3

注: LWL代表低水位时期, HWL代表高水位时期

Note: LWL represent low water level period, HWL represent high water level period

显著性差异($P>0.05$), C₃植物在高水位时期的贡献率显著增加($P<0.05$), C₄植物在高水位时期的贡献率显著降低($P<0.05$)。

2.4 外源性碳源贡献率的时空差异

外源性碳源对小型鱼类能量的贡献率在水文时期的尺度上无显著性差异($P>0.05$), 但是在空间尺度上有极显著性差异($P<0.01$; 图 4)。外源性碳源对小型鱼类的贡献率在三峡库区河流纵向梯度上显示出较为明显的变化规律, 越靠近库首, 外源性碳源的贡献率越高。

3 讨论

3.1 三峡库区潜在基础碳源的相对贡献

稳定性碳同位素技术能被用于追踪水生生态系统中有机物的来源, 确定其在食物网中的贡献比例^[19, 22, 26]。三峡库区蓄水初期, Wang等^[27]研究表明, 陆源植物是驱动库区水生食物网循环的主要动力, 藻类碳源的贡献率较低。在三峡大坝蓄水运行多年后, 该区域的主要碳源发生了变化。近年来在三峡库区干流的研究显示, 颗粒悬浮有机物是该区域的主要食物碳源来源^[28, 29]。颗粒悬浮物有机物虽然在不同水体或不同水文时期^[30, 31]的组成有一定差异, 但就三峡库区而言, 颗粒悬浮物有机物的主要成分为浮游藻类^[28]。在本研究中, 浮游藻类在库区干流对小型鱼类的贡献率均值达到40.45%。在河流连续体(RCC)概念中, 河流由于流速快、浑浊度高水面狭小, 河道内的藻类和植物生产力贡献非常小, 水生消费者主要依赖陆源的植被提供能量^[32], 这可能是蓄水初期沿岸C₃植物为库区提供主要能量来源的原因。但随着蓄水后河流流域面积扩大, 初级生产力增加, 这种依赖模式逐渐发生转变。相较于陆生植物, 消费者开始更多地依赖藻类碳源, 这种现象更加符合河流生产力模型(RPM)的概念^[33]。

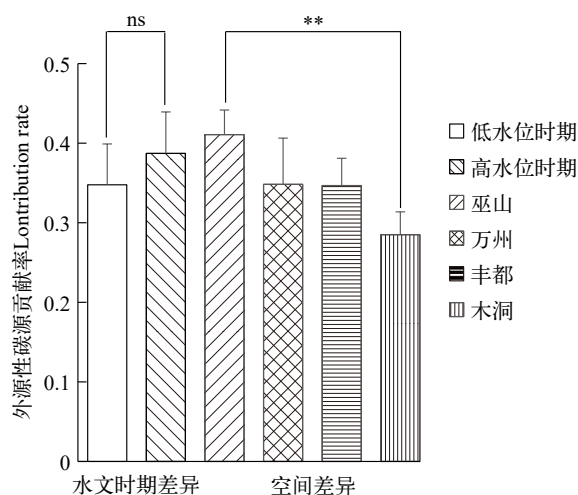


图 4 外源性碳源贡献率的时空差异

Fig. 4 Temporal and spatial differences in contribution rates of exogenous carbon sources

ns代表不存在显著性差异, **代表存在显著性差异

ns represent no significant difference, ** represent significant difference

有研究表明, 即使是在水生植被茂盛、拥有大量外源性植物碎屑的河流中, 藻类在河流的整体生物量中所占比例较小, 藻类依旧是这些碎屑食性鱼类等消费者的主要能量来源^[34]。Chang等^[35]的研究结果表明, 随着河道大小的增加和冠层覆盖度的减少, 着生藻类和浮游藻类的重要性应该更大。库区干流水体较深, 且大部分河道陡峭, 消落带植被分布不均^[36], 相较陆源C₃或C₄植物来说, 水库中诸如浮游藻类等内源性有机物更加丰富且易于获得, 这可能是造成浮游藻类对鱼类的贡献比例相对较高的主要原因。

