

# 基于特征脂肪酸和稳定同位素技术的新疆长身高原鳅摄食习性研究

张丽蓉<sup>1,2,3</sup>, 郝慧敏<sup>1,2,3</sup>, 聂竹兰<sup>1,2,3</sup>, 魏杰<sup>1,2,3</sup>, 张蝶燕<sup>4</sup>

1. 塔里木大学 生命科学与技术学院, 新疆维吾尔自治区阿拉尔 843300
2. 省部共建塔里木盆地生物资源保护利用国家重点实验室, 新疆维吾尔自治区阿拉尔 843300
3. 塔里木珍稀鱼类研究中心, 新疆维吾尔自治区阿拉尔 843300
4. 新疆生产建设兵团第一师农业技术推广站, 新疆维吾尔自治区阿拉尔 843300

**摘要:** 长身高原鳅 (*Triplophysa tenuis*) 对维持木扎提河的水生态系统物质和能量流动具有重要作用。文章基于脂肪酸生物标记法和碳、氮稳定同位素 ( $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$ ) 技术研究了长身高原鳅的食性和营养生态位特征。结果显示, 其肌肉中共检测出 22 种脂肪酸, 其中有 8 种饱和脂肪酸、6 种单不饱和脂肪酸、8 种多不饱和脂肪酸; 由特征脂肪酸组成情况推测, 长身高原鳅对浮游动物、硅藻、陆地植物或喜摄食硅藻的鱼虾均有摄食, 表现为杂食性。长身高原鳅的  $\delta^{13}\text{C}$  和  $\delta^{15}\text{N}$  分别介于  $-27.09\text{‰}$ ~ $-20.98\text{‰}$  和  $5.71\text{‰}$ ~ $8.45\text{‰}$ , 营养级介于 2.68~3.48。雌雄样本间的  $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$  和营养级均不存在显著性差异 ( $P>0.05$ ); 雄性样本核心生态位 (Standard ellipse area, SEAc) 和总生态位 (Total area of convex hull, TA) 均高于雌性。 $\delta^{13}\text{C}$  与体长间表现为极显著正相关性 ( $P<0.01$ ),  $\delta^{15}\text{N}$  和营养级与体长间不具有显著相关性。70~80 mm 体长组与 90 mm 以上体长组 SEAc 面积不存在重叠且在聚类分析中被分为不同组。综上, 长身高原鳅的食性为杂食性且食物组成随体长变化而不同, 作为营养级偏高的捕食者, 长身高原鳅能延长食物链长度, 增加食物网复杂性, 有利于维持水域生态系统的稳定性。

**关键词:** 长身高原鳅; 脂肪酸;  $\delta^{13}\text{C}$ ;  $\delta^{15}\text{N}$ ; 食性; 生态位; 营养级

中图分类号: S 917.4

文献标志码: A

开放科学 (资源服务) 标识码 (OSID):



## Feeding habits of *Triplophysa tenuis* in Xinjiang based on fatty acid and stable carbon and nitrogen isotopic analysis

ZHANG Lirong<sup>1,2,3</sup>, HAO Huimin<sup>1,2,3</sup>, NIE Zhulan<sup>1,2,3</sup>, WEI Jie<sup>1,2,3</sup>, ZHANG Dieyan<sup>4</sup>

1. School of Life Science and Technology, Tarim University, Aral City 843300, China
2. State Key Laboratory Breeding Base for The Protection and Utilization of Biological Resources in Tarim Basin Co-funded by Xinjiang Corps and The Ministry of Science and Technology, Aral City 843300, China
3. Tarim Rare Fish Research Center, Aral City 843300, China
4. Agricultural Technology Extension Station of The First Division, Xinjiang Production & Construction, Aral City 843300, China

**Abstract:** *Triplophysa tenuis* plays an important role in maintaining the flow of material and energy in aquatic ecosystem. In this study, we applied fatty acid biomarker method and carbon and nitrogen stable isotope technique to study the feeding and nutritional ecological niche characteristics of *T. tenuis*. The results show that a total of 22 fatty acids were detected in the muscle,

收稿日期: 2023-09-27; 修回日期: 2023-11-12

基金项目: 国家自然科学基金地区基金项目 (31860729); 塔里木大学校长基金创新研究团队项目“南疆裂腹鱼类种质资源与遗传育种创新研究团队” (TDZKCX202204); 第三次新疆综合科学考察项目 (2022xjkk150403)

作者简介: 张丽蓉 (1998—), 女, 硕士研究生, 研究方向为水生生物资源与保护利用。E-mail: 1416566347@qq.com

通信作者: 魏杰 (1981—), 男, 教授, 硕士, 研究方向为水生生物资源与保护利用、水域生态学。E-mail: weijiedky@126.com

including eight kinds of saturated fatty acids (SFA), six kinds of monounsaturated fatty acids (MUFA) and eight kinds of polyunsaturated fatty acids (PUFA). The specific fatty acid analysis reveals that *T. tenuis* feeds on zooplankton, diatoms, land plants, or fish and shrimps that like to feed on diatoms. The carbon stable isotope ( $\delta^{13}\text{C}$ ) values and nitrogen stable isotope ( $\delta^{15}\text{N}$ ) values ranged from  $-27.09\text{‰}$  to  $-20.98\text{‰}$  and from  $5.71\text{‰}$  to  $8.45\text{‰}$ , while trophic levels ranged from 2.68 to 3.48. There were no significant differences between males and females ( $P>0.05$ ) in  $\delta^{13}\text{C}$  value,  $\delta^{15}\text{N}$  value or trophic level. Males had higher standard ellipse area (SEAc) and total area of convex hull (TA) than females. There were significant changes in  $\delta^{13}\text{C}$  values with increasing body length ( $P<0.01$ ), and insignificant changes in  $\delta^{15}\text{N}$  values and trophic level. The SEAc areas of 70–80 mm body length group did not overlap with those of greater than 90 mm body length group, and were categorized into different groups in the cluster analysis. In conclusion, *T. tenuis* is omnivorous and its food composition varies with body length. As a predator with high trophic level, it can extend the food length chain length and increase the complexity of food web, which is conducive to the maintenance of stability of aquatic ecosystem.

**Keywords:** *Triplophysa tenuis*; Fatty acids;  $\delta^{13}\text{C}$ ;  $\delta^{15}\text{N}$ ; Feeding; Ecological niche; Trophic level

长身高原鳅 (*Triplophysa tenuis*) 作为我国特有鱼类, 分布在新疆塔里木河、阿克苏河、开都河及甘肃河西走廊黑河、疏勒河等流域<sup>[1]</sup>, 具有体型小、生长缓慢等特点<sup>[2]</sup>, 对高原的适应能力极强, 有助于维护生态环境的稳定性<sup>[3]</sup>。近年来, 新疆特有土著鱼类在生存上面临外来物种引入、人为干扰等问题, 导致其濒危<sup>[4]</sup>。因此, 对长身高原鳅等土著鱼类的资源保护刻不容缓。

随着人们对鱼类资源的可持续发展及生物多样性保护的重视程度加深, 濒危鱼类的资源保护研究也越来越深入。研究鱼类的摄食习性, 不仅可以掌握鱼类的食物组成和饵料环境, 了解鱼类之间的捕食竞争关系, 进而评估鱼类的活动规律, 为鱼类生物学研究奠定基础<sup>[5-7]</sup>, 还可以揭示其在整个水生生态系统食物链中的重要作用, 对保护鱼类种质资源具有重要意义<sup>[8]</sup>。目前, 针对长身高原鳅的研究多集中在生物学<sup>[9]</sup>、生长特性<sup>[2]</sup>及人工繁殖等方面<sup>[10]</sup>, 而食性方面的研究较为薄弱。

