

DOI: 10.12264/JFSC2020-0303

基于稳定同位素技术的阳澄湖鱼类群落营养结构研究

叶学瑶^{1,2}, 任洸¹, 匡箴¹, 王媛¹, 徐东坡^{1,2}

1. 农业农村部长江下游渔业资源环境科学观测实验站, 中国水产科学研究院淡水渔业研究中心, 江苏 无锡 214081;
2. 上海海洋大学水产科学国家级实验教学示范中心, 上海 201306

摘要: 为探究阳澄湖水域鱼类群落的营养结构特征, 于 2017 年夏季(7 月)、秋季(10 月)、2018 年春季(4 月)对该水域进行了渔业资源调查, 并利用稳定同位素技术对鱼类群落的碳($\delta^{13}\text{C}$)、氮($\delta^{15}\text{N}$)值特征及其营养结构进行了分析。研究结果显示, 阳澄湖水域共采集到鱼类 42 种, 隶属于 5 目 10 科 33 属。鱼类的 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$ 和营养级均值分别为 $(-24.85 \pm 1.77)\text{‰}$ 、 $(15.34 \pm 2.19)\text{‰}$ 和 3.06 ± 0.64 。其中, $\delta^{15}\text{N}$ 值与营养级均存在极显著的鱼类食性和季节性差异($P < 0.01$), 而 $\delta^{13}\text{C}$ 值在鱼类食性和季节性上未出现显著差异($P > 0.05$)。阳澄湖鱼类群落的营养结构存在季节差异, 鱼类群落的营养层次(NR)、基础食物来源(CR)、生态位总空间(TA)、群落的整体密度(NND)、聚集均匀程度(SDNND)和核心生态位空间(SEAc)从 2017 年夏季至秋季再到 2018 年春季, 呈逐渐上升的趋势; 表明 2018 年春季食物源多样性高, 营养冗余程度低。本研究初步构建了阳澄湖鱼类连续营养谱, 丰富了对阳澄湖鱼类群落营养结构方面的研究, 以期对湖泊生态管理和渔业可持续发展提供参考。

关键词: 稳定同位素技术; 营养级; Layman 群落指标; 阳澄湖; 大水面; 生态渔业

中图分类号: S931

文献标志码: A

文章编号: 1005-8737-(2021)06-0703-12

水域生态系统中鱼类的捕食行为以及鱼类群落与环境之间的物质循环和能量流动等关系都可以通过食物网来体现^[1], 鱼类群落营养结构是其中的重要组成部分, 而营养级的测定又是厘清营养结构的基础, 能够反映鱼类在食物网中的相对位置以及群落结构的变化, 并且能够强调生态系统内各种生物的功能地位^[2]。目前对于水生食物网和营养结构的研究方法主要包括传统胃(肠)含物分析法和稳定同位素技术。研究表明稳定同位素技术是一种应用于海洋生物食物网营养层次的有效办法^[3], 通过测定少量的样品对生物的营养来源进行准确测定, 能够反映鱼类长期的摄食状况^[4]。国内已有大量的对水域生态系统食物网和营养结构的研究。李云凯等^[5]利用稳定同位素技术探索了东太湖食物网的营养传递途径, 得出

该湖由浮游生物和近岸底层生物两条营养传递途径组成; 王玉玉等^[6]通过对鄱阳湖水生食物网结构的研究, 发现在湖区的不同位置所捕获的同种水生生物的 $\delta^{13}\text{C}$ 值不同, 但用 $\delta^{15}\text{N}$ 值计算发现其所占据的营养位置基本一致; 邓华堂等^[7]利用稳定同位素分析了大宁河下游鱼类营养结构的时空变化特征, 并取得了较好的结果。

阳澄湖是太湖平原上的第三大淡水湖, 从历史上看, 阳澄湖为人类生活用水、水产养殖以及旅游业等活动提供了诸多便利^[8]。然而, 人类活动也给湖泊生态系统带来了一系列的危害, 例如造成水质的变化^[9]和生境的改变^[10]等。为此, 系统地认识湖泊生态系统的结构和功能, 制定有效的维护湖泊生态系统的健康策略尤为重要。到目前为止, 对阳澄湖水域的研究主要围绕水质^[8,11]、浮

收稿日期: 2020-09-14; 修订日期: 2021-03-03.

基金项目: 江苏省水生生物资源重大专项(ZYHB16); 中国水产科学研究院科技创新团队专项经费项目(2020TD61).

作者简介: 叶学瑶(1995-), 女, 硕士研究生, 主要从事渔业资源研究. E-mail: 936750346@qq.com

通信作者: 徐东坡, 研究员, 主要从事渔业资源研究. E-mail: xudp@ffrc.cn

游生物^[12-13]和底栖动物^[14-15]等相关方面开展, 鱼类方面的研究仅陈雯等^[16]对湖区内的鲢(*Hypophthalmichthys molitrix*)、鳙(*Aristichthys nobilis*)控藻效应进行了分析, 而鱼类群落以及基于稳定同位素技术的食物网营养结构研究尚未见报道。因此, 本研究利用稳定同位素技术初步构建了阳澄湖鱼类连续营养谱, 在鱼类群落营养结构方面丰富了对阳澄湖生态系统的研究, 以期为湖泊生态管理和渔业可持续发展提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

阳澄湖(31°21'~31°30' N, 120°39'~120°51' E)位于苏州市区的东北部, 跨苏州、昆山及常熟市。阳澄湖长 10.4 km, 最大宽 9 km, 平均水深 1.43 m, 湖中 2 条纵列沙埂将阳澄湖分为西、中、东湖 3 个部分^[8]。为反映阳澄湖鱼类营养结构的情况, 本研究选择于 2017 年 7 月(夏季)、2017 年 10 月(秋季)、2018 年 4 月(春季)在湖区内进行了 3 次调查采样, 具体站点分布如图 1 所示。

1.2 样品采集与处理

本研究样品分别取自 2017 年夏季(7 月)、2017 年秋季(10 月)和 2018 年春季(4 月), 采样时间为每月下旬, 日落前在采样点放置 3 条多目复合刺网(网目分别为 1.2 cm、2.0 cm、4.0 cm、6.0 cm、8.0 cm、10.0 cm、14.0 cm 混合, 长 125.0 m、高 1.5 m)和 3 条定置串联笼壶(网目为 1.6 cm, 长、宽、高分别为 10.0 m、0.4 m、0.4 m), 次日 6:00 收网, 收集网内所有渔获物, 并冷冻处理带回实验室进行分类, 参照《江苏鱼类志》^[17]鉴定到种, 并进行生物学测定(体长、体重等)。鱼类鉴定后去除背侧鳞片和鱼皮取部分白肌。螺类利用箱式采泥器采集, 带回实验室暂养 24 h 后去除外壳取肌肉部分。为避免样品间的交叉污染, 每次取样前均用去离子水清洗取样工具, 取样后的样品用去离子水冲洗后装入冻存管冷冻保存。所有样品预冷冻后放入冷冻干燥机中-60 ℃冷冻干燥 48 h。干燥后的样品使用研磨仪研磨成粉末状, 存入离心管做好标记, 置于干燥器中(硅胶干燥剂)保存待测。