外源性C₃和C₄植物也是库区干支流碳源的重要来源之一。大多数的研究表明, 内源性的藻类(浮游或底栖)是河流生态系统中主要的能量来

源^[14, 19], 但外源性有机碳(主要为沿岸带植物)在特定的水文条件下或生境中也能成为河流消费者的主要贡献来源^[18, 37]。有研究证明, 对于那些大型河流中的低梯度河段和水库下游河段, 特别是在泛洪区缺少或不存在的条件下, C₃植物为当地的消费者提供了关键的碳源^[18, 19, 37]。在三峡库区水位上升期, C₃植物能成为库区鱼类主要的能量来源^[38]。对三峡库区支流大宁河的研究结果表明, C₃植物是该支流鱼类最主要的基础碳源^[39]。本研究中C₄植物对库区干流的小型鱼类能量贡献率最低, 但对支流鱼类的贡献可能有所不同。在三峡库区支流小江, 陆生C₄植物的相对贡献比例在蓄水后明显增加^[40]。但总体上, C₄植物对于各种类型水体的贡献率均为最低的^[41]。对亚马孙河的中部盆地研究区域研究表明, 虽然河漫滩上陆源C₄植被生物量占绝对优势, 但80%以上的消费者碳源来源于沿岸带的C₃植被^[42], 主要是由于C₃植被的易消化吸收特性^[43]。另外, C₃和C₄植物适宜生境的不同也可能会对贡献率产生影响, 由于光合作途径不同, C₄植物在高光、高温和低CO₂浓度的环境中具有竞争优势^[44], 因此更多地生长在陆地环境, 而C₃植物则更适宜生长于水生环境^[45]。

3.2 三峡库区食物网碳源驱动时空差异分析

结果显示, 三峡库区干流小型鱼类的能量来源以内源性碳源为主, 在河流纵向梯度上表现出显著的变化规律, 越靠近库首, 外源性碳源的贡献率越高。原因可能是库区上游地区流速高, 当外源性植被颗粒被冲刷进入库区后, 流速减缓^[46], 外源植被颗粒和相关的有机碳沿着河流纵向梯度逐渐沉积下来, 导致库首外源性碳源的增加^[47]。赵岱寅等^[48]对三峡库区消落带表层沉积物的研究中也相似的结果, 在碳源输入方面, 库首多以外源性植物为主。此外, 库尾地区地势较为平缓, 水深较浅, 库首地区峡谷多地势高耸, 有高达30 m的消落带, 意味着库首地区会受到更多的地表径流, 特别是在降雨丰富的季节, 这些径流会带入大量陆源性碳源进入水体^[49]。而且, 消落带作为河流生态系统重要的碳汇区域, 其湿地碳动态会随着水位的季节性变动具有明显的时空差异^[50]。在夏季洪水或冬季蓄水过程中, 大量外来性碳输入河流生态系统, 由于水库生境的多样性, 输入的量在水库的不同区域存在差异, 随后外源性碳通过食物链上行效应影响初级消费者或次级消费者^[51, 52]。蓄水造成的水位变化波动对库首地区的影响远远大于库尾, 植被和土壤受到更大冲击, 导致更多外源碳释放到水体中去^[53], 这可能是外源性碳源贡献空间尺度差异产生的

原因。

河流生态系统中消费者的基础能量来源(外源/内源)一直存在争议^[14, 19, 37]。本研究发现三峡库区小型鱼类食物网中消费者的基础能量主要来自内源性营养物质(浮游和着生藻类), 虽然在空间尺度上表现为库首的外源性碳源贡献率增加, 但总体而言还是内源性碳源起主导作用。一方面藻类处于食物链的底层, 直接为浮游动物和小型鱼类提供能量, 使得能量利用更为高效, 而大型植物往往需要经过分解者才能转化为能量^[43]。另一方面, 浮游藻类的繁育周期短, 在适宜的环境可以快速增加生物量, 并为食物链提供大量能量^[54]。同时, 本文也评估了两个水文时期内外源性碳源能量贡献差异, 结果表明, 不同水文时期的能量来源并无显著性差异, 这可能与库区藻类饵料生物资源丰富, 食物冗余有关^[55, 56], 其能为小型鱼类提供广泛的食物选择。虽然水位的升高消落带的淹没使得外源性碳源食物可得性增加, 但丰富、适口且易消化的藻类的存在, 使得内源性营养物质对三峡库区食物网碳源驱动仍然起到主导作用。