胃含物分析法是鱼类食性研究中的传统方法应用于多数鱼类, 如大刺鲃 (*Mastacembelus armatus*)<sup>[11]</sup>、巨须裂腹鱼 (*Schizothorax macropogon*)<sup>[12]</sup>和粗唇高原鳅 (*T. crassilabris*)<sup>[13]</sup>等, 此法具有直观且成本低的特点, 但只能反映鱼类近期的食物摄入情况, 不能反映已消化的食物类型, 而这将影响食性鉴定结果; 相比之下, 脂肪酸标记和稳定同位素分析在研究生物的长期食物摄入方面具有明显优势。特定的脂肪酸通常只能由特定的生物合成, 动物摄入的外源性脂肪酸会在食物网的传递过程中储存起来, 通常沉积在组织中, 因此脂肪酸标记可用于揭示长期的食物来源, 并确定生物之间的摄食关

系<sup>[14]</sup>。生态系统中碳、氮稳定同位素 ( $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$ ) 可以通过食物链稳定地富集于生物体中, 生物体稳定同位素比值与其食物对应同位素比值的比较, 有利于揭示消费者更长时期的食物来源与营养关系<sup>[15]</sup>。

因此, 本研究利用脂肪酸标记法和稳定同位素技术探究了长身高原鳅的摄食习性及其生态位, 分析其主要摄食来源及营养结构在性别和各体长组的变化, 为探讨长身高原鳅对生存水域生态系统的影响提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 样品采集及处理

实验所用样品于 2023 年 4—5 月利用地笼采集自新疆木扎提河流域 ( $80^{\circ}59'9''\text{E}$ ,  $41^{\circ}47'32''\text{N}$ )。本次实验共使用 41 尾长身高原鳅成鱼, 测定其体长 (精确到 0.01 mm) 和体质量 (精确到 0.01 g), 并判定性别。经过测定, 雌性个体样本 20 尾, 体长介于 70.01~118.75 mm, 体质量介于 3.01~12.19 g, 肠长/体长介于 0.57~0.98; 雄性个体样本 21 尾, 体长介于 70.06~112.26 mm, 体质量介于 2.80~10.70 g, 肠长/体长介于 0.53~0.92。本研究以 10 mm 为分组组距, 将样本分为 5 个体长组。取出 41 个样本的背部肌肉, 用超离子水冲洗后, 置于冷冻干燥机 (TF-FD-1) 中  $-54\text{ }^{\circ}\text{C}$  冻干 48 h, 研磨成均匀的粉末, 装入干燥离心管中, 保存备用。

### 1.2 脂肪酸测定

称取研磨好的样品约 50 mg, 加入 1.0 mL 正己烷 (含作为内标的十一烷酸甘油三酯, 质量浓度为  $0.5\text{ mg}\cdot\text{mL}^{-1}$ ), 涡旋振荡后于  $60\text{ }^{\circ}\text{C}$  水浴锅加热浸

提 30 min, 间或混匀。加入 1.0 mL 0.5 mol·L<sup>-1</sup> 甲醇钠溶液进行甲酯化后, 充分摇匀 10 min, 14 000 r·min<sup>-1</sup> 离心 5 min, 将上清液通过滤膜过滤, 上机分析。采用 Agilent 7000D 质谱仪进行脂肪酸检测分析。进样口温度 280 °C, 离子源温度 230 °C, 电子轰击电离 (Electron impact ion source, EI) 源, SIM 扫描模式, 电子能量 70 eV。定性分析采用对比与标准脂肪酸的保留时间, 定量采用内标法。

### 1.3 稳定同位素分析

#### 1.3.1 稳定同位素计算

所有肌肉样品干燥离心管保存后送至上海派森诺生物科技有限公司进行稳定同位素测定。Sercon Integra2 型元素分析-稳定同位素比值质谱联用仪 (Elementary analyzer-stable isotope ratio mass spectrometers, EA-IRMS) 联机测定样品的碳、氮稳定同位素比值。碳、氮稳定同位素分析分别采用国际标准物质 PDB (Pee Dee Belemnite)、标准大气氮对比。公式为<sup>[16]</sup>:

$$\delta X = \left( \frac{R_{\text{sample}}}{R_{\text{standard}}} - 1 \right) \times 10^3\text{‰} \quad (1)$$

式中:  $\delta X$  为  $\delta^{13}\text{C}$  或  $\delta^{15}\text{N}$ (‰);  $R_{\text{sample}}$  为样品所检测的 C、N 同位素比值, 即  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$  或  $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$ ;  $R_{\text{standard}}$  为国际标准物 PDB 的  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$  丰度比值或者是大气中氮气  $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$  的丰度比值; 分析精度  $\delta^{13}\text{C} < 0.1\text{‰}$ ,  $\delta^{15}\text{N} < 0.2\text{‰}$ 。

#### 1.3.2 营养级计算

营养级计算公式为<sup>[17]</sup>:

$$\text{TL} = \frac{(\delta^{15}\text{N}_{\text{sample}} - \delta^{15}\text{N}_{\text{baseline}})}{\Delta\delta^{15}\text{N}} + \lambda \quad (2)$$

式中: TL 为样本营养级;  $\delta^{15}\text{N}_{\text{sample}}$  为样本的 N 稳定同位素比值;  $\delta^{15}\text{N}_{\text{baseline}}$  为样本所在水域生态系统中基线生物的氮稳定同位素比值;  $\Delta\delta^{15}\text{N}$  为相邻营养级之间氮稳定同位素的富集度;  $\lambda$  为基线生物营养级。基线生物通常指寿命长、常年存在且食性简单的初级消费者<sup>[18]</sup>。本实验缺乏对浮游生物稳定同位素的测定值, 因此本研究  $\delta^{15}\text{N}_{\text{baseline}}$  参考克孜勒河浮游动物的  $\Delta\delta^{15}\text{N}$  平均值即 3.4‰<sup>[19]</sup>;  $\Delta\delta^{15}\text{N}$  参考淡水生态系统中普遍运用的数值 (3.4‰)<sup>[17]</sup> 所取的基线生物,  $\lambda$  取值为 2。

#### 1.3.3 营养生态位参数

本研究用于营养生态位的参数有: 1)  $\delta^{13}\text{C}$  范围 ( $\delta^{13}\text{C}$  Range, CR) 指长身高原鳅  $\delta^{13}\text{C}$  最大值与最小值之差, 反映摄食来源的多样性水平; 2)  $\delta^{15}\text{N}$

范围 ( $\delta^{15}\text{N}$  Range, NR) 指长身高原鳅  $\delta^{15}\text{N}$  最大值与最小之差, 反映摄食的营养层次<sup>[20]</sup>; 3) 总生态位 (Total area of convex hull, TA) 为  $\delta^{13}\text{C}$ - $\delta^{15}\text{N}$  最外围二维点集所围成凸多边形面积, 反映物种利用资源的能力强弱; 4) 核心生态位 (Standard ellipse area, SEAc) 是以  $\delta^{13}\text{C}$ - $\delta^{15}\text{N}$  散点图中所有点为边界的标准椭圆面积; SEAc 是校正标准椭圆的面积, 它减少了样本数量对结果的影响<sup>[21]</sup>。

### 1.4 数据处理

使用 SPSS 26.0 软件进行数据处理, 利用单因素方差分析 (One-way ANOVA) 进行雌雄、体长显著性差异检验, 使用 Pearson 分析体长和脂肪酸、体长与  $\delta^{13}\text{C}$  和  $\delta^{15}\text{N}$  的相关性, 使用 R 语言中 SIBER 包进行数据计算, 包括 TA、SEA、SEAc、SEAc 重叠率和 SEAc 重叠面积。