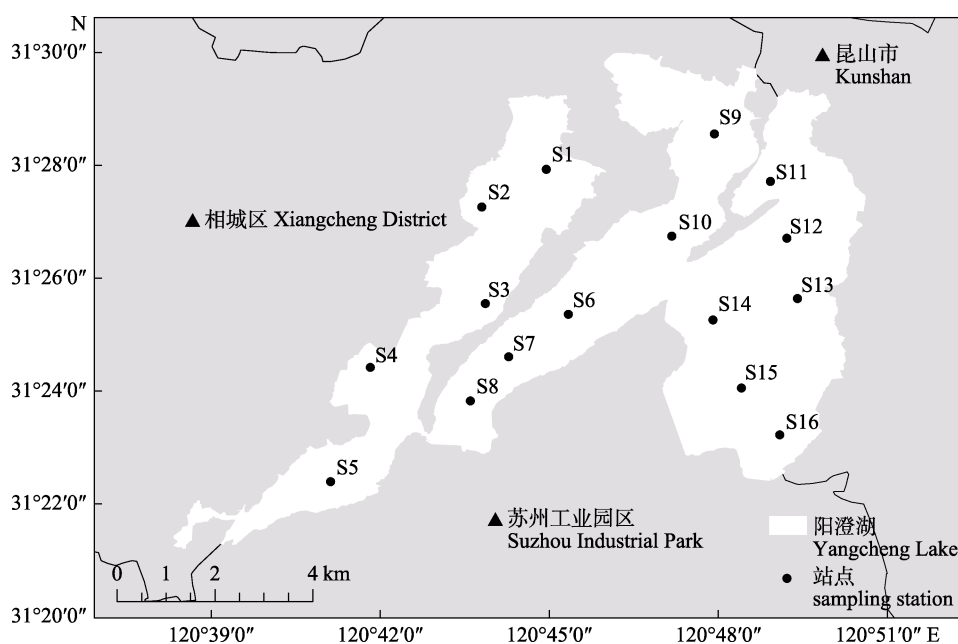


图 1 阳澄湖采样站点示意图

Fig. 1 Sampling stations of Yangcheng Lake

1.3 稳定同位素分析

样品的稳定同位素测定分析在国家海洋局第三海洋研究所进行, 分析采用同位素比率质谱仪

(Delta V advantage)测定。在测定过程中每测定 12 个样品后加测 1 个标准样以保证结果的准确性, 碳稳定同位素测定的标准物质是美洲拟箭石 VPDB

(Vienna Pee Dee Belemnite), 氮稳定同位素分析的标准物质是纯化的大气中的氮。稳定同位素分析结果表示为 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$, 相关计算公式为^[18]:

$$\delta X(\text{‰}) = (R_{\text{sample}} - R_{\text{standard}}) / R_{\text{standard}} \times 1000$$

式中, X 为待测样品的 ^{13}C 或 ^{15}N ; R 为重、轻同位素的比值($^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ 或 $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$); R_{sample} 为待测样品的重、轻同位素比值; R_{standard} 为国际标准物的重、轻同位素比值。

相对于其食物, 消费者对 $\delta^{15}\text{N}$ 具有稳定的富集作用, 根据生物对基准生物氮稳定同位素的相对值计算该生物的营养级(trophic level, TL), 采用 Post^[19]研究证明的食性较为稳定的螺类稳定同位素值作为基准值。因此本研究中的基准物选取铜锈环棱螺(*Bellamya aeruginosa*), 鱼类营养级的计算公式如下^[20]:

$$\text{TL} = (\delta^{15}\text{N}_{\text{consumer}} - \delta^{15}\text{N}_{\text{baseline}}) / \Delta\delta^{15}\text{N} + \lambda$$

式中, $\delta^{15}\text{N}_{\text{consumer}}$ 为待测样品的氮稳定同位素值; $\delta^{15}\text{N}_{\text{baseline}}$ 为基准物的氮稳定同位素比值; $\Delta\delta^{15}\text{N}$ 为相邻营养级的氮富集度, 本研究中依据 Post 等^[21]的结果, 取值 3.4‰; λ 为基准物的营养级, 由于本研究中选取的基准物为初级消费者, 故取 $\lambda=2$ 。

1.4 数据分析

将实验数据用 Microsoft Excel 2019 进行常规统计和计算, 采用 SPSS 25.0 软件对实验数据进行差异显著性分析, 显著性水平为 0.05, 极显著性水平为 0.01。运用 R 语言的 SIBER 包计算群落营养结构指标, 并利用 Origin 2018 软件进行鱼类营养图谱的绘制。

参考了 Layman 等^[22]对营养结构进行量化的 6 个指标: 氮值范围($\delta^{15}\text{N}$ range, NR), 反映消费者营养层次, 由水域中消费者 $\delta^{15}\text{N}$ 富集程度最高的减去富集程度最低的得到; 碳值范围($\delta^{13}\text{C}$ range, CR), 反映食物来源多样性, 由消费者 $\delta^{13}\text{C}$ 富集程度最高的减去富集程度最低的得到; 生态位总面积(total area, TA), 指 $\delta^{13}\text{C}$ - $\delta^{15}\text{N}$ 双坐标图中所有消费者围成的凸多边形面积, 反映食物网中生物对资源的利用情况; 平均离心距离(mean distance to centroid, CD)指各消费者距离中心点(消费者 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$ 平均值)距离的平均值, 反映营养多样性的平均水平; 平均最邻近距离(mean nearest neighbor distance, NND)通过计算 $\delta^{13}\text{C}$ - $\delta^{15}\text{N}$ 双坐标图中每

种消费者和距离其最近的消费者之间距离的平均值得到, 反映物种聚集的整体密度; 平均最邻近距离标准差(standard deviation of nearest neighbor distance, SDNND)通过计算每种消费者和距离其最近的消费者之间距离的标准差得到, 表示营养生态位分布范围水平, 反映物种聚集的均匀程度。鱼类食性参照 Fishbase 鱼类数据库^[23]和相关资料^[17]确定。

2 结果与分析

2.1 阳澄湖鱼类稳定同位素 $\delta^{13}\text{C}$ 值特征

在阳澄湖共采集到鱼类 11911 尾, 测定稳定同位素样品 393 个, 包括 42 种鱼类, 隶属于 5 目 10 科 33 属。按食性分为肉食性[翘嘴鲌(*Culter alburnus*)、鳊(*Siniperca chuatsi*)等, 占 26.19%], 杂食性[棒花鱼(*Abbottina rivularis*)、鲫(*Carassius auratus*)等, 占 57.14%], 植食性[草鱼(*Ctenopharyngodon idellus*)、团头鲂(*Megalobrama amblycephala*)等, 占 11.90%]和滤食性[鲢、鳙, 占 4.76%]。鱼类名录见表 1。

阳澄湖不同食性、不同季节鱼类样品的碳稳定同位素比值见表 1。鱼类稳定同位素 $\delta^{13}\text{C}$ 值范围为 -28.98‰[黄尾鲴(*Xenocypris davidi*)] ~ -20.65‰[飘鱼(*Pseudolaubuca sinensis*)], 均值为 (-24.85±1.77)‰。差异性分析显示, 阳澄湖鱼类 $\delta^{13}\text{C}$ 值无显著的食性和季节差异($P>0.05$)。

2.2 阳澄湖鱼类群落 $\delta^{15}\text{N}$ 值与营养级

本研究选取铜锈环棱螺作为基准物计算了其他鱼类的营养水平(表 2)。如表 2 所示, 阳澄湖鱼类 $\delta^{15}\text{N}$ 值范围为 11.92‰(黄尾鲴)~17.85‰[须鳊虾虎鱼(*Taenioides cirratus*)], 营养级范围为 2.05~3.80。差异性分析显示, $\delta^{15}\text{N}$ 值在不同食性鱼类间存在极显著差异($P<0.01$); 春季与夏、秋两季的鱼类 $\delta^{15}\text{N}$ 值存在显著差异($P<0.05$), 但夏、秋两季的鱼类 $\delta^{15}\text{N}$ 值差异不明显($P>0.05$)。基于阳澄湖复杂的水域生态环境, 水域内鱼类的食物种类多样, 导致 7 种鱼类营养级变化幅度超过 1 个营养级, 其中棒花鱼的营养级变化幅度最大, 达到 1.46 个营养级。

根据营养级的计算结果, 构建阳澄湖不同季节鱼类的连续营养谱(图 2)。其中, 夏季鱼类营养

表 1 阳澄湖鱼类的 $\delta^{13}\text{C}$ 值
Tab. 1 $\delta^{13}\text{C}$ value of fishes in Yangcheng Lake