(作者声明本文符合出版伦理要求)

参考文献:

- [1] Northcote T G. Fish in the structure and function of freshwater ecosystems: a "top-down" view [J]. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 1988, **45**(2): 361-379.
- [2] Wu Q, Duan X B, Xu S Y, *et al.* Studies on fishery resources in the Three Gorges Reservoir of the Yangtze River [J]. *Freshwater Fisheries*, 2007, **37**(2): 70-75. [吴强, 段辛斌, 徐树英, 等. 长江三峡库区蓄水后鱼类资源现状 [J]. 淡水渔业, 2007, **37**(2): 70-75.]
- [3] Li B, Jiang X, Wang Z J, *et al.* The current situation of fishery resources in the Xiaojiang River of the Three Gorges Reservoir [J]. *Freshwater Fisheries*, 2011, **41**(6): 37-42. [李斌, 江星, 王志坚, 等. 三峡库区蓄水后小江鱼类资源现状 [J]. 淡水渔业, 2011, **41**(6): 37-42.]
- [4] Zhao S S, Ye S W, Xie S G, *et al.* The current situation of fishery resources in the Xiangxi River of the Three Gorges Reservoir and advice on the management [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2015, **39**(5): 973-982. [赵莎莎, 叶少文, 谢松光, 等. 三峡水库香溪河鱼类资源现状及渔业管理建议 [J]. 水生生物学报, 2015, **39**(5): 973-982.]
- [5] Dong C, Yang Z, Gong Y, *et al.* Fish resource status and biodiversity conservation in the main channel of Three Gorges Reservoir [J]. *Journal of Hydroecology*, 2019, **40**(1): 15-21. [董纯, 杨志, 龚云, 等. 三峡库区干流鱼类资源现状与物种多样性保护 [J]. 水生态学杂志, 2019, **40**(1): 15-21.]