## 2 结果

### 2.1 脂肪酸组成及含量

通过对 41 尾长身高原鳅肌肉组织进行脂肪酸成分分析, 共检测出 22 种脂肪酸成分, 起始碳链长度介于 11 碳到 22 碳 (表 1)。其中含有 8 种饱和脂肪酸 (Saturated fatty acid, SFA), 质量分数为  $(76.68 \pm 22.71) \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ ; 6 种单不饱和脂肪酸 (Monounsaturated fatty acid, MUFA), 质量分数为  $(67.92 \pm 24.07) \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ ; 8 种多不饱和脂肪酸 (Polyunsaturated fatty acid, PUFA), 质量分数为  $(60.72 \pm 18.73) \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 。22 种脂肪酸中含量较高的有 C16:1、C16:0、C20:5n3 (EPA)、C18:1n9, 分别占总脂肪酸含量的 18.74%、17.02%、13.77%、13.40%, 4 种脂肪酸占总脂肪酸含量的 50% 以上。

n-3 系列多不饱和脂肪酸 (n-3 PUFAs) 的平均质量分数为  $(46.72 \pm 15.41) \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ , n-6 系列脂肪酸 (n-6 PUFAs) 的平均质量分数为  $(13.99 \pm 4.64) \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ , 分别占脂肪酸总含量的 22.75% 和 6.81%, n-6 系列脂肪酸含量显著低于 n-3 系列。

从性别分布来看, 长身高原鳅雌性和雄性的脂肪酸平均质量分数分别为  $(212.69 \pm 63.77)$  和  $(198.32 \pm 57.79) \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 。雌性长身高原鳅的 SFA、MUFA、PUFA 含量均高于雄性。单因素方差分析结果显示, 长身高原鳅脂肪酸含量与其性别无显著性关系 ( $F=0.573, P>0.05$ )。

### 2.2 脂肪酸与体长的关系

体长分组中 (表 2), SFA 在 70~80 mm 体长组

表1 长身高原鳅脂肪酸组成及含量  
Table 1 Fatty acid composition and content of *T. tenuis*

脂肪酸 Fatty acid	平均质量分数 Average mass fraction/(mg·g <sup>-1</sup> )	百分比 Percentage/ %	样本量 Sample size/尾
十一碳酸甲酯 C11:0	19.06±10.59	9.28	41
十二碳酸甲酯 C12:0	0.83±0.68	0.40	41
十四碳酸甲酯 C14:0	10.66±4.35	5.19	41
十五碳酸甲酯 C15:0	0.45±0.20	0.22	41
十六碳酸甲酯 C16:0	34.94±11.53	17.02	41
十七碳酸甲酯 C17:0	0.47±0.18	0.23	41
十八碳酸甲酯 C18:0	9.66±2.24	4.71	41
二十碳酸甲酯 C20:0	0.61±0.20	0.30	41
饱和脂肪酸 ΣSFA	76.68±22.71	37.35	
十四碳-烯酸甲酯 C14:1	0.35±0.16	0.17	41
十六碳-烯酸甲酯 C16:1	38.47±14.98	18.74	41
十七碳-烯酸甲酯 C17:1	0.38±0.22	0.19	41
油酸 C18:1n9	27.50±10.27	13.40	41
二十碳-烯酸甲酯 C20:1	0.96±0.59	0.47	41
二十二碳-烯酸甲酯 C22:1	0.25±0.14	0.12	41
单不饱和脂肪酸 ΣMUFA	67.92±24.07	33.08	
十八碳二烯酸甲酯 C18:2n6	11.00±3.94	5.36	41
十八碳三烯酸甲酯 C18:3n6	1.32±0.46	0.64	41
α-亚麻酸 C18:3n3	7.44±4.03	3.62	41
二十碳三烯酸甲酯 C20:3n6	0.34±0.13	0.17	41
顺 11,14,17-二十碳三烯酸甲酯 C20:3n3	0.27±0.15	0.13	41
花生四烯酸甲酯 C20:4n6	1.32±0.41	0.64	41
二十碳五烯酸甲酯 C20:5n3 (EPA)	28.27±11.31	13.77	41
二十碳六烯酸甲酯 C22:6n3 (DHA)	10.75±2.37	5.24	41
多不饱和脂肪酸 ΣPUFA	60.72±18.73	29.57	41
多不饱和脂肪酸/饱和脂肪酸 ΣPUFA/SFA	0.87±0.41		
三烯酸 Σn-3	46.72±15.41	22.75	41
六烯酸 Σn-6	13.99±4.64	6.81	41
六烯酸/三烯酸 n-6/n-3	0.31±0.09		
二十二碳六烯酸/二十碳五烯酸 DHA/EPA	0.43±0.17		

的含量最高, 达 (101.15±15.55) mg·g<sup>-1</sup>, 并且随着体长的增加含量逐渐降低, 经 Pearson 相关分析显示其与体长之间存在极显著负相关性 ( $P<0.01$ );

MUFA 和 PUFA 均与体长无显著相关性 ( $P>0.05$ ), MUFA 在 70~80 mm 体长组含量最高, PUFA 在 100~110 mm 体长组的含量最高。多不饱和脂肪酸与饱和脂肪酸的比值 (PUFA/SFA) 与体长存在极显著正相关性 ( $P<0.01$ )。C22:6n3 (DHA) 和 C20:5n3 (EPA) 的质量分数分别在 100~110 mm 和 70~80 mm 体长组达到最大值, 分别为 (12.36±2.95) 和 (36.39±12.65) mg·g<sup>-1</sup>。n-3 脂肪酸在各体长组的含量均比 n-6 的高; n-3/n-6 在 100~110 mm 体长组出现最小值, 在 70~80 mm 体长组达到最大值, 各体长组间 n-3/n-6 无显著性差异 ( $P>0.05$ )。DHA/EPA 在各长组中存在显著正相关性 ( $P<0.05$ )。

### 2.3 长身高原鳅碳、氮稳定同位素特征

长身高原鳅碳、氮稳定同位素测定结果中,  $\delta^{13}\text{C}$  介于 -27.09‰~-20.98‰, 平均值为 (-24.75±1.54)‰,  $\delta^{13}\text{C}$  范围为 4.18‰;  $\delta^{15}\text{N}$  介于 5.71‰~8.45‰, 平均值为 (7.09±0.63)‰,  $\delta^{15}\text{N}$  范围为 2.74‰。

雌性样本  $\delta^{13}\text{C}$  平均值为 (-24.52±1.13)‰, CR 为 4.18‰; 雄性样本  $\delta^{13}\text{C}$  平均值为 (-24.71±0.77)‰, CR 为 2.82‰ (表 3); 雌、雄样本间  $\delta^{13}\text{C}$  差异不显著 ( $P>0.05$ )。雌性样本  $\delta^{15}\text{N}$  平均值为 (7.13±0.48)‰, NR 为 2.27‰; 雄性样本  $\delta^{15}\text{N}$  平均值为 (7.05±0.73)‰, NR 为 2.71‰ (表 3); 雌、雄样本间  $\delta^{15}\text{N}$  差异不显著 ( $P>0.05$ )。

长身高原鳅的营养级介于 2.68~3.48, 平均值为 3.08±0.18; 雌性样本营养级介于 2.81~3.48, 均值为 3.10±0.14; 雄性样本营养级介于 2.68~3.47, 均值为 3.07±0.22 (表 3)。雌、雄样本间的营养级无显著性差异 ( $P>0.05$ )。雄性样本的 TA、SEAc 均大于雌性样本 (表 3, 图 1)。雌、雄样本的 SEAc 重叠率为 0.58, SEAc 重叠面积为 1.33‰<sup>2</sup>, 分别占雌性样本的 74.30% 和雄性样本的 67.86%。

