

应用稳定性同位素 ($\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$) 技术研究 长江中游干流主要鱼类的营养级

巴家文^{①②} 邓华堂^② 段辛斌^② 刘绍平^② 李 云^① 陈大庆^{②*}

① 西南大学动物科技学院 重庆 400716; ② 中国水产科学研究院长江水产研究所 武汉 430223

摘要: 应用稳定性同位素 ($\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$) 技术对 2011 年 3 月至 2013 年 12 月采自长江中游干流宜昌、荆州、石首、监利、城陵矶、鄂州、九江和湖口江段的 44 种鱼类及 3 种水生无脊椎动物进行了营养级研究。长江中游干流鱼类的 $\delta^{13}\text{C}$ 值范围 -33.83‰ (鳊 *Aristichthys nobilis*) ~ -17.36‰ (南方鲇 *Silurus meridionalis*)， $\delta^{15}\text{N}$ 值范围 4.83‰ (泥鳅 *Misgurnus anguillicaudatus*) ~ 15.13‰ (翘嘴鲌 *Culter alburnus*)。以梨形环棱螺 (*Bellamya purificata*) 的 $\delta^{15}\text{N}$ 均值 5.48‰ 作为营养级基准线 (营养级 = 2)，计算出该江段水生动物的营养级处于 2.42 ~ 4.88，主要集中在 2.83 ~ 3.61 之间，鱼类平均营养级为 3.28。营养级大于 2.83 的鱼类种类数量占了总生物种数的 80.85%。大刺鳅 (*Mastacembelus armatus*) 和长春鳊 (*Parabramis pekinensis*) 营养级最低，分别为 2.42 ± 0.49 和 2.56 ± 0.52 ，营养层级大于 4.0 的高级消费者为太湖新银鱼 (*Neosalanx taihuensis*)、短颌鲚 (*Coilia brachygnathus*)、鳊和长蛇鮈 (*Saurogobio dumerili*)，分别为 4.88 ± 0.01 、 4.37 ± 0.27 、 4.32 ± 0.35 和 4.09 ± 0.78 ，小黄魮鱼 (*Micropercopis swinhonis*)、鳊 (*Elopichthys bambusa*)、鳊 (*Siniperca chuatsi*)、翘嘴鲌、青鱼 (*Mylopharyngodon piceus*) 和南方鲇的营养级分别 3.99 、 3.92 ± 0.16 、 3.89 ± 0.27 、 3.87 ± 0.62 、 3.59 ± 0.69 和 3.59 ± 0.57 。本研究旨在为长江中游渔业资源评估及其合理利用提供基础科学资料，为进一步研究长江中游干流渔业资源营养结构的动态变化及受人为活动干扰影响等提供科学参考依据。

关键词: 鱼类; 营养级; 食物网; 稳定性同位素; 河流

中图分类号: Q958 文献标识码: A 文章编号: 0250-3263 (2015) 04-537-10

Trophic Level Analysis on Main Fish Species in the Middle Reaches of Yangtze River by $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ Analysis

BA Jia-Wen^{①②} DENG Hua-Tang^② DUAN Xin-Bin^② LIU Shao-Ping^②
LI Yun^① CHEN Da-Qing^{②*}

① College of Animal Science and Technology, Southwest University, Chongqing 400716; ② Yangtze River Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Wuhan 430223, China

基金项目 公益性行业 (农业) 科研专项经费 (No. 201303056-5)，农业部物种资源保护 (渔业) 项目，国家自然科学基金项目 (No. 31201997)；

* 通讯作者, E-mail: chdq@yfi.ac.cn;