- [6] Wei N, Zhang Y, Wu F, *et al.* Current status and changes in fish assemblages in the Three Gorges Reservoir [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2021, **30**(8): 1858-1869. [魏念, 张燕, 吴凡, 等. 三峡库区鱼类群落结构现状及变化 [J]. 长江流域资源与环境, 2021, **30**(8): 1858-1869.]
- [7] Zhang W, Zhai D D, Xiong F, *et al.* Community structure and functional diversity of fishes in the Three Gorges Reservoir [J]. *Biodiversity Science*, 2023, **31**(2): 87-99. [张伟, 翟东东, 熊飞, 等. 三峡库区鱼类群落结构和功能多样性 [J]. 生物多样性, 2023, **31**(2): 87-99.]
- [8] Chen X W J. Studies on fish food web structure and function of Wanzhou section and Xiaojiang River in the Three Gorges Reservoir [D]. Guizhou: Guizhou University, 2018: 8-14. [陈薛伟杰. 三峡库区万州江段和小江鱼类食物网结构与功能研究 [D]. 贵州: 贵州大学, 2018: 8-14.]
- [9] Yang S R, Gao X, Ma B S, *et al.* Seasonal dynamics of fish community in Mudong section of the Three Gorges Reservoir of the Yangtze River, China [J]. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2010, **16**(4): 555-560. [杨少荣, 高欣, 马宝珊, 等. 三峡库区木洞江段鱼类群落结构的季节变化 [J]. 应用与环境生物学报, 2010, **16**(4): 555-560.]
- [10] Dong C, Yang Z, Zhu Q G, *et al.* Preliminary study on resource status of alien fish in Three Gorges Reservoir [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2023, **32**(5): 928-938. [董纯, 杨志, 朱其广, 等. 三峡水库外来鱼类资源状况初步研究 [J]. 长江流域资源与环境, 2023, **32**(5): 928-938.]
- [11] Peng L G, Shen J Z, Ji F F, *et al.* Spatiotemporal distribution of *Neosalanx taihuensis* in Xiaojiang River of Three Gorges Reservoir [J]. *Journal of Hydroecology*, 2021, **42**(5): 103-109. [彭乐根, 沈建忠, 吉芬芬, 等. 三峡库区小江太湖新银鱼时空分布 [J]. 水生生态学杂志, 2021, **42**(5): 103-109.]
- [12] Yang L Y, Lü H J, Fu M, *et al.* Age and growth characteristics of *Coilia nasus* in the Three Gorges Reservoir region [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2022, **46**(1): 17-28. [杨丽亚, 吕红健, 付梅, 等. 三峡库区短颌鲚年龄和生长特性的研究 [J]. 水生生物学报, 2022, **46**(1): 17-28.]
- [13] Lv H J, Yang L Y, Fu M, *et al.* Evaluation on trophic niche characteristics of *Coilia nasus* from the Three Gorges Reservoir based on stable carbon and nitrogen isotope analysis [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, **42**(21): 8739-8750. [吕红健, 杨丽亚, 付梅, 等. 基于稳定同位素技术的三峡库区短颌鲚营养生态位特征研究 [J]. 生态学报, 2022, **42**(21): 8739-8750.]
- [14] Guo F, Fry B, Yan K, *et al.* Assessment of the impact of dams on aquatic food webs using stable isotopes: Current progress and future challenges [J]. *Science of the Total Environment*, 2023, **904**: 167097.
- [15] Liao C B, Chen S B, Correa S B, *et al.* Longitudinal habitat gradient affects diet and body condition of riverine fish: A case study of *Pelteobagrus* catfishes in the Three Gorges Reservoir, China [J]. *River Research and Applications*, 2022, **38**(9): 1601-1608.
- [16] Wang Z, Wang D Q, Duan X B, *et al.* Genetic diversity of *Squalidus argentatus* in the middle and upper reaches of the Yangtze River inferred from mitochondrial DNA sequences [J]. *Chinese Journal of Zoology*, 2018, **53**(4): 615-621. [王喆, 汪登强, 段辛斌, 等. 长江中上游银鮡线粒体DNA遗传多样性分析 [J]. 动物学杂志, 2018, **53**(4): 615-621.]
- [17] Liao C S, Chen S B, Correa S B, *et al.* Impoundment led to spatial trophic segregation of three closely related catfish species in the Three Gorges Reservoir, China [J]. *Marine and Freshwater Research*, 2020, **71**(7): 750-760.
- [18] Zeug S C, Winemiller K O. Evidence supporting the importance of terrestrial carbon in a large-river food web [J]. *Ecology*, 2008, **89**(6): 1733-1743.
- [19] Pingram M A, Collier K J, Hamilton D P, *et al.* Spatial and temporal patterns of carbon flow in a temperate, large river food web [J]. *Hydrobiologia*, 2014, **729**(1): 107-131.
- [20] Liu W W, Yang F, Wang J, *et al.* Plant species dynamic distribution in the water-level-fluctuating zone of the main stream and bay of the Three Gorges Reservoir [J]. *Plant Science Journal*, 2011, **29**(3): 296-306. [刘维璋, 杨帆, 王杰, 等. 三峡水库干流和库湾消落区植被物种动态分布研究 [J]. 植物科学学报, 2011, **29**(3): 296-306.]
- [21] Parnell A C, Inger R, Bearhop S, *et al.* Source partitioning using stable isotopes: coping with too much variation. [J]. *PLoS One*, 2010, **5**(3): e9672.
- [22] Post D M. Using stable isotopes to estimate trophic position: models, methods, and assumptions [J]. *Ecology*, 2002, **83**(3): 703-718.
- [23] Vander Zanden M J, Rasmussen J B. Variation in $\delta^{15}\text{N}$ and $\delta^{13}\text{C}$ trophic fractionation: implications for aquatic food web studies [J]. *Limnology and Oceanography*, 2001, **46**(8): 2061-2066.
- [24] Parnell A C, Phillips D L, Bearhop S, *et al.* Bayesian stable isotope mixing models [J]. *Environmetrics*, 2013, **24**(6): 387-399.
- [25] Parnell A C, Jackson A L. SIAR: Stable isotope analysis in R, 2015.
- [26] Zheng Y, Niu J, Zhou Q, *et al.* Effects of resource availability and hydrological regime on autochthonous and allochthonous carbon in the food web of a large cross-border river (China) [J]. *Science of the Total Environment*, 2018(612): 501-512.
- [27] Wang J, Gu B, Huang J, *et al.* Terrestrial contributions to the aquatic food web in the middle Yangtze River [J]. *PLoS One*, 2014, **9**(7): e102473.
- [28] Li B, Wang Z J, Yang J P, *et al.* The dynamic and