 $\bar{x} \pm \text{SD}$

食性 feeding habit	种类 species	样本量 n	$\delta^{13}\text{C}$		
			夏季 summer	秋季 autumn	春季 spring
滤食性鱼类 filter-feeding fish	鳙 <i>Aristichthys nobilis</i>	19	-25.35±1.95	-26.19±2.02	-24.12±2.21
	鲢 <i>Hypophthalmichthys molitrix</i>	20	-25.89±1.62	-26.30±1.11	-26.10±0.89
植食性鱼类 herbivorous fish	草鱼 <i>Ctenopharyngodon idellus</i>	1	—	—	-22.60
	团头鲂 <i>Megalobrama amblycephala</i>	2	—	-22.57	-22.85
	鳊 <i>Parabramis pekinensis</i>	11	-24.43±1.88	-24.85±1.65	-23.96±1.82
	大鳍鱮 <i>Acheilognathus macropterus</i>	16	-24.16±1.35	-24.96±0.64	-24.92±1.41
	高体鲃 <i>Rhodeus ocellatus</i>	2	-23.05±2.00		
杂食性鱼类 omnivorous fish	贝氏鲮 <i>Hemiculter bleekeri</i>	9	-25.09±2.53	-24.19±0.72	-27.45±0.83
	鲮 <i>Hemiculter leucisculus</i>	22	-23.71±3.61	-25.39±2.77	-21.77±2.09
	飘鱼 <i>Pseudolaubuca sinensis</i>	1	-20.65	—	—
	似鲮 <i>Toxabramis swinhonis</i>	19	-25.23±1.57	-25.46±0.63	-24.82±0.41
	似鳊 <i>Pseudobrama simoni</i>	21	-26.38±2.00	-25.94±0.71	-24.91±0.56
	细鳞鲴 <i>Xenocypris microlepis</i>	1	-26.10	—	—
	黄尾鲴 <i>Xenocypris davidi</i>	1	—	-28.98	—
	棒花鱼 <i>Abbottina rivularis</i>	15	-24.95±0.54	-22.28	-25.27±0.96
	花鲢 <i>Hemibarbus maculatus</i>	11	-25.62±0.78	-24.42±0.26	-25.39±0.72
	似刺鲃 <i>Paracanthobrama guichenoti</i>	9	-25.48±1.45	-23.24±1.40	-26.97±0.82
	麦穗鱼 <i>Pseudorasbora parva</i>	15	-24.14±1.22	-23.47±1.92	-24.26±1.37
	黑鳍鳈 <i>Sarcocheilichthys nigripinnis</i>	11	-25.99±1.53	-25.06±0.77	-28.61
	蛇鲃 <i>Saurogobio dabryi</i>	6	—	—	-26.05±0.76
	彩鲮 <i>Acheilognathus imberbis</i>	6	-26.10±2.49	—	—
	兴凯鲮 <i>Acheilognathus chankaensis</i>	19	-25.24±1.45	-24.21±0.83	-23.73±0.74
	中华鲃 <i>Rhodeus sinensis</i>	4	-23.17±2.34	—	—
	鲫 <i>Carassius auratus</i>	18	-24.37±1.54	-24.77±0.88	-24.24±1.38
	鲤 <i>Cyprinus carpio</i>	5	-24.61±3.24	-23.04±1.61	-25.72
	泥鳅 <i>Misgurnus anguillicaudatus</i>	1	—	—	-26.23
	间下鱈 <i>Hyporhamphus intermedius</i>	3	-23.57	—	-25.40±0.36
	小黄鲮鱼 <i>Micropercops swinhonis</i>	7	-23.59±0.44	—	-25.82±0.32
	须鳊虎鱼 <i>Taenioides cirratus</i>	5	-26.04±0.46	—	—
	子陵吻虾虎鱼 <i>Rhinogobius giurinus</i>	13	-25.10±2.13	-25.60±0.88	-24.46±0.75
	刺鳅 <i>Mastacembelus aculeatus</i>	3	-23.60±0.44	—	—
肉食性鱼类 carnivorous fish	刀鲚 <i>Coilia nasus</i>	20	-25.74±0.95	-25.92±1.01	-25.17±1.47
	蒙古鲃 <i>Culter mongolicus</i>	5	-24.07±0.26	—	-28.09±0.46
	翘嘴鲃 <i>Culter alburnus</i>	9	-24.45±2.29	-22.73±0.85	-24.06
	达氏鲃 <i>Culter dabryi</i>	14	-24.40±1.56	-24.19±0.72	-25.26±0.59
	红鳍原鲃 <i>Cultrichthys erythropterus</i>	18	-23.84±0.78	-23.86±0.86	-24.03±0.96
	光泽黄颡鱼 <i>Pelteobagrus nitidus</i>	3	—	—	-23.95±0.77
	黄颡鱼 <i>Pelteobagrus fulvidraco</i>	5	-24.09±0.91	—	—
	长须黄颡鱼 <i>Pelteobagrus eupogon</i>	18	-24.06±3.02	-23.21±1.17	-24.79±0.42
	鳊 <i>Siniperca chuatsi</i>	3	-22.75±1.35	-23.77	—
	沙塘鳢 <i>Odontobutis obscurus</i>	1	—	—	-24.73
	乌鳢 <i>Channa argus</i>	1	—	—	-24.57

注: “—”表示无相关数据.

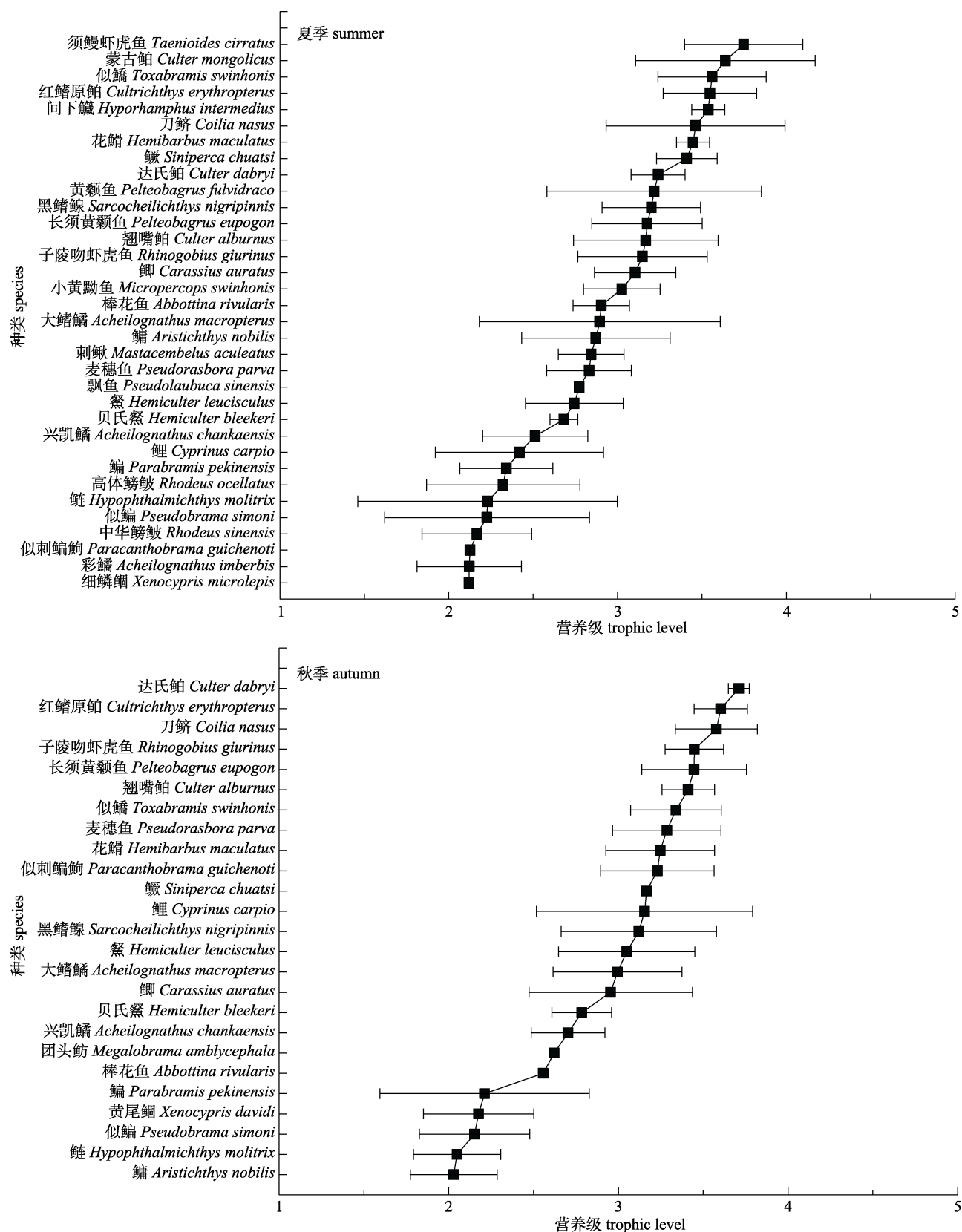
Note: “—” indicates no data.