第一作者介绍 巴家文, 男, 博士研究生; 研究方向: 鱼类生态学; E-mail: bajiawen@163.com。

收稿日期: 2014-11-22, 修回日期: 2015-04-01 DOI: 10.13859/j.cjz.201504005

Abstract: Stable isotope analysis is commonly used to study food web structures and material flows in a wide range of aquatic ecosystems. The trophic level of 44 fish and three aquatic invertebrate species was analyzed using $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ analysis method (Table 1). Samples were collected from the middle reaches of Yangtze River at Yichuang, Jingzhou, Shishou, Jianli, Chenglingji, Ezhou, Jiujiang and Hukou sections in the period of March 2011 to December 2013. In this study, there was significant difference in the $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ values of fishes. The value of $\delta^{13}\text{C}$ ranged from -33.83‰ found in the body of fish *Aristichthys nobilis* to 17.36‰ in *Silurus meridionalis*; the value of $\delta^{15}\text{N}$ varied from 4.83‰ in fish *Misgurnus anguillicaudatus* to -15.13‰ in species *Culter alburnus*. The average value of $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ s ranged from -30.06‰ in *Micropercops swinhonis* to -21.24‰ in species *Paramisgurnus dabryanus* and from 6.91‰ in *Mastacembelus armatus* to 14.99‰ in *Neosalanx taihuensis* (Fig. 1). Based on the $\delta^{15}\text{N}$ values of *Bellamya purificata* (5.48‰) as the baseline, the trophic level of aquatic organisms was at level 2.42 - 4.88, with a central value at 2.83 - 3.61. While the value of the average trophic level for these fishes were at 3.28. The Trophic level around of 80.85% fish species out of the total organisms were at value 2.83. The minimal value of trophic levels were detected in species *Mastacembelus armatus* (2.42 ± 0.49) and *Parabramis pekinensis* (2.56 ± 0.52). The trophic levels at more than 4.0 were found in species *Neosalanx taihuensis* (4.88 ± 0.01), *Coilia brachygnathus* (4.37 ± 0.27), *Aristichthys nobilis* (4.32 ± 0.35) and *Saurogobio dumerili* (4.09 ± 0.78), respectively. The trophic levels values was at 3.99 for *Micropercops swinhonis*, 3.92 ± 0.16 for *Elopichthys bambusa*, 3.89 ± 0.27 for *Siniperca chuatsi*, 3.87 ± 0.62 for *Culter alburnus*, 3.59 ± 0.69 for *Mylopharyngodon piceus* and 3.59 ± 0.57 for *Silurus meridionalis*, respectively (Fig. 2). The results of this study can provide the basic scientific data for the assessment and utilization for the fishery resources in the study area, as well as the important reference for the further studies on the dynamic structure change of fishery resources and effect of human activity disturbance in the middle reaches of Yangtze River.

Key words: Fishes; Trophic levels; Food web; Stable isotopes; River

水域生态系统的物质循环和能量流动过程一直是水生生物学研究的热点之一, 确定水域生态系统中生物种间食物关系是建立复杂食物网的主要途径, 更能有效地对渔业资源进行评估及可持续利用 (Pingram et al. 2014)。生物稳定性同位素比值是由其食物决定的, 食物不同其同位素比值也不同, 稳定性同位素技术在水域生态系统食物网结构及营养关系方面得到了较为广泛的应用 (李忠义等 2005, Mao et al. 2012, Power et al. 2013)。稳定碳同位素 ($\delta^{13}\text{C}$) 在食物链中每隔一个营养级能产生 $0 \sim 1\text{‰}$ 的同位素分馏, 常用于解释消费者的碳源以及生态系统中物质和能量从初级生产者到高级消费者之间的流动 (Persic et al. 2004)。稳定氮

同位素 ($\delta^{15}\text{N}$) 能在食物与捕食者之间产生 $3\text{‰} \sim 4\text{‰}$ 的同位素分馏 (Fry 1988), 常用于确定生物的营养级以及它们在食物网中所处的营养位置 (Fry 1991, Vander Zanden et al. 1997)。稳定性同位素技术在水域生态系统食物网结构及营养关系研究方面, 不仅可以弥补传统胃含物分析法的许多缺陷, 还能够反映生物长期消化吸收的食物来源、营养位置和食物网结构 (Vander Zanden et al. 1999, Li et al. 2005)。Xu 等 (2004, 2005) 利用稳定碳、氮同位素比值研究了我国东湖、巢湖、抚仙湖等淡水湖泊水生食物网结构与营养级关系。李忠义等 (2010) 运用 $\delta^{15}\text{N}$ 稳定同位素对长江口 20 种鱼类和 12 种无脊椎动物以及南黄海水域 14 种