- seasonal variation of the fish food webs in the mainstream of Three Gorges Reservoir [J]. *Journal of Fisheries of China*, 2013, **37**(7): 1015-1022. [李斌, 王志坚, 杨洁萍, 等. 三峡库区干流鱼类食物网动态及季节性变化 [J]. *水产学报*, 2013, **37**(7): 1015-1022.]
- [29] He C. Study on nutritional structure of fishes food web in the mainstream of the Yangtze River in the Three Gorges reservoir area based on stable carbon and nitrogen isotopes [D]. Chongqing: Southwest University, 2021: 37-55. [何春. 基于碳、氮稳定同位素的三峡库区长江干流鱼类食物网营养结构研究 [D]. 重庆: 西南大学, 2021: 37-55.]
- [30] Wang S Y, Gao Y, Jia J J, *et al.* Vertically stratified water source characteristics and associated driving mechanisms of particulate organic carbon in a large floodplain lake system [J]. *Water Research*, 2022, **209**: 117963.
- [31] Ma J S, Chen W Q, Chen M J, *et al.* Water level fluctuations associated with hydrological connectivity consolidate the food web stability of the largest Chinese freshwater lake via mediating trophodynamics and trophic structure [J]. *Ecological Indicators*, 2023, **153**: 110372.
- [32] Vannote R L, Minshall G W, Cummins K W, *et al.* The river continuum concept [J]. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 1980, **37**(1): 130-137.
- [33] Thorp J H, Delong M D. The riverine productivity model: an heuristic view of carbon sources and organic processing in large river ecosystems [J]. *Oikos*, 1994, **70**(2): 305-308.
- [34] Hamilton S K, Lewis Jr. W M, Sippel S J. Energy sources for aquatic animals in the Orinoco River floodplain: evidence from stable isotopes [J]. *Oecologia*, 1992, **89**(3): 324-330.
- [35] Chang H Y, Wu S H, Shao K T, *et al.* Longitudinal variation in food sources and their use by aquatic fauna along a subtropical river in Taiwan [J]. *Freshwater Biology*, 2012, **57**(9): 1839-1853.
- [36] Wang Z C, Zhou W C, Li X Y, *et al.* Distribution of vegetation in the water-level-fluctuation zone of the Three Gorges Reservoir and its effects on phosphorus transfer and fishery production [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2023, **47**(3): 436-449. [汪志聪, 周维成, 李晓宇, 等. 三峡水库消落带植被分布规律及对磷迁移和鱼产力的影响 [J]. *水生生物学报*, 2023, **47**(3): 436-449.]
- [37] Hoeninghaus D J, Winemiller K O, Agostinho A A. Landscape-scale hydrologic characteristics differentiate patterns of carbon flow in large-river food webs [J]. *Ecosystems*, 2007, **10**(6): 1019-1033.
- [38] Liao C B, Wang J C, Correa S B, *et al.* Artificial water-level fluctuation modulates trophic niches of benthic fish assemblages in one of the world's largest reservoirs [J]. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 2023, **80**(12): 1921-1934.
- [39] Deng H T, Li Y, Chen D Q, *et al.* Stable isotope analysis reveals the importance of riparian resources as carbon subsidies for fish species in the daning river, a tributary of the Three Gorges Reservoir, China [J]. *Water*, 2018, **10**(9): 1233.
- [40] Li B, Wang Z J, Yue X J, *et al.* Influence of 175-m-impoundment in Three Gorges Reservoir Area on the food web energy sources of main commercial fishes in backwater area of Xiaojiang River [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2013, **24**(6): 1715-1721. [李斌, 王志坚, 岳兴建, 等. 三峡库区 175 m 蓄水对小江回水区主要经济鱼类能量来源的影响 [J]. *应用生态学报*, 2013, **24**(6): 1715-1721.]
- [41] Marchese M R, Saigo M, Zilli F L, *et al.* Food webs of the Paraná River floodplain: assessing basal sources using stable carbon and nitrogen isotopes [J]. *Limnologica*, 2014(46): 22-30.
- [42] Forsberg B R, Araujo-Lima C A R M, Martinelli L A, *et al.* Autotrophic carbon sources for fish of the central Amazon [J]. *Ecology*, 1993, **74**(3): 643-652.
- [43] Mortillaro J M, Pouilly M, Wach M, *et al.* Trophic opportunism of central Amazon floodplain fish [J]. *Freshwater Biology*, 2015, **60**(8): 1659-1670.
- [44] Zhong S Z, Chai H, Xu Y Q, *et al.* Drought sensitivity of the carbon isotope composition of leaf dark-respired CO₂ in C₃ (*Leymus chinensis*) and C₄ (*Chloris virgata* and *Hemarthria altissima*) grasses in northeast China [J]. *Frontiers in Plant Science*, 2017(8): 1996.
- [45] Ye Z P, Yang X L, Kang H J. Comparison of light-use and water-use efficiency for C₃ and C₄ species [J]. *Acta Agriculturae Zhejiangensis*, 2016, **28**(11): 1867-1873. [叶子飘, 杨小龙, 康华靖. C₃和C₄植物光能利用效率和水分利用效率的比较研究 [J]. *浙江农业学报*, 2016, **28**(11): 1867-1873.]
- [46] Lin L, Dong L, Pan X, *et al.* Water and sediment changes and the eco-environment response characteristics in Three Gorges Reservoir after the impoundment [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2023, **35**(2): 411-423. [林莉, 董磊, 潘雄, 等. 三峡水库蓄水后库区水沙变化及其生态环境响应特征 [J]. *湖泊科学*, 2023, **35**(2): 411-423.]
- [47] Ru H J, Li Y F, Q Sheng, *et al.* River damming affects energy flow and food web structure: a case study from a subtropical large river [J]. *Hydrobiologia*, 2020, **847**(3): 679-695.
- [48] Zhao D Y, Cai M X, Zhang D J, *et al.* Temporal and spatial variation and source analysis of biomarkers in surface sediments in the water-level-fluctuating zone of the Three Gorges Reservoir Region [J]. *China Environmental Science*, 2022, **42**(6): 2810-2820. [赵岱寅, 蔡茂雪, 张代钧, 等. 三峡库区消落带表层沉积物生物标志物时空变化与来源分析 [J]. *中国环境科学*, 2022, **42**(6): 2810-2820.]
- [49] Hu X J. Study on storm event hydrological processes in the Three Gorges Reservoir forest watershed based on