### 2.4 长身高原鳅碳、氮同位素在体长间的分布特征

长身高原鳅 41 个肌肉样品中,  $\delta^{13}\text{C}$  和  $\delta^{15}\text{N}$  分别在 110~120 mm 和 70~80 mm 体长组呈现最大值, 分别在 70~80 mm 和 90~100 mm 体长组呈现最小值; CR 和 NR 均在 90~100 mm 体长组最大, 而 CR 在 80~90 mm 体长组最小, NR 在 100~110 mm 体长组最小 (表 3)。

TA 和 SEAc 均在 90~100 mm 体长组最大, 在 100~110 mm 体长组最小; 90~100 mm 和 110~120 mm 体长组间 SEAc 重叠率最高 (0.63), 重叠面积分别占 90~100 mm 体长组 SEAc 面积的 74.49% 和

表2 不同体长组长身高原鳅脂肪酸质量分数  
Table 2 Fatty acid mass fraction of *T. tenuis* in different body length groups

组成 Composition	体长组 Body length group					P	Pearson 相关性
	70~80 mm	80~90 mm	90~100 mm	100~110 mm	110~120 mm		
饱和脂肪酸 SFA	101.15±15.55	82.69±24.67	67.85±18.74	69.72±16.32	57.30±12.77	0.000	-0.577**
单不饱和脂肪酸 MUFA	84.11±17.90	63.19±23.25	59.29±28.35	73.81±23.14	57.67±21.49	0.212	
多不饱和脂肪酸 PUFA	69.03±17.18	55.21±16.70	55.21±20.97	68.90±20.15	53.68±13.85	0.666	
多不饱和脂肪酸/饱和脂肪酸 PUFA/SFA	0.69±0.13	0.67±0.14	0.79±0.13	0.99±0.14	0.93±0.10	0.000	0.598**
二十碳五烯酸 C20:5n3 (EPA)	36.39±12.65	25.60±7.99	24.06±12.26	30.14±12.92	22.89±7.00	0.143	
二十二碳六烯酸 C22:6n3(DHA)	10.23±2.19	10.05±1.61	9.51±2.63	12.36±2.95	10.28±1.33	0.178	
三烯酸 n-3	54.67±14.57	42.71±16.80	42.71±16.80	51.62±18.27	41.11±11.17	0.478	
六烯酸 n-6	14.35±3.26	12.50±4.41	12.51±5.06	17.28±4.81	12.57±3.75	0.543	
三烯酸/六烯酸 n-3/n-6	3.85±0.65	3.53±0.57	3.51±0.95	3.12±1.12	3.37±0.93	0.076	
二十二碳六烯酸/二十碳五烯酸 DHA/EPA	0.29±0.06	0.43±0.17	0.47±0.19	0.47±0.19	0.48±0.15	0.020	0.361*

注: \*. 差异性显著 ( $P<0.05$ ); \*\*. 差异性极显著 ( $P<0.01$ ).

Note: \*. Significant difference ( $P<0.05$ ); \*\*. Very significant difference ( $P<0.01$ ).

表3 长身高原鳅基本信息和同位素特征值  
Table 3 Basic information and isotopic signature values of *T. tenuis*

分类标准 Classification criteria	样本量 Sample size	体长范围 Body length range/mm	平均体长 Average length/mm	$\delta^{13}\text{C}/\text{‰}$	$\delta^{15}\text{N}/\text{‰}$	
性别 Sex	雌性 Female	20	70.01~118.75	92.32±13.71	-24.52±1.13	7.13±0.48
	雄性 Male	21	70.06~112.26	94.59±12.65	-24.71±0.77	7.05±0.73
体长组 Body length group/mm	70~80	7	70.01~76.72	71.99±2.25	-25.73±0.71	7.44±0.64
	80~90	11	83.64~89.96	85.62±1.72	-24.87±0.89	7.12±0.61
	90~100	8	91.65~99.97	95.67±2.63	-24.16±0.98	6.72±0.62
	100~110	10	100.46~109.16	104.11±2.67	-24.35±0.32	7.17±0.46
	110~120	5	110.06~118.75	112.40±3.27	-23.92±0.89	6.93±0.59
总量 Total	41	70.01~118.75	93.48±13.23	-24.62±0.97	7.09±0.62	
分类标准 Classification criteria	$\delta^{13}\text{C}$ 范围 CR/‰	$\delta^{15}\text{N}$ 范围 NR/‰	总生态位 TA/‰ <sup>2</sup>	核心生态位 SEAc/‰ <sup>2</sup>	营养级 Trophic level	
性别 Sex	雌性 Female	4.18	2.27	5.31	1.79	3.10
	雄性 Male	2.82	2.71	5.76	1.96	3.07
体长组 Body length group/mm	70~80	1.91	1.57	2.6	1.98	3.19
	80~90	1.04	1.72	2.74	1.77	3.09
	90~100	2.86	1.93	3.83	2.47	2.98
	100~110	1.17	1.50	1.04	0.57	3.11
	110~120	2.42	1.61	1.72	2.31	3.04
总量 Total	4.18	2.74	7.96	1.96	3.08	

110~120 mm 体长组的 79.65%; 70~80 mm 与 90 mm 以上体长组的重叠面积和重叠率均为 0; 不同体长组  $\delta^{13}\text{C}$  和  $\delta^{15}\text{N}$  的聚类分析结果中, 可将体长组分

为 3 组, 即 70~80 mm、80~90 mm 和 90 mm 以上 (表 3—4, 图 1—2)。两个结果说明 70~80 mm 体长组的样本与 90 mm 以上的体长组样本之间的竞

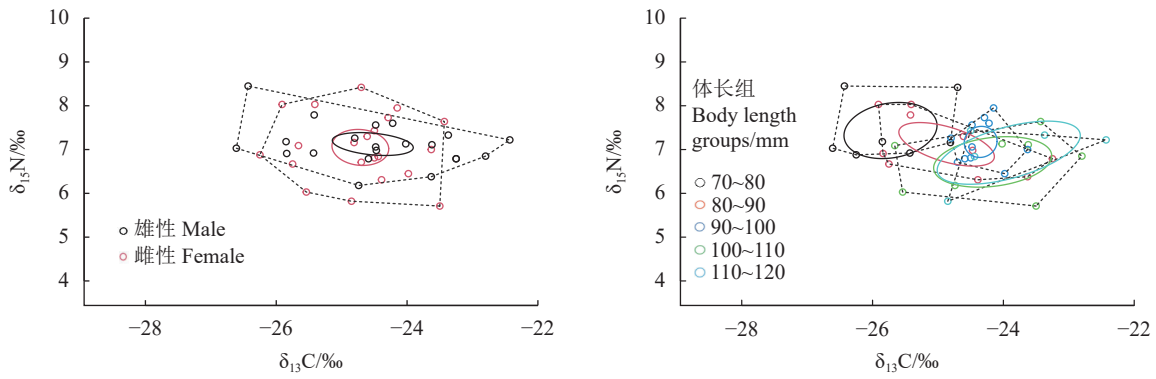


图1 长身高原鳅 TA、SEAc 构建图

注: 图中虚线部分表示总营养生态位 (TA), 实线部分表示核心生态位 (SEAc)。

Fig. 1 TA and SEAc based on  $\delta^{13}\text{C}$  and  $\delta^{15}\text{N}$  values of *T. tenuis*

Note: The dotted lines represent the total area of convex hull (TA) and the solid lines represent the standard ellipse area (SEAc).