鱼类和 10 种无脊椎动物的营养级进行了研究,并分析了其营养级空间变化。霍堂斌等(2013)应用 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$ 稳定同位素研究了黑龙江中游 32 种鱼类和 6 种底栖无脊椎动物的营养层次,构建了该江段食物网营养结构。Zhang 等(2007)应用 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$ 稳定同位素研究了长江干流三峡江段食物网的时空差异以及不同鱼类营养级的改变。孙明等(2013)分析了辽东湾海域主要渔业生物的氮稳定同位素比值,研究了 28 种鱼类和 26 种无脊椎动物的营养位置,并通过辽东湾近岸与远岸海域的同种生物 $\delta^{15}\text{N}$ 值的对比分析了人类活动对海洋生物 $\delta^{15}\text{N}$ 值的影响。

营养级是生态系统营养动力学的核心概念,最早用于反映食物网中生命体的位置,近年来广泛应用于群落和生态系统研究中。在渔业生态系统中,鱼类营养级的动态变化能够反映出鱼类摄食饵料的生物种类和数量变化状况,鱼类群落平均营养级的变化也与鱼类群落结构的变化有着极大关联(薛莹等 2003),此外,在海洋渔业生态系统中,渔获物的平均营养级也被作为评估和检测生态系统结构、功能动态、生物多样性变化和渔业可持续性发展的重要指标(Pauly et al. 2001)。目前,通过营养级之间的食物关系判定对食物网结构和功能进行系统研究也是渔业经济、渔业生态,以及渔业资源管理的重要内容之一(苏纪兰等 2002)。

长江是我国的第一大河,水系支流众多,流域面积广阔。长江中游干流鱼类资源丰富,是产漂流性卵鱼类的主要栖息和繁殖场所,长江中游渔获物中,适应于缓流或静水条件,食性多样化种类居多,如青鱼(*Mylopharyngodon piceus*)、草鱼(*Ctenopharyngodon idellus*)、鲢(*Hypophthalmichthys molitrix*)、鳙(*Aristichthys nobilis*)、鳊(*Elopichthys bambusa*)、赤眼鲮(*Squaliobarbus curriculus*)、长春鳊(*Parabramis pekinensis*)和翘嘴鲌(*Culter alburnus*)等。长江中游江段有 140 余种鱼类分布记录,其中以江湖洄游性鱼类(青鱼、草鱼、

鲢和鳙等)和定居性鱼类(鲤 *Cyprinus carpio* 和鲫 *Carassius auratus* 等)为主(柯福恩等 1994)。近年来,长江中游干流江段鱼类物种数量降低且具有个体低龄化和小型化现象,渔业产量逐年下降,渔业资源趋于衰退(刘绍平等 2005, 范振华等 2012)。长江中游干流水生态系统受水利工程、河道整治、过度捕捞和水污染等影响较大,对于上述环境胁迫下的鱼类营养级现状研究有着重要的科学意义(Chen et al. 2009)。目前,关于长江干流鱼类营养级方面的研究报道较少,本研究应用 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$ 稳定性同位素方法研究长江中游干流江段主要鱼类的营养级状况,以期为进一步研究长江中游渔业生态系统和渔业资源评估及其合理利用提供基础科学资料。

1 材料与方法

1.1 样品采集地点与时间

长江中游宜昌至湖口江段,长 927 km, 占全江长度的 14.7%, 流域面积 67.9 万 km^2 。本研究地点位于长江中游干流宜昌至湖口江段, 采样点为宜昌、荆州、石首、监利、城陵矶、鄂州、九江和湖口江段(图 1)。采样时间分别为 2011 年 3 月和 9 月以及 2013 年 7 月、9 月和 12 月。