表 2 阳澄湖鱼类的 $\delta^{15}\text{N}$ 值和营养级
Tab. 2 $\delta^{15}\text{N}$ value and trophic level of fishes in Yangcheng Lake

$n=393$; $\bar{x} \pm \text{SD}$

种类 species	$\delta^{15}\text{N}$			营养级 trophic level, TL		
	夏季 summer	秋季 autumn	春季 spring	夏季 summer	秋季 autumn	春季 spring
刀鲚 <i>Coilia nasus</i>	16.34±1.94	16.68±0.82	18.13±1.59	3.30±0.57	3.58±0.24	3.84±0.47
草鱼 <i>Ctenopharyngodon idellus</i>	—	—	11.99	—	—	2.03
蒙古鲌 <i>Culter mongolicus</i>	17.48±1.81	—	17.52±0.07	3.64±0.53	—	3.66±0.02
翘嘴鲌 <i>Culter alburnus</i>	15.88±1.46	16.12±0.53	16.85	3.17±0.43	3.41±0.16	3.46
达氏鲌 <i>Culter dabryi</i>	16.13±0.54	17.13±0.21	18.53±0.42	3.24±0.16	3.71±0.06	3.96±0.12
红鳍原鲌 <i>Cultrichthys erythropterus</i>	17.17±0.94	16.77±0.53	18.63±1.00	3.55±0.28	3.60±0.16	3.98±0.30
贝氏鲌 <i>Hemiculter bleekeri</i>	14.23±0.28	13.99±0.60	16.83±0.73	2.68±0.08	2.78±0.18	3.46±0.21
鲌 <i>Hemiculter leucisculus</i>	13.87±1.27	14.89±1.36	16.59±1.10	2.58±0.37	3.05±0.40	3.38±0.32
团头鲂 <i>Megalobrama amblycephala</i>	—	13.43	12.08	—	2.62	2.06
鳊 <i>Parabramis pekinensis</i>	13.07±0.94	12.04±2.10	15.01±1.42	2.34±0.28	2.21±0.62	2.92±0.42
鲢 <i>Pseudolaubuca sinensis</i>	14.54	—	—	2.77	—	—
似鲮 <i>Toxabramis swinhonis</i>	15.50±1.29	15.87±0.91	16.56±0.96	3.06±0.38	3.34±0.27	3.38±0.28
似鳊 <i>Pseudobrama simoni</i>	12.68±2.06	11.84±1.11	15.82±2.43	2.23±0.61	2.15±0.33	3.16±0.71
细鳞鲴 <i>Xenocypris microlepis</i>	12.32	—	—	2.12	—	—
黄尾鲴 <i>Xenocypris davidi</i>	—	11.92	—	—	2.18	—
鳙 <i>Aristichthys nobilis</i>	14.87±1.50	11.42±0.87	12.15±0.92	2.87±0.44	2.03±0.26	2.08±0.27
鲢 <i>Hypophthalmichthys molitrix</i>	12.69±2.61	11.49±0.87	12.43±1.31	2.23±0.77	2.05±0.26	2.16±0.39
棒花鱼 <i>Abbottina rivularis</i>	14.98±0.57	13.21	16.79±3.67	2.90±0.17	2.56	3.44±1.08
花鲢 <i>Hemibarbus maculatus</i>	16.83±0.33	15.56±1.09	17.30±2.31	3.45±0.10	3.25±0.32	3.59±0.68
似刺鲃 <i>Paracanthobrama guichenoti</i>	12.34±0.01	15.50±1.14	16.84±1.76	2.13±0.004	3.23±0.33	3.46±0.52
麦穗鱼 <i>Pseudorasbora parva</i>	14.74±0.85	15.69±1.09	17.51±0.49	2.83±0.25	3.29±0.32	3.66±0.14
黑鳍鳉 <i>Sarcocheilichthys nigripinnis</i>	15.99±0.99	15.13±1.56	16.07	3.20±0.29	3.12±0.46	3.23
蛇鲃 <i>Saurogobio dabryi</i>	—	—	17.47±1.01	—	—	3.64±0.30
彩鲮 <i>Acheilognathus imberbis</i>	12.32±1.05	—	—	2.12±0.31	—	—
大鳍鲮 <i>Acheilognathus macropterus</i>	14.95±2.43	14.70±1.29	15.12±1.23	2.90±0.71	2.99±0.38	2.95±0.36
兴凯鲮 <i>Acheilognathus chankaensis</i>	13.65±1.06	13.71±0.74	14.58±2.18	2.51±0.31	2.70±0.22	2.80±0.64
中华鲮 <i>Rhodeus sinensis</i>	12.23±1.27	—	—	2.17±0.32	—	—
高体鲮 <i>Rhodeus ocellatus</i>	13.01±1.55	—	—	2.32±0.45	—	—
鲫 <i>Carassius auratus</i>	15.67±0.82	14.56±1.64	16.95±1.37	3.10±0.24	2.95±0.48	3.49±0.40
鲤 <i>Cyprinus carpio</i>	13.34±1.69	15.24±2.17	16.47	2.42±0.50	3.15±0.64	3.35
泥鳅 <i>Misgurnus anguillicaudatus</i>	—	—	16.38	—	—	3.32
光泽黄颡鱼 <i>Pelteobagrus nitidus</i>	—	—	17.75±0.36	—	—	3.73±0.11
黄颡鱼 <i>Pelteobagrus fulvidraco</i>	16.05±2.16	—	—	3.22±0.64	—	—
长须黄颡鱼 <i>Pelteobagrus eupogon</i>	15.91±1.11	16.24±1.05	17.44±0.66	3.18±0.33	3.45±0.31	3.64±0.19
间下鱊 <i>Hyporhamphus intermedius</i>	17.14	—	17.20±0.25	3.54	—	3.56±0.07
鳊 <i>Siniperca chuatsi</i>	16.71±0.61	15.28	—	3.41±0.18	3.12	—
小黄鲮 <i>Micropercops swinhonis</i>	15.40±0.77	—	16.43±0.32	3.03±0.23	—	3.34±0.09
沙塘鳢 <i>Odontobutis obscurus</i>	—	—	17.51	—	—	3.66
须鳊 <i>Taenioides cirratus</i>	17.85±1.19	—	—	3.75±0.35	—	—
子陵吻虾虎鱼 <i>Rhinogobius giurinus</i>	15.81±1.30	16.24±0.59	16.87±0.25	3.15±0.38	3.45±0.17	3.47±0.07
乌鳢 <i>Channa argus</i>	—	—	16.88	—	—	3.47
刺鳅 <i>Mastacembelus aculeatus</i>	14.78±0.66	—	—	2.84±0.20	—	—

注: “—”表示无相关数据。
Note: “—” indicates no data.