表4 体长组之间 SEAc 重叠面积及重叠率

Table 4 SEAc overlap area and overlap rate between body length groups

体长组 Body length group/mm	70~80	80~90	90~100	100~110	110~120
70~80		0.18	0.00	0.00	0.00
80~90	0.69		0.26	0.21	0.22
90~100	0.00	0.88		0.16	0.63
100~110	0.00	0.41	0.42		0.16
110~120	0.00	0.73	1.84	0.40	

注: 对角线以上是 SEAc 重叠率, 对角线以下是 SEAc 重叠面积。

Note: Above the slash is the SEAc overlap rate, while below the slash is the SEAc overlap area.

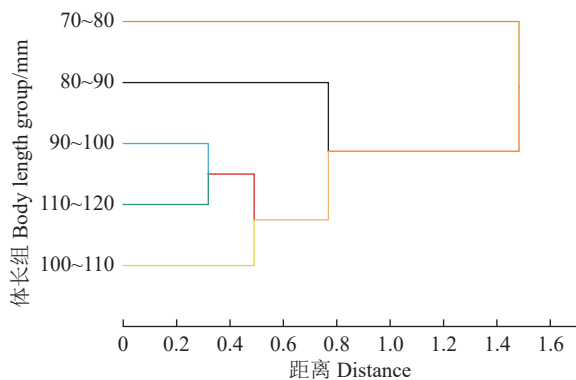


图2 不同体长组  $\delta^{13}\text{C}$  和  $\delta^{15}\text{N}$  的聚类分析

Fig. 2 Clustering analysis of  $\delta^{13}\text{C}$  and  $\delta^{15}\text{N}$  values in different body length groups

争较小, 可能饵料选择上具有差别, 存在不同的摄食偏好, 即食物组成随体长变化出现不同。

营养级在 70~80 mm 体长组最高, 在 90~100 mm 体长组最低, 但差异未达显著性水平 ( $P > 0.05$ )。对长身高原鳅  $\delta^{13}\text{C}$  和  $\delta^{15}\text{N}$  进行 Pearson 相关性分析显示, 其  $\delta^{13}\text{C}$  随体长的增加而显著增加

( $r=0.590$ ,  $P=5.000 \times 10^{-5}$ , 图 3-a);  $\delta^{15}\text{N}$  与体长相关性不显著 ( $r=-0.186$ ,  $P=0.246$ , 图 3-b)。

### 3 讨论

#### 3.1 长身高原鳅脂肪酸组成及含量

鱼类的脂肪酸组成和含量是评价其营养价值和摄食特征的重要指标<sup>[22]</sup>。本研究共检出 22 种脂肪酸, 其中饱和脂肪酸含量最高, 单不饱和脂肪酸含量次之, 多不饱和脂肪酸含量最低。在饱和脂肪酸中 C16:0 含量最为丰富, 占饱和脂肪酸含量的 45.57%, 此结果与武鹏飞等<sup>[23]</sup>对达里湖高原鳅、赵云龙等<sup>[24]</sup>对花鳅 (*Cobitis taenia* Linnaeus) 的研究结果一致。C16:0 是脂肪酸合成中最先合成的脂肪酸之一, 因此, 在饱和脂肪酸中其含量相对较高<sup>[25]</sup>。长身高原鳅的单不饱和脂肪酸中 C16:1 和 C18:1n9c 含量最高, 占单不饱和脂肪酸含量的 97.13%, 单不饱和脂肪酸对于血糖和血脂的调节具有一定功效<sup>[26]</sup>。多不饱和脂肪酸中含量最高的为 DHA 和 EPA, 是鱼类的必需脂肪酸, 在生物的基本生长过程中参与基因表达调控、细胞膜的构建、细胞增殖及部分生长激素的代谢<sup>[27]</sup>。

#### 3.2 基于特征脂肪酸分析长身高原鳅食性

基于传统胃含物解剖观察, 长身高原鳅以动物饵料为食, 主要是以底栖动物中的摇蚊幼虫和水生昆虫幼体为主<sup>[28]</sup>。特征脂肪酸能指示个体的食性, 通过脂肪酸的含量和组成能较好地反映个体的食物来源情况<sup>[29]</sup>(表 5)。

C15:0 和 C17:0 是指示浮游细菌的特征脂肪酸, 指示捕食者对浮游细菌的摄食<sup>[30]</sup>。本研究发

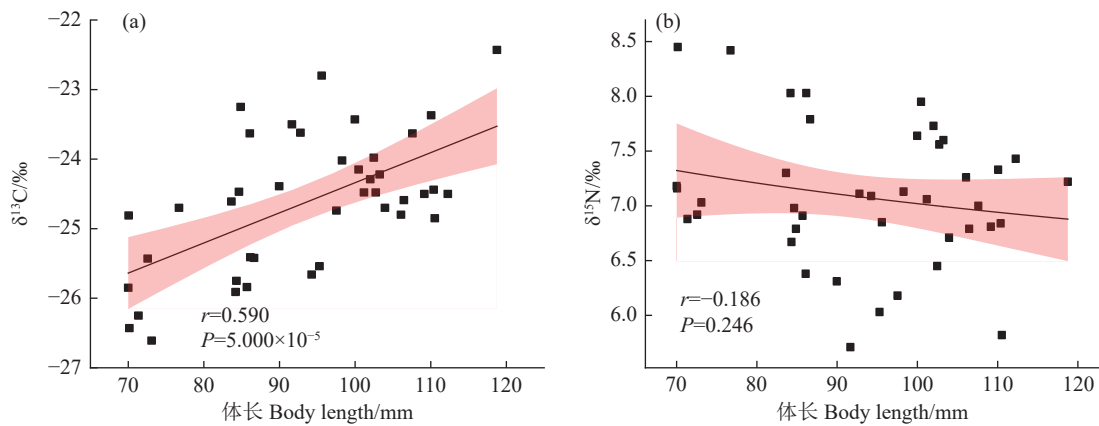
图3 长身高原鳅  $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$  与体长的相关性Fig. 3 Correlation between  $\delta^{13}\text{C}$ ,  $\delta^{15}\text{N}$  values and body length of *T. tenui*

表5 特征脂肪酸指示食性

Table 5 Characteristic fatty acids indicative of diet

特征脂肪酸 Characteristic fatty acids	指示食性 Indicative food behaviour
C14:0 <sup>[37]</sup> 、C16:1 <sup>[39]</sup> 、C20:5n3 <sup>[40]</sup>	硅藻
C15:0、C17:0 <sup>[30]</sup>	浮游细菌
C18:2n6+C18:3n3>2.5% <sup>[31]</sup>	陆源植物
C20:4n6 <sup>[33]</sup>	大型底栖生物
C18:1n9 <sup>[35]</sup>	肉食性
C20:1、C22:1 <sup>[32]</sup>	植食性桡足类
C18:1n9 <sup>[36]</sup>	浮游动物
C20:5n3(EPA)/C22:6n3(DHA)<1 <sup>[37]</sup>	甲藻

C15:0 和 C17:0, 占总脂肪酸的 0.45%, 说明浮游细菌对长身高原鳅的能量来源贡献极低。

C18:2n6+C18:3n3 高于 2.5% 通常被作为陆地植物的标志<sup>[31]</sup>。而本研究中长身高原鳅肌肉组织中 C18:2n6+C18:3n3=8.98%>2.5%, 说明陆地植物对其食物组成来源有一定贡献。C20:1 和 C22:1 可作为捕食者摄食植食性桡足类的标志脂肪酸, 因为 C20:1 和 C22:1 作为长单链脂肪酸, 只能依靠植食性的桡足类合成<sup>[32]</sup>。本研究中, C20:1 和 C22:1 仅占脂肪酸含量的 0.59%, 说明植食性的桡足类对长身高原鳅的食物组成来源贡献很小。C20:4n6 (ARA) 通常被用作指示大型底栖生物的特征脂肪酸<sup>[33]</sup>, 可指示微型浮游动物对大型藻类碎屑的摄食, 以及大型藻类碎屑通过腐生食物链传递至更高营养级的食肉动物<sup>[34]</sup>。长身高原鳅肌肉中的 C20:4n6 含量仅为 0.64%, 表明底栖生物在其食物组成中占比极小。C18:0 可以转化为 C18:1n9, 而 C18:1n9 可用作指示生物肉食性的标志脂肪