- modular modeling system [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2007: 88-126. [胡晓静. 基于MMS的三峡库区森林流域暴雨水文过程研究 [D]. 北京: 北京林业大学, 2007: 88-126.]
- [50] Yuan X Z, Liu H, Wang J X, *et al.* Scientific thinking and ecological regulation approaches about carbon emission from littora, wetland in Three Gorges Reservoir [J]. *Journal of Chongqing Normal University* (Natural Science), 2010, **27**(2): 23-25. [袁兴中, 刘红, 王建修, 等. 三峡水库消落带湿地碳排放生态调控的科学思考 [J]. 重庆师范大学学报(自然科学版), 2010, **27**(2): 23-25.]
- [51] Gurevitch J, Morrison J A, Hedges L V. The interaction between competition and predation: a meta-analysis of field experiments [J]. *The American Naturalist*, 2000, **155**(4): 435-453.
- [52] Holomuzki J R, Feminella J W, Power M E. Biotic interactions in freshwater benthic habitats [J]. *Journal of the North American Benthological Society*, 2010, **29**(1): 220-244.
- [53] Sun Z. The temporal-spatial distribution and driving mechanism of changes of vegetation carbon source/sink in the Three Gorges Reservoir Area [D]. Chongqing: Chongqing University, 2022: 35-44. [孙卓. 三峡库区植被碳源/汇的时空分布及其变化的驱动机制 [D]. 重庆: 重庆大学, 2021: 35-44.]
- [54] Wu Y, Yin X A, Mao X F, *et al.* Analysis of plankton changes in dammed plateau rivers based on Ecopath modeling [J]. *Journal of Hydroecology*, 2020, **41**(5): 115-123. [吴艺, 尹心安, 毛旭锋, 等. 基于Ecopath模型的筑坝河流浮游生物变化分析 [J]. 水生生态学杂志, 2020, **41**(5): 115-123.]
- [55] Fu B J, Wu B F, Zhou Y M. Three Gorges Project: efforts and challenges for the environment [J]. *Progress in Physical Geography*, 2010, **34**(6): 741-754.
- [56] Liu Y Y, A yi Q L, Zhang S R, *et al.* Comparative study on the suitability of periphytic algae and phytoplankton in river health assessment [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, **40**(11): 3833-3843. [刘园园, 阿依巧丽, 张森瑞, 等. 着生藻类和浮游藻类在三峡库区河流健康评价中的适宜性比较研究 [J]. 生态学报, 2020, **40**(11): 3833-3843.]