(待续 to be continued)

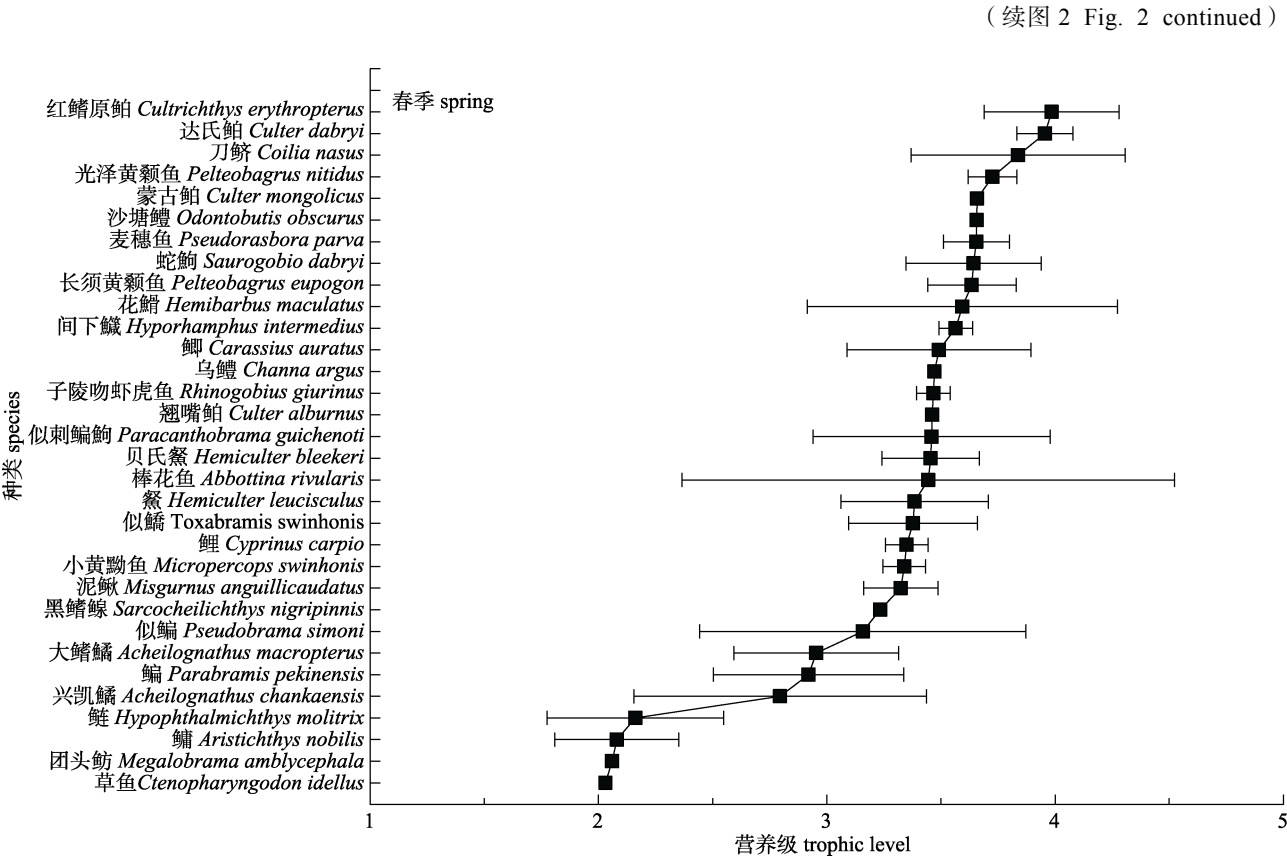


图 2 阳澄湖夏季、秋季和春季鱼类的营养级图谱
Fig. 2 Continuous trophic spectrum of fishes in summer, autumn and spring in Yangcheng Lake

级范围为 2.12~3.75, 营养级最低的鱼类为细鳞鲮 (*Xenocypris microlepis*), 最高为须鳊虾虎鱼; 秋季鱼类营养级范围为 2.56~3.71, 营养级最低和最高分别为鳊和达氏鲃(*Culter dabryi*); 春季鱼类营养级范围为 2.03~3.98, 营养级最低和最高的鱼类分别为草鱼和红鳍原鲃(*Cultrichthys erythropterus*)。

2.3 鱼类群落营养结构

利用 SIBER 对阳澄湖鱼类稳定同位素进行分析, 如图 3 所示。夏季营养结构图中, 最低处的种类为细鳞鲮, 位于多边形顶点的种类分别为须鳊虾虎鱼、蒙古鲃(*Culter mongolicus*)、鳊、鳊鱼、中华鲮 (*Rhodeus sinensis*)、细鳞鲮、似鳊 (*Bellamyia aeruginosa*); 秋季营养结构图中, 最低处的种类为鳊, 位于多边形顶点的种类分别为刀鲚(*Coilia nasus*)、达氏鲃、翘嘴鲃、棒花鱼、鳊 (*Parabramis pekinensis*)、鳊、黄尾鲮; 春季营养结构图中, 最低处的种类为草鱼, 位于多边形顶点的种类分别为红鳍原鲃、达氏鲃、蒙古鲃、鳊

(*Hemiculter leucisculus*)、黑鳍鲮(*Sarcocheilichthys nigripinnis*)、草鱼、鳊、鲢。

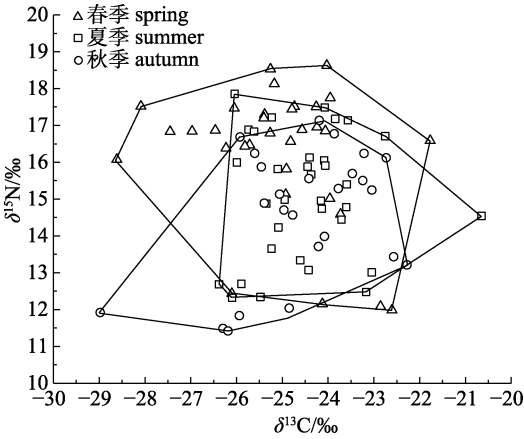


图 3 不同季节鱼类群落营养结构
Fig. 3 The trophic structure of fish communities in different seasons

根据营养结构框架图计算的稳定同位素指标结果显示(表 3)。在阳澄湖, 2018 年春季的鱼类营

养层次(NR)、基础食物来源(CR)、鱼类群落生态位总空间(TA)、鱼类群落的整体密度(NND)、鱼类聚集均匀程度(SDNND)和核心生态位空间(SEAc)均为 3 个季节中的最大值, 并且从 2017 年夏季至秋季再到 2018 年春季, NR, CR, TA, NND, SDNND 和 SEAc 值呈逐渐上升的趋势。秋季的营养多样性(CD)为 3 个季节的最大值; 所有指标的最小值均出现在 2017 年夏季。

表 3 不同季节鱼类稳定同位素生物群落指标
Tab. 3 The Layman's community-wide metrics in different seasons

季节 season	NR	CR	TA	CD	NND	SDNND	SEAc
夏季 summer	5.54	5.73	21.53	1.83	0.47	0.49	6.61
秋季 autumn	5.72	6.70	23.20	1.96	0.51	0.50	7.83
春季 spring	6.64	6.84	32.07	1.94	0.56	0.52	8.37

注: NR 表示氮值范围; CR 表示碳值范围; TA 表示生态位总面积; CD 表示平均离心距离; NND 表示最邻近距离平均值; SDNND 表示最邻近距离标准差; SEAc 表示贝叶斯标准椭圆校正面积。

Note: NR indicates $\delta^{15}\text{N}$ range; CR indicates $\delta^{13}\text{C}$ range; TA indicates total area; CD indicates mean distance to centroid; NND indicates mean nearest neighbor distance; SDNND indicates standard deviation of nearest neighbor distance; SEAc indicates Bayesian standard ellipse corrected area.