酸<sup>[35]</sup>, 也可作为指示更高级肉食性生物摄食浮游动物的特征脂肪酸<sup>[36]</sup>。长身高原鳅肌肉中的 C18:1n9 含量为 13.40%, 说明浮游动物对长身高原鳅食物来源贡献较大, 且其肠长与体长的比值小于 1, 证明其具备肉食性。甲藻能合成较多的 DHA, EPA/DHA 小于 1 可用于指示鱼类的食物来源中含有甲藻<sup>[37]</sup>。本研究 DHA 的质量分数为 5.24%, 其与体长不存在相关性, EPA/DHA=2.63>1, 因此, 长身高原鳅食物来源中甲藻的贡献率极低。

C14:0 和 C16:0 在长身高原鳅肌肉中含量较高, 占总脂肪酸含量的 22.21%, C14:0 和 C16:0 可指示捕食者对硅藻的摄食情况, 但由于 C16:0 是机体普遍存在并可自身合成的脂肪酸, 因此, 将其用于指示被捕食者的信息较为困难<sup>[38]</sup>。C16:1 和 EPA 不能由生物体自身合成, 可用作指示硅藻的特征脂肪酸<sup>[39-40]</sup>, 硅藻是多数浮游动物、鱼、虾喜好的食物, 且 EPA 也可指示腰鞭毛虫<sup>[37]</sup>。本研究中 C16:1 占总脂肪酸含量的 18.74%, 说明长身高原鳅对硅藻存在摄食; 指示浮游动物的 C18:1n9 含量为 13.40%, 结合高通量测序<sup>[19]</sup> 结果进而推测长身高原鳅肌肉中指示硅藻含量偏高可能是因摄食了喜食硅藻的浮游动物及鱼虾所致。

PUFA/SFA 和 DHA/EPA 可用于指示生物营养级大小, 比值越大营养级越高<sup>[41]</sup>。长身高原鳅的 PUFA/SFA 和 DHA/EPA 与体长存在显著正相关性, 随着体长的增加, 其营养级会随之增加。但本研究中整体上 PUFA/SFA 和 DHA/EPA 较小, 说明营养位置变化不大。Fukuda 和 Naganuma<sup>[34]</sup> 认为  $\Sigma n-6/\Sigma n-3$  可用来估算腐生食物链与捕食食物链对高营养级捕食者的贡献比例, 本研究中  $\Sigma n-6/\Sigma n-3$  较低, 表明腐生食物链对长身高原鳅摄食的贡献率低。

### 3.3 碳、氮稳定同位素分析

#### 3.3.1 雌、雄样本间稳定同位素差异

本研究结果显示, 长身高原鳅的雌、雄肌肉样本间  $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$  不存在显著性差异 ( $P>0.05$ ), 说明其食物来源和营养级相近。雌性样本的  $\delta^{13}\text{C}$  和  $\delta^{15}\text{N}$  高于雄性样本, 此研究结果与王开立等<sup>[42]</sup> 对蓝圆鲈 (*Decapterus maruadsi*) 的研究一致, 说明雌性个体需要摄取更高营养级的饵料生物来满足个体的卵巢发育和繁殖要求<sup>[43]</sup>。 $\delta^{13}\text{C}$  范围 (CR) 用于反映消费者饵料来源的广泛性,  $\delta^{15}\text{N}$  范围 (NR) 用于反映营养长度<sup>[20]</sup>。研究结果中雌性样本的 CR (4.18‰) 明显高于雄性样本 (2.82‰), 说明雌性摄食的饵料来源更为广泛; 雌性样本的 NR (2.27‰) 小于雄性样本 (2.71‰), 表明雄性的摄食的营养长度更长、营养层次更高。生态位宽幅通常可用于描述物种对资源和环境需求的特化程度, 预测物种对不断变化的环境条件的适应性<sup>[44]</sup>。本实验中雄性样本的 TA (5.76‰<sup>2</sup>) 和 SEAc (1.79‰<sup>2</sup>) 高于雌性样本 [TA (5.31‰<sup>2</sup>) 和 SEAc (1.79‰<sup>2</sup>)]。说明雄性样本的活动空间更大, 对资源的利用率更高, 适应环境变化的能力更强。SEAc 重叠率用于反映物种摄食饵料的相似程度, 其重叠率越高, 在食物的竞争上越激烈<sup>[45]</sup>。雌、雄样本的 SEAc 重叠面积 (1.33‰<sup>2</sup>) 和重叠率 (0.53) 较高, 说明雌、雄样本在饵料选择上基本一致, 在种内摄食过程中存在一定的竞争。

#### 3.3.2 不同体长间稳定同位素分析

对长身高原鳅体长与  $\delta^{13}\text{C}$  进行 Pearson 相关性分析,  $\delta^{13}\text{C}$  随体长的增加而增大, 说明长身高原鳅随着体长的增加会摄食  $\delta^{13}\text{C}$  更高的饵料生物; CR 在体长组中出现上下波动的情况, 饵料来源的多样性出现不规则变化, 推测原因有二: 1) 长身高原鳅体型偏小时, 存在种内和种间饵料资源竞争, 导致食物种类来源薄弱, 随着生长摄食器官发育完全, 大个体具有更强大的捕食能力, 竞争能力加强, 饵料资源种类增加; 2) 栖息地环境的变化, 一定程度上影响食物来源的多样性。

一般来说, 随着个体的生长, 捕食者体内的  $\delta^{15}\text{N}$  会不断富集, 营养级会随之上升<sup>[46]</sup>。张嘉琦和刘必林<sup>[47]</sup> 研究富山武装乌贼 (*Enoploteuthis chunii*) 营养生态位时发现,  $\delta^{15}\text{N}$  会随着胴长的增加而增大。但本研究中, 体长与  $\delta^{15}\text{N}$  间的相关性不显著, 且随着体长增加,  $\delta^{15}\text{N}$  反而出现降低的

现象。推测其原因有: 1) 随着体型的增大, 长身高原鳅可能会摄食体型较大且营养级低的食物。研究发现长身高原鳅主要摄食裂腹鱼属鱼类, 而裂腹鱼属个体较大且营养级低于长身高原鳅<sup>[19]</sup>; 2) 采样点位于木扎提河中上游, 由于水温低、海拔高, 外来入侵鱼类少, 土著鱼类中裂腹鱼属和高原鳅属依然是优势种<sup>[48]</sup>, 因此高营养级的捕食者较少, 整体营养层较低。长身高原鳅作为该水域营养级较高的捕食者, 流域中的鱼类生物资源得到了充分利用, 不仅延长了生态系统食物链的长度, 同时也增加了该流域食物网的复杂性, 有利于维持整个河流生态系统的稳定性。