ENERGY SOURCE TRACING OF FOUR SMALL-SIZED FISH AND SPATIOTEMPORAL DIFFERENCES IN THE THREE GORGES RESERVOIR AREA

DENG Hua-Tang¹, RAN Li^{1,2}, XUE Yang³, ZHOU Chun-Long³, CHEN Da-Qing¹,
DUAN Xin-Bin¹ and TIAN Hui-Wu¹

(1. National Agricultural Science Observing and Experimental Station of Chongqing; Yangtze River Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Wuhan 430223, China; 2. College of Fisheries, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China; 3. Chongqing Aquatic Technology Promotion Station, Chongqing 401147, China)

Abstract: In order to evaluate food utilization and trophic transfer efficiency of the food chain in the Three Gorges Reservoir, stable carbon and nitrogen isotope methods were employed to investigate the spatiotemporal variations in the energy contribution of four fundamental carbon sources-phytoplankton, C₃, C₄ plants in the riparian zone, and epiphytic algae-to four dominant small-sized fish species, *Squalidus argentatus*, *Saurogobio dabryi*, *Pseudobrama simoni*, and *Hemiculter leucisculus*. The results indicated significant differences in the $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ values among different carbon source organisms, effectively distinguishing their fundamental carbon sources. The outcomes of the Bayesian mixed model suggested that phytoplankton contributes the highest proportion of energy to the four small fish species. At the hydrological scale, there is no significant difference in the contribution rates of autochthonous and allochthonous carbon sources to the four small fish ($P>0.05$). However, at the spatial scale, a highly significant difference was observed ($P<0.01$). This study indicate that autochthonous carbon is the primary energy source for small fish in the reservoir area, while the contribution of allochthonous carbon sources increases noticeably along the longitudinal gradient of the Three Gorges Reservoir. This may be associated with the characteristics of diverse submerged area and the increased sedimentation of exogenous carbon source particles in the quiescent water environment near the reservoir head.

Key words: Three Gorges Reservoir area; Stable isotope analysis; Small-sized fish species; Trophic tracing; Basal carbon source