3 讨论

3.1 阳澄湖鱼类 $\delta^{13}\text{C}$ 值特征

鱼类 $\delta^{13}\text{C}$ 值的差异主要由食物来源的不同造成, 其范围反映食物来源多样性^[27]。本研究中不同食性鱼类之间的 $\delta^{13}\text{C}$ 值差异不显著($P>0.05$), 表明它们的食物来源可能较为接近^[28-29]。水生植物的 $\delta^{13}\text{C}$ 值通常较高^[30], 而植食性鱼类鳊等主要以水生维管束植物为食^[31], 因此, 推测本研究中植食性鱼类的 $\delta^{13}\text{C}$ 值较肉食性、杂食性和滤食性鱼类的 $\delta^{13}\text{C}$ 值高可能与此有关。阳澄湖不同季节鱼类 $\delta^{13}\text{C}$ 值也没有显著的差异($P>0.05$), 但春季 $\delta^{13}\text{C}$ 值跨度稍大于夏、秋两季, 与沈忱等^[28]对于闽江口鱼类 $\delta^{13}\text{C}$ 值季节变化研究结果相似, 推测可能是由于春季饵料生物相对缺乏, 对鱼类的食物来源和食物组成造成了一定的影响^[32], 而夏季

由于浮游生物等饵料生物的生长和繁殖^[13,16], 鱼类开始具有偏好性地摄食; 同时, 春季为多数鱼类的繁殖期, 在产卵前会大量摄食, 鱼类的广食性原则^[33]会使其摄食的种类更多, 因此这可能是造成春季鱼类 $\delta^{13}\text{C}$ 值跨度较大的原因。

阳澄湖鱼类的 $\delta^{13}\text{C}$ 值范围 ($-28.98\text{‰}\sim -20.65\text{‰}$)接近于淀山湖主要鱼类的 $\delta^{13}\text{C}$ 值范围 ($-30.71\text{‰}\sim -21.34\text{‰}$)^[25], 与太湖贡湖湾食物网 $\delta^{13}\text{C}$ 值范围相比较宽 ($-28.1\text{‰}\sim -23.1\text{‰}$)^[26], 而与东洞庭湖鱼类的 $\delta^{13}\text{C}$ 值范围相比较窄 ($-29.6\text{‰}\sim -16.9\text{‰}$)^[24](表 4)。因此, 阳澄湖食物网基础碳源来源比太湖贡湖湾广泛^[34]。本研究 $\delta^{13}\text{C}$ 值并未有显著的季节变化, 可以推测阳澄湖鱼类不同季节的基础碳源来源差异较小。但目前阳澄湖基础碳源尚不清楚, 有待进一步研究。

表 4 不同湖泊鱼类 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$ 值和营养级(TL)比较
Tab. 4 Comparison of $\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{15}\text{N}$ values and trophic levels (TL) of fishes in different lakes

指标 parameter	洞庭湖 ^[24] Dongting Lake	淀山湖 ^[25] Dianshan Lake	太湖 ^[26] Taihu Lake	阳澄湖 Yangcheng Lake
$\delta^{13}\text{C}$	$-29.6\text{‰}\sim -16.9\text{‰}$	$-30.71\text{‰}\sim -21.34\text{‰}$	$-28.1\text{‰}\sim -23.1\text{‰}$	$-28.98\text{‰}\sim -20.65\text{‰}$
$\delta^{15}\text{N}$	$4.3\text{‰}\sim 16.2\text{‰}$	$6.70\text{‰}\sim 21.23\text{‰}$	$14.4\text{‰}\sim 19.0\text{‰}$	$11.92\text{‰}\sim 17.85\text{‰}$
TL		1.06~4.50	3.3~4.4	2.05~3.80

3.2 阳澄湖鱼类群落营养级特征

阳澄湖鱼类营养级集中在 2~4 之间, 与同样采用稳定同位素技术分析的淀山湖^[25]和太湖贡湖湾^[26]鱼类营养级相比存在一定的差异。选择不

同湖泊同种鱼类进行比较分析, 与淀山湖可比较的 24 种鱼类中, 20 种鱼类的营养级在本研究中的结果略低于淀山湖; 与太湖贡湖湾可比较的 9 种鱼类中, 本研究中的鱼类营养级均较低。分析产

生这种差异的原因可能是由于淀山湖鱼类营养级计算采用的基准物并非是在淀山湖水域采集到的, 引用其他水域基准物的数值可能会使营养级计算结果存在一定的误差; 同时, 本研究与贡湖湾中相同鱼类的 $\delta^{15}\text{N}$ 值差异较小, 贡湖湾营养级计算中基准物采用的是铜锈环棱螺与 4 种蚌类的均值, 与本研究相比基准值较低, 这可能是本研究中鱼类营养级低于贡湖湾的原因之一。研究表明高营养级的鱼类可以反映渔业资源的开发程度, 中低水平营养级的鱼类越多, 证明该水域开发过度^[2]。本研究中、低营养层次的鱼类所占比例较大, 因此, 可初步判定阳澄湖鱼类资源处于过度开发状态。

不同食性的鱼类在食物网中的地位不同, 滤食性和植食性的鱼类通常占据食物网的底端, 而肉食性鱼类则占据着较高的营养层次^[35]。本研究中营养级最高的肉食性鱼类较营养级最低的植食性鱼类增加了 1.10 个营养级, 杂食性和滤食性鱼类营养级介于两者之间, 这与以往对于鱼类营养级的研究结果类似^[32,36]。似鳊、棒花鱼、鲤等鱼类的营养级跨度较大, 说明了这些鱼类的食性范围较广, 同时也反映了这些鱼类的营养生态位跨度较大^[5]。研究发现鱼类营养级变动可能与其生长过程中的食性转变有关, 不同体长的同种鱼类可能在食物网中处于不同的营养级^[37], 随着体长的增加营养级也有相应增大的趋势^[38]。在本研究中细鳞鲃、黄尾鲃等鱼类幼体出现了营养级较低的情况, 推测其营养级可能与个体生长发育所处阶段有关。

3.3 阳澄湖鱼类群落营养结构特征

通过 $\delta^{13}\text{C}$ - $\delta^{15}\text{N}$ 双坐标图(图 3)分析可以看出, 鱼类群落从 2017 年夏季至秋季再到次年春季营养层次逐渐上升(NR 值逐渐增大), 营养多样性水平升高。鱼类的食物源多样性水平与水域内的饵料生物以及鱼类摄食生物的种类组成有关^[39]。阳澄湖夏季浮游植物生物量最高^[13], 鱼类摄食食物的特化性增强, 相应的食物源多样性降低, 造成 CR 值最低。生态位空间 TA 值在春季最大, 夏季最小, 说明夏季群落生态位空间最小, 鱼类群落竞争较激烈。为了减少 TA 值的误差^[40], 使用校

正后的贝叶斯标准椭圆面积(SEAc)计算生态位空间, 计算结果与 TA 值相似, 说明阳澄湖鱼类群落对生存空间的利用率存在季节差异。当群落中具有相似营养特征的物种占多数时, 群落的营养冗余程度会更高, 表现为 NND 值较低^[41]。鱼类群落中存在营养冗余, 生态系统有抵抗外界干扰的能力^[22], 3 个季节的 NND 和 SDNND 值均呈缓慢上升趋势, 说明阳澄湖鱼类群落的营养级位置无显著季节变化, 但其营养冗余程度正逐渐降低, 表明该生态系统抵抗外界干扰的能力在减弱, 稳定性降低。

在 $\delta^{13}\text{C}$ - $\delta^{15}\text{N}$ 双坐标图中, 位于多边形边缘顶点的鱼类对维系整个食物网结构的稳定具有非常重要的作用。本研究中处于边缘顶点位置的鱼类主要有高级捕食者肉食性鱼类(翘嘴鲌、达氏鲌、刀鲚等), 次级消费者杂食性鱼类(棒花鱼、鲢、鳙等)和低级植食性鱼类(草鱼、鳊等), 这基本与海州湾海洋牧场、东海^[39]、闽江口^[42]鱼类群落营养结构的研究相一致, 这些鱼类在食物网中的变化会影响 NR、CR 和 TA 等数值, 进而引起整个群落营养结构的变化。因此, 在对阳澄湖水域渔业资源研究与利用时, 应更多地关注这些鱼类的变化, 以确保各类渔业资源能够得到充分合理的开发与利用。

参考文献:

- [1] Xu D L, Lin N F, Zou C X, et al. The spatial differences analysis of ecological stoichiometric characteristics of Lake Taihu food web[J]. China Environmental Science, 2017, 37(12): 4681-4689. [徐德琳, 林乃峰, 邹长新, 等. 太湖食物网生态化学计量学特征空间差异[J]. 中国环境科学, 2017, 37(12): 4681-4689.]
- [2] Ji W W, Li S F, Chen X Z. Application of fish trophic level in marine ecosystem[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2010, 17(4): 878-887. [纪炜炜, 李圣法, 陈雪忠. 鱼类营养级在海洋生态系统研究中的应用[J]. 中国水产科学, 2010, 17(4): 878-887.]
- [3] Cai D L, Meng F, Han Y B, et al. Studies on $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ ratios as a tracer for food web in a marine ecosystem—the trophic relations in pelagic food webs in Laoshan Bay[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 1999, 30(6): 671-678. [蔡德陵, 孟凡, 韩贻兵, 等. $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ 比值作为海洋生态系统食物网示踪剂的研究——崂山湾水体生物食物网的营养关系[J]. 海洋