在体长大于 100 mm 时, SEAc 出现下降趋势, 且在 90~100 mm 体长组中出现最大值, 说明该体长组的长身高原鳅对资源的利用率最高, 在 100~110 mm 体长组中 SEAc 最小, 即对资源的利用率最低。70~80 mm 和 90 mm 以上体长组的 SEAc 不存在重叠, 且聚类分析结果中, 长身高原鳅 70~80 mm 和 90 mm 以上体长组距离较远, 可分为不同组; 由于缺乏长身高原鳅摄食饵料的种类和数量的研究数据, 而鱼类食物组成随体长变化是一个普遍现象, 因此推测长身高原鳅的食物组成随体长的变化而不同<sup>[49]</sup>。随着个体体长的逐渐增加, 游泳能力加强, 摄食范围更广, 其对食物资源的利用效率也随之提高, 大个体展现出更强的竞争能力, 捕食体型较大的饵料生物的成功率也随之上升<sup>[50]</sup>。

#### 3.3.3 长身高原鳅营养级和食性

研究发现, 长身高原鳅营养级变化范围为 2.68~3.48, 平均营养级为  $3.08\pm 0.18$ , 赵贺等<sup>[19]</sup> 通过稳定同位素分析得出, 克孜勒河长身高原鳅营养级为 3.55, 与本研究存在一定差异, 这主要是由研究区域不同所导致。生物体内稳定同位素受分馏机制影响较大, 甚至相同组织的不同稳定同位素表现出富集度差异<sup>[51]</sup>。在初级生产者和消费者之间, 消费者基本上保留着食物中  $\delta^{13}\text{C}$  的特征, 所以  $\delta^{13}\text{C}$  可用来进行鱼类食物组成分析<sup>[52]</sup>。Boutton<sup>[53]</sup> 认为陆源 C3 植物的  $\delta^{13}\text{C}$  介于  $-30\text{‰} \sim -23\text{‰}$ ,  $\delta^{15}\text{N}$  介于  $-5\text{‰} \sim 18\text{‰}$ ; 陆源 C4 植物的  $\delta^{13}\text{C}$  介于  $-17\text{‰} \sim -9\text{‰}$ ,  $\delta^{15}\text{N}$  介于  $3\text{‰} \sim 6\text{‰}$ 。河口区浮游植物的  $\delta^{13}\text{C}$  介于  $-30\text{‰} \sim -19\text{‰}$ ,  $\delta^{15}\text{N}$  介于  $6\text{‰} \sim 9\text{‰}$ <sup>[54]</sup>。本研究中长身高原鳅  $\delta^{13}\text{C}$  为  $(-24.62\pm 0.97)\text{‰}$ , 该



值处于陆源 C3 植物与河口区浮游植物间并与陆源 C3 植物较为接近,说明长身高原鳅对陆源 C3 植物摄食偏多,此结果与高通量测序肠道的食物来源结果相似,表明长身高原鳅会摄食部分异株菟属 (*Aztecaster*)、怪柳属 (*Tamarix*) 和柑橘类植物<sup>[19]</sup>;脂肪酸测定结果也验证了其肌肉中含有部分指示陆地植物的脂肪酸。

在利用特征脂肪酸探究长身高原鳅的食性时,同一种特征脂肪酸标记的食物种类可以是多种,不具有准确性,也无法确定部分食物被长身高原鳅直接或间接摄食;鱼类的摄食随体长变化是一个普遍现象,本研究运用稳定同位素技术推断出长身高原鳅的食物组成也随体长而变化。以上结论均基于生物标记法,因此笔者认为要使结果更具说服力,今后还应结合传统的胃含物分析法,细致地了解长身高原鳅所摄食的饵料种类和数量及各生长阶段的食物组成变化,使实验结果更为全面准确。

#### 4 结论

本研究基于特征脂肪酸生物标记法和碳、氮稳定同位素技术分析了长身高原鳅的摄食习性,讨论了长身高原鳅的脂肪酸组成及碳、氮稳定同位素在其雌、雄个体间及不同体长组间的含量与摄食关系。特征脂肪酸指示食性显示,长身高原鳅对浮游动物、硅藻、陆地植物或喜摄食硅藻的鱼虾均有摄食,属杂食性鱼类。在碳、氮稳定同位素分析结果显示,长身高原鳅雌、雄样本稳定同位素差异不大;而根据营养生态位宽幅指标及聚类分析,推测长身高原鳅的食物组成随体长的变化而不同。但本研究缺乏对长身高原鳅摄食种类和数量的研究,今后应结合传统胃含物镜检法,研究其各个生长阶段的摄食习性,进一步提高结果的准确性。

#### 参考文献:

[1] 郭焱,张人铭,蔡林钢. 新疆鱼类志[M]. 乌鲁木齐:新疆科学技术出版社,2012:114-115.

[2] 金珊珊,王新月,林欣,等. 新疆开都河长身高原鳅的年龄与生长的关系[J]. 新疆农业科学,2020,57(1):181-189.

[3] 曾霖,唐文乔. 两种无鳞高原鳅年龄鉴定方法探讨[J]. 动物学杂志,2010,45(1):94-103.

[4] 马燕武,郭焱,陈朋,等. 新疆开都河鱼类区系组成与分布[J]. 淡水渔业,2013,43(5):21-26.

[5] MOTTA P J, CLIFTON K B, HERNANDEZ P, et al. Ecomorphological correlates in ten species of subtropical seagrass fishes: diet

and microhabitat utilization[J]. *Environ Biol Fish*, 1995, 44(1): 37-60.

[6] PIET G J. Ecomorphology of a size-structured tropical freshwater fish community[J]. *Environ Biol Fish*, 1998, 51(1): 67-86.

[7] HYSLOP E J. Stomach contents analysis: a review of methods and their application[J]. *J Fish Biol*, 1980, 17(4): 411-429.

[8] XIA Y G, LI Y F, ZHU S Z, et al. Individual dietary specialization reduces intraspecific competition, rather than feeding activity, in black Amur bream (*Megalobrama terminalis*)[J]. *Sci Rep*, 2020, 10(1): 17961.

[9] 姚娜,刘洁雅,马良,等. 塔里木河上游隆额高原鳅与长身高原鳅的生物学特征[J]. 贵州农业科学,2018,46(4):82-86.

[10] 谢春刚,周宗光,阿布都吾甫尔·依提,等. 帕米尔高原典型鱼类长身高原鳅人工繁殖初步研究[J]. 中国水产,2018(7):100-101.

[11] 马本贺,王海华,徐先栋,等. 大刺鳅消化道结构及食性研究[J]. 渔业科学进展,2022,43(3):56-63.

[12] 刘洁雅. 西藏巨须裂腹鱼个体生物学和种群动态研究[D]. 阿拉尔:塔里木大学,2016:33.

[13] 鄢思利,郭延蜀,杨骏,等. 粗唇高原鳅生物学研究[J]. 水产科学,2015,34(8):506-509.

[14] BECKMANN C L, MITCHELL J G, STONE D A J, et al. A controlled feeding experiment investigating the effects of a dietary switch on muscle and liver fatty acid profiles in Port Jackson sharks *Heterodontus portusjacksoni*[J]. *J Exp Mar Biol Ecol*, 2013, 448: 10-18.

[15] 崔莹. 基于稳定同位素和脂肪酸组成的中国近海生态系统物质流动研究[D]. 上海:华东师范大学,2012:17-26.

[16] PETERSON B J, FRY B. Stable isotopes in ecosystem studies[J]. *Annu Rev Ecol Evol S*, 1987, 18(1): 293-320.

[17] POST D M. Using stable isotopes to estimate trophic position: models, methods, and assumptions[J]. *Ecology*, 2002, 83(3): 703-718.

[18] VANDER ZANDEN M J, Rasmussen J B. Primary consumer  $\delta^{13}\text{C}$  and  $\delta^{15}\text{N}$  and the trophic position of aquatic consumers[J]. *Ecology*, 1999: 1395-1404.