- 与湖沼, 1999, 30(6): 671-678.]
- [4] Hill A M, Sinars D M, Lodge D M. Invasion of an occupied niche by the crayfish *Orconectes rusticus*: Potential importance of growth and mortality[J]. *Oecologia*, 1993, 94(3): 303-306.
- [5] Li Y K, Gong Y. Food web structure of the East Lake Taihu by analysis of stable carbon and nitrogen isotopes[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2014, 33(6): 1534-1538. [李云凯, 贡艺. 基于碳、氮稳定同位素技术的东太湖水生食物网结构[J]. *生态学杂志*, 2014, 33(6): 1534-1538.]
- [6] Wang Y Y, Yu X B, Zhang L, et al. Food web structure of Poyang Lake during the dry season by stable carbon and nitrogen isotopes analysis[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(3): 1181-1188. [王玉玉, 于秀波, 张亮, 等. 应用碳、氮稳定同位素研究鄱阳湖枯水末期水生食物网结构[J]. *生态学报*, 2009, 29(3): 1181-1188.]
- [7] Deng H T, Duan X B, Liu S P, et al. Temporal and spatial variations in the trophic structure of key species in downstream of the Daning River[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(23): 7110-7118. [邓华堂, 段辛斌, 刘绍平, 等. 大宁河下游主要鱼类营养结构的时空变化[J]. *生态学报*, 2014, 34(23): 7110-7118.]
- [8] Gui Z F, Xue B, Yao S C, et al. Water quality status and influencing factors of Yangcheng Lake, China[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2011, 31(12): 1487-1492. [桂智凡, 薛滨, 姚书春, 等. 阳澄湖水质现状及原因探讨[J]. *地理科学*, 2011, 31(12): 1487-1492.]
- [9] Song X H, Bing X W, Sun L P, et al. The spatial and temporal changes of nutrients of net-pen aquaculture area in Yangcheng Lake and its water quality evaluation[J]. *Journal of Hydroecology*, 2010, 31(6): 23-29. [宋学宏, 郇旭文, 孙丽萍, 等. 阳澄湖网围养殖区水体营养盐的时空变化与水质评价[J]. *水生态学杂志*, 2010, 31(6): 23-29.]
- [10] Ji L Y, Yin D Y, Gong P. Temporal-spatial study on enclosure culture area in Yangcheng Lake with long-term landsat time series[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2019, 23(4): 717-729. [计璐艳, 尹丹艳, 宫鹏. Landsat 长时间序列的阳澄湖湖面围网时空变化[J]. *遥感学报*, 2019, 23(4): 717-729.]
- [11] Liang C M, Li X, Ran X. A spatiotemporal eutrophication process and the changing trends in Yangcheng Lake[J]. *Journal of Jinan University (Natural Science & Medicine Edition)*, 2015, 36(6): 443-447. [梁长冀, 李新, 冉霞. 基于时空分布的阳澄湖营养化进程及其趋势[J]. *暨南大学学报(自然科学与医学版)*, 2015, 36(6): 443-447.]
- [12] Yuan L, Wu H X, Peng Z R, et al. The differences of crustacean zooplankton community structure between inside and outside of the net pen in Yangcheng Lake[J]. *Journal of Shanghai Ocean University*, 2013, 22(4): 586-592. [袁林, 吴惠仙, 彭自然, 等. 阳澄湖围网内外浮游甲壳动物群落结构比较[J]. *上海海洋大学学报*, 2013, 22(4): 586-592.]
- [13] Ding N, Zhou Y F, Song J T, et al. Community characteristics of phytoplankton in Yangcheng Lake and relationships with water environmental factors[J]. *Journal of Shanghai Ocean University*, 2015, 24(5): 702-711. [丁娜, 周彦锋, 宋江腾, 等. 阳澄湖浮游植物群落结构特征及其与水环境因子的关系[J]. *上海海洋大学学报*, 2015, 24(5): 702-711.]
- [14] Sun Y J, Wang W, Liu Q G, et al. Spatial distribution of snail (gastropod) community in Yangcheng Lake, Jiangsu Province, China[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2011, 20(6): 711-716. [孙月娟, 王武, 刘其根, 等. 江苏阳澄湖螺类群落的空间分布格局[J]. *长江流域资源与环境*, 2011, 20(6): 711-716.]
- [15] Liu C, Liu L, Zhang Y, et al. Community structure and spatial distribution of macrozoobenthos in Yangcheng Lake, China[J]. *Water Resources Protection*, 2017, 33(2): 79-87. [刘唱, 刘凌, 张又, 等. 阳澄湖大型底栖动物群落结构和空间分布特征[J]. *水资源保护*, 2017, 33(2): 79-87.]
- [16] Chen W, Zhang J B, Cai C F, et al. Comparative study on algal control by silver carp and bighead carp in three regions of Yangcheng Lake[J]. *Journal of Hydroecology*, 2020, 41(4): 73-80. [陈雯, 张俊彪, 蔡春芳, 等. 阳澄湖 3 个湖区鲢鳙控藻效应的比较研究[J]. *水生态学杂志*, 2020, 41(4): 73-80.]
- [17] Ni Y, Wu H L. Fishes of Jiangsu Province[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2006. [倪勇, 伍汉霖. 江苏鱼类志[M]. 北京: 中国农业出版社, 2006.]
- [18] Mariotti A, Germon J C, Hubert P, et al. Experimental determination of nitrogen kinetic isotope fractionation: Some principles; illustration for the denitrification and nitrification processes[J]. *Plant and Soil*, 1981, 62(3): 413-430.
- [19] Post D M. Using stable isotopes to estimate trophic position: Models, methods, and assumptions[J]. *Ecology*, 2002, 83(3): 703-718.
- [20] Vander Zanden M J, Cabana G, Rasmussen J B. Comparing trophic position of freshwater fish calculated using stable nitrogen isotope ratios ($\delta^{15}\text{N}$) and literature dietary data[J]. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 1997, 54(5): 1142-1158.
- [21] Post D M, Pace M L, Hairston N G. Ecosystem size determines food-chain length in lakes[J]. *Nature*, 2000, 405(6790): 1047-1049.
- [22] 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.
- [23] Froese R, Pauly D. FishBase[OL]. <http://www.fishbase.org>.

- [24] Zhang H, Wu G G, Zhang H, et al. Seasonal variations of stable isotopes in fish fauna from East Lake Dongting[J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2013, 37(4): 796-798. [张欢, 吴功果, 张欢, 等. 东洞庭湖鱼类稳定同位素的季节变化[J]. *水生生物学报*, 2013, 37(4): 796-798.]
- [25] Wang K. Temporal and spatial distribution of resources and trophic levels of main species Dianshan Lake[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2017: 1-82. [王坤. 淀山湖主要种类的营养级及资源量的时空分布[D]. 上海: 上海海洋大学, 2017: 1-82.]
- [26] Wen Z R, Xiong Y, Xu J, et al. The studies on the structures of the food web and the trophic relationships in the Gonghu Bay of the Taihu Lake[J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2016, 40(1): 131-138. [温周瑞, 熊鹰, 徐军, 等. 太湖贡湖湾食物网特征研究[J]. *水生生物学报*, 2016, 40(1): 131-138.]
- [27] Song Z C, Zeng L X, He T R, et al. Stable carbon and nitrogen isotope characteristics and structure of the food chain in Lake Caohai[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2019, 38(3): 689-695. [宋正城, 曾玲霞, 何天容, 等. 草海湿地食物链稳定碳氮同位素特征与食物链结构[J]. *生态学杂志*, 2019, 38(3): 689-695.]
- [28] Shen C, Li J, Kang B. Trophic structure of fish community in the Minjiang River Estuary[J]. *Journal of Jimei University (Natural Science)*, 2020, 25(1): 8-15. [沈忱, 李军, 康斌. 闽江口鱼类群落营养结构的探究[J]. *集美大学学报(自然科学版)*, 2020, 25(1): 8-15.]
- [29] Li B, Wang Z J, Xu D D, et al. Characterizing the trophic structure of a small reservoir in southeast of Sichuan Province using stable carbon and nitrogen isotope analysis[J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2017, 41(6): 1345-1353. [李斌, 王志坚, 徐丹丹, 等. 川东南小型水库营养结构特征的稳定 C、N 同位素分析[J]. *水生生物学报*, 2017, 41(6): 1345-1353.]
- [30] Liang H. Study on geographical distribution characteristics of carbon and nitrogen stable isotopes and elemental of lake primary producers and zooplankton in Eastern Yunnan[D]. Kunming: Yunnan Normal University, 2019: 1-60. [梁红. 滇东湖泊水生植物和浮游生物碳、氮稳定同位素与元素的地理分布特征研究[D]. 昆明: 云南师范大学, 2019: 1-60.]
- [31] Yang H, Zhu F Y, Gao L, et al. Feeding habits of *Parabramis pekinensis* (white bream) in the Yichang-Jiayu reach of the middle Yangtze River[J]. *Journal of Hydroecology*, 2019, 40(6): 86-91. [杨浩, 朱峰跃, 高雷, 等. 长江中游宜昌至嘉鱼江段鳊食性研究[J]. *水生态学杂志*, 2019, 40(6): 86-91.]
- [32] Li Z Y, Zuo T, Dai F Q, et al. Trophic level analysis of organisms from Changjiang estuary and adjacent waters of southern Yellow Sea in spring with stable isotope technology[J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2010, 17(1): 103-109. [李忠义, 左涛, 戴芳群, 等. 运用稳定同位素技术研究长江口及南黄海海域春季拖网渔获物的营养级[J]. *中国水产科学*, 2010, 17(1): 103-109.]
- [33] Madurell T, Fanelli E, Cartes J E. Isotopic composition of carbon and nitrogen of suprabenthic fauna in the NW Balearic Islands (western Mediterranean)[J]. *Journal of Marine Systems*, 2008, 71(3-4): 336-345.
- [34] Kong Y F, Wu Z X, Yan Y R, et al. Trophic structure of pelagic fishery organism assemblage in the central and western South China Sea in spring revealed by carbon and nitrogen stable isotope analysis[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2020, 31(10): 3559-3567. [孔业富, 吴忠鑫, 颜云榕, 等. 基于碳氮稳定同位素的南海中西部海域春季中上层渔业生物群落营养结构[J]. *应用生态学报*, 2020, 31(10): 3559-3567.]
- [35] Wei H J, Zhu X M, Ji Y N, et al. Study on the food web structure and their trophic levels of marine ranching area in Xiangshan Harbor[J]. *Journal of Applied Oceanography*, 2013, 32(2): 250-257. [魏虎进, 朱小明, 纪雅宁, 等. 基于稳定同位素技术的象山港海洋牧场区食物网基础与营养级的研究[J]. *应用海洋学学报*, 2013, 32(2): 250-257.]
- [36] Xie B, Li Y K, Zhang H, et al. Food web foundation and seasonal variation of trophic structure based on the stable isotopic technique in the marine ranching of Haizhou Bay, China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2017, 28(7): 2292-2298. [谢斌, 李云凯, 张虎, 等. 基于稳定同位素技术的海州湾海洋牧场食物网基础及营养结构的季节性变化[J]. *应用生态学报*, 2017, 28(7): 2292-2298.]
- [37] Gao C X, Dai X J, Tian S Q, et al. Trophic structure of major fishery organisms in the offshore waters of southern Zhejiang: Insights from stable isotope analysis[J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2020, 27(4): 438-453. [高春霞, 戴小杰, 田思泉, 等. 基于稳定同位素技术的浙江南部近海主要渔业生物营养级[J]. *中国水产科学*, 2020, 27(4): 438-453.]
- [38] Yan G S, Zhang T, Zhao F, et al. A study on trophic level of the major fishery species from the Yangtze Estuary based on stable isotope technology[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2016, 35(11): 3131-3136. [闫光松, 张涛, 赵峰, 等. 基于稳定同位素技术对长江口主要渔业生物营养级的研究[J]. *生态学杂志*, 2016, 35(11): 3131-3136.]
- [39] Ji W W, Li S F, Chen X Z, et al. Variation in trophic structure of nekton organisms from the northern East China Sea and adjacent waters based on stable isotope values[J]. *Marine Fisheries*, 2015, 37(6): 494-500. [纪炜炜, 李圣法, 陈

- 雪忠, 等. 基于稳定同位素方法的东东北部及其邻近水域主要游泳动物营养结构变化[J]. 海洋渔业, 2015, 37(6): 494-500.]
- [40] De Smet B, Fournier J, De Troch M, et al. Integrating ecosystem engineering and food web ecology: Testing the effect of biogenic reefs on the food web of a soft-bottom intertidal area[J]. PLoS One, 2015, (10): e0140857.
- [41] Zhu W T, Qin C X, Ma H M, et al. Stable isotope analysis of simple food web in coral reef ecosystem of Daya Bay[J]. Journal of Fisheries of China, 2020, 44(7): 1112-1123. [朱文涛, 秦传新, 马鸿梅, 等. 大亚湾珊瑚礁生态系统简化食物网的稳定同位素[J]. 水产学报, 2020, 44(7): 1112-1123.]
- [42] Shi Y, He X B, Li J, et al. Seasonal variation in trophic structure of fish community in Minjiang Estuary based on stable isotope technique[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2018, 29(10): 3457-3463. [石焱, 何雄波, 李军, 等. 基于稳定同位素方法的闽江口常见鱼类群落营养结构的季节性变化[J]. 应用生态学报, 2018, 29(10): 3457-3463.]

Analysis of the trophic structure of fish populations in Yangcheng Lake based on stable isotope technology

YE Xueyao^{1,2}, REN Long¹, KUANG Zhen¹, WANG Yuan¹, XU Dongpo^{1,2}

1. Scientific Observing and Experimental Station of Fishery Resources and Environment in the Lower Reaches of the Changjiang River, Ministry of Agriculture and Rural Affairs; Freshwater Fisheries Research Center, Chinese Academy of Fishery Sciences, Wuxi 214081, China;
2. National Demonstration Center for Experimental Fisheries Science Education, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China

Abstract: To investigate the trophic structure characteristics of fish communities in Yangcheng Lake, resource surveys were conducted in summer (July), autumn (October) 2017, and spring (April) 2018, and the carbon ($\delta^{13}\text{C}$) and nitrogen ($\delta^{15}\text{N}$) values of fish communities and their trophic structure were analyzed using stable isotope technology. The results of the study showed that 42 species of fishes, belonging to 5 orders, 10 families, and 33 genera were collected from the lake. The mean values of $\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{15}\text{N}$ and trophic level of Yangcheng Lake fishes were $(-24.85 \pm 1.77)\text{‰}$, $(15.34 \pm 2.19)\text{‰}$, and 3.06 ± 0.64 , respectively, among which $\delta^{15}\text{N}$ and trophic level showed significant differences ($P < 0.01$) in fish feeding and seasonality, whereas the value of $\delta^{13}\text{C}$ did not show significant differences ($P > 0.05$). The Layman's community-wide metrics showed that there were seasonal differences in the trophic structure of fish communities in Yangcheng Lake, wherein the trophic level length, basal food source, total ecological niche space, overall community density, trophic niche distribution range, and core ecological niche space of the fish in spring were greater than those in summer and autumn, with a high diversity of food sources and low degree of trophic redundancy. A gradual upward trend from summer to autumn in 2017 and then to spring 2018 was noted. This study initially constructed a continuous trophic spectrum of fish in Yangcheng Lake, enriching the study of the Yangcheng Lake ecosystem in terms of fish community trophic structure, with the aim of providing a reference for lake ecological management and sustainable fishery development.

Key words: stable isotope technology; trophic level; Layman's community-wide metrics; Yangcheng Lake; large-scale ponds; ecological fishery

Corresponding author: XU Dongpo. E-mail: xudp@ffrc.cn