[19] 赵贺,赵年桦,李丽,等. 新疆克孜勒河 5 种土著鱼食性分析[J]. 中国水产科学,2022,29(10):1461-1474.

[20] LAYMAN C A, ARRINGTON D A, MONTAÑA C G, et al. Can stable isotope ratios provide for community-wide measures of trophic structure?[J]. *Ecology*, 2007, 88(1): 42-48.

[21] JACKSON A L, INGER R, PARNELL A C, et al. Comparing isotopic niche widths among and within communities: SIBER-Stable isotope bayesian ellipses in R[J]. *J Anim Ecol*, 2011, 80(3): 595-602.

[22] SARGENT J R, TOCHER D R, BELL J G. The lipids[J]. *Fish Nutr*, 2003: 181-257.

[23] 武鹏飞,耿龙武,姜海峰,等. 达里湖高原鳅肌肉营养成分分析与品质评价[J]. 水产学杂志,2017,30(1):19-25.

[24] 赵云龙,郭志欣,尹智博,等. 野生花鳅和养殖花鳅营养价值的比较与分析[J]. 黑龙江畜牧兽医,2021(20):132-136.

[25] 全书月,李忠,梁宏伟,等. 长丰鲢卵巢发育后期的肝脏、卵巢

- 营养成分及脂肪酸变化[J]. 淡水渔业, 2018, 48(5): 79-85.
- [26] 蔡颂文, 韩婷, 韩玉麒, 等. 富含缓释淀粉高单不饱和脂肪酸型肠内营养制剂对超重的 2 型糖尿病病人血糖和血脂的影响[J]. 肠外与肠内营养, 2014, 21(3): 138-141.
- [27] LEE R F, HAGEN W, KATTNER G. Lipid storage in marine zooplankton[J]. Mar Ecol Prog Ser, 2006, 307: 273-306.
- [28] 吐尔逊, 任波, 张人铭, 等. 阿克苏河长身高原鳅 *Triplophysa (Triplophysa) teunis* (Day) 生物学研究[J]. 水产学杂志, 2005(2): 65-69, 100.
- [29] 赵振方, 胡贯宇, 陈新军, 等. 秘鲁外海茎柔鱼脂肪酸组成的月间差异研究[J]. 海洋湖沼通报, 2022, 44(4): 98-105.
- [30] RAJENDRAN N, SUWA Y, URUSHIGAWA Y. Distribution of phospholipid ester-linked fatty acid biomarkers for bacteria in the sediment of Ise Bay, Japan[J]. Mar Chem, 1993, 42(1): 39-56.
- [31] EVERY S L, PETHYBRIDGE H R, CROOK D A, et al. Comparison of fin and muscle tissues for analysis of signature fatty acids in tropical euryhaline sharks[J]. J Exp Mar Biol Ecol, 2016, 479: 46-53.
- [32] FALK-PETERSEN S, SARGENT J R, TANDE K S. Lipid composition of zooplankton in relation to the sub-arctic food web[J]. Polar Biol, 1987, 8(2): 115-120.
- [33] STOWASSER G, POND D W, COLLINS M A. Using fatty acid analysis to elucidate the feeding habits of Southern Ocean mesopelagic fish[J]. Mar Biol, 2009, 156: 2289-2302.
- [34] FUKUDA Y, NAGANUMA T. Potential dietary effects on the fatty acid composition of the common jellyfish *Aurelia aurita*[J]. Mar Biol, 2001, 138(5): 1029-1035.
- [35] 李莉, 张硕, 吴立珍. 脊尾白虾脂肪酸组成特点及其食性分析[J]. 大连海洋大学学报, 2019, 34(4): 552-557.
- [36] JOHNS R B, NICHOLS P D, PERRY G J. Fatty acid composition of ten marine algae from Australian waters[J]. Phytochemistry, 1979, 18(5): 799-802.
- [37] PARRISH C C, ABRAJANO T A, BUDGE S M, et al. Lipid and phenolic biomarkers in marine ecosystems: analysis and applications[J]. Mar chem, 2000: 193-223.
- [38] 李荷芳, 周汉秋. 海洋微藻脂肪酸组成的比较研究[J]. 海洋与湖沼, 1999, 30(1): 34-40.
- [39] VISO A C, MARTY J C. Fatty acids from 28 marine microalgae[J]. Phytochemistry, 1993, 34(6): 1521-1533.
- [40] POND D W, BELL M V, HARRIS R P, et al. Microplanktonic polyunsaturated fatty acid markers: a mesocosm trial[J]. Estuar Coast Shelf S, 1998, 46(2): 61-67.
- [41] ROSSI S, YOUNGBLUTH M J, JACOBY C A, et al. Fatty acid trophic markers and trophic links among seston, crustacean zooplankton and the siphonophore *Nanomia cara* in Georges Basin and Oceanographer Canyon[J]. Sci Mar, 2008, 72(2): 403-416.
- [42] 王开立, 龚玉艳, 陈作志, 等. 基于稳定同位素技术的南海北部蓝圆鲹的营养生态位[J]. 生态学杂志, 2022, 41(4): 724-731.
- [43] LIU B L, XU W, CHEN X J, et al. Ontogenetic shifts in trophic geography of jumbo squid, *Dosidicus gigas*, inferred from stable isotopes in eye lens[J]. Fish Res, 2020, 226: 105507.
- [44] HURLBERT S H. The measurement of niche overlap and some relatives[J]. Ecology, 1978, 59(1): 67-77.
- [45] 王凤, 鞠瑞亭, 李跃忠, 等. 生态位概念及其在昆虫生态学中的应用[J]. 生态学杂志, 2006(10): 1280-1284.
- [46] HOBSON K A, SINCLAIR E H, YORK A E, et al. Retrospective isotopic analyses of Steller sea lion tooth annuli and seabird feathers: a cross-taxa approach to investigating regime and dietary shifts in the Gulf of Alaska[J]. Mar Mammal Sci, 2004, 20(3): 621-638.
- [47] 张嘉琦, 刘必林. 基于碳氮稳定同位素技术的西北太平洋富山武装乌贼和相拟钩腕乌贼生态位变化研究[J]. 大连海洋大学学报, 2023, 38(3): 515-523.
- [48] 韩军军, 陈朋, 祁峰, 等. 新疆渭干河流域鱼类资源现状[J]. 水产科学, 2022, 41(1): 92-101.
- [49] 许莉莉, 薛莹, 徐宾铎, 等. 海州湾大泷六线鱼摄食生态研究[J]. 中国水产科学, 2018, 25(3): 608-620.
- [50] HORINOUCHE M, SANO M. Food habits of fishes in a *Zostera marina* bed at aburatsubo, central japan[J]. Ichthyol Res, 2000, 47(2): 163-173.
- [51] BUDGE S M, IVERSON S J, KOOPMAN H N. Studying trophic ecology in marine ecosystems using fatty acids: a primer on analysis and interpretation[J]. Mar Mammal Sci, 2006, 22(4): 759-801.
- [52] KRITZBERG E S, COLE J J, PACE M L, et al. Autochthonous versus allochthonous carbon sources of bacteria: results from whole-lake  $^{13}\text{C}$  addition experiments[J]. Limnol Oceanogr, 2004, 49(2): 588-596.
- [53] BOUTTON T W. Stable carbon isotope ratios of natural materials: II. Atmospheric, terrestrial, marine, and freshwater environments[J]. Carbon Isot Tech, 1991(1): 173-185.
- [54] BOUILLON S, MOHAN P C, SREENIVAS N, et al. Sources of suspended organic matter and selective feeding by zooplankton in an estuarine mangrove ecosystem as traced by stable isotopes[J]. Mar Ecol Prog Ser, 2000, 208(1): 79-92.