1.2 样品采样方法

鱼类样品主要通过丝网、流刺网等网具捕获以及从渔民的渔获物中获得, 鱼类标本的鉴定参照《中国动物志》(陈宜瑜 1998, 乐佩琦 2000)、《湖南鱼类志》(湖南省水产科学研究所 1980)和《长江鱼类》(湖北省水生生物研究所鱼类研究室 1976)。水生无脊椎动物采用 $1/16 \text{ m}^2$ 彼德生采泥器和虾笼等网具采集。鱼类样品取其背部肌肉 -20°C 下冷冻保存, 螺类样品去壳取肌肉后冷冻保存, 带回实验室在 55°C 下连续烘干至恒重, 使用研钵研碎成均匀粉末, 干燥保存。

1.3 稳定性同位素分析

本研究中所有样品的 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$ 测定是在

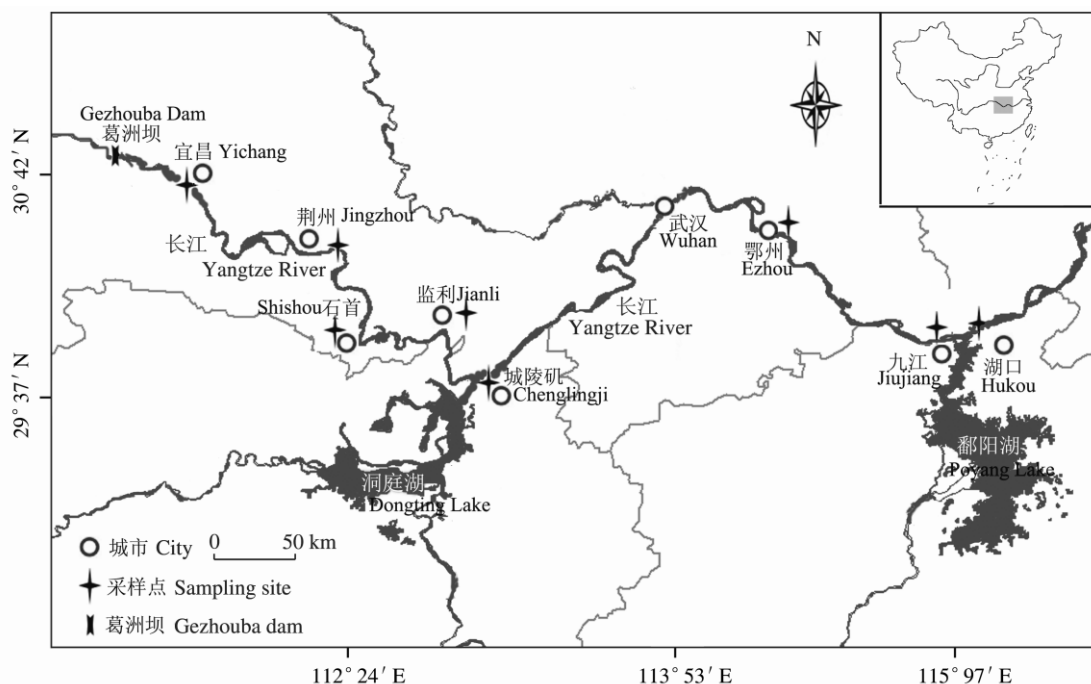


图 1 研究区域及采样点示意图

Fig. 1 The study area and sample site

中国林业科学院稳定性同位素实验室完成的。所有样品经 Flash EA 1112 元素分析仪燃烧，所得的 CO₂ 和 N₂ 气体分别送入 Finnigan MAT 公司的 Delta V Advantage 型稳定同位素比率质谱仪测定，每测 5 个样品后测定 1 个标准样品进行校正。样品在元素分析仪中高温燃烧后生成 CO₂ 和 N₂，质谱仪通过检测 CO₂ 的 ¹³C 与 ¹²C 比率，并与国际标准物(Pee Dee Belnite, PDB) 比对后计算出样品的 δ¹³C 比率值；通过检测 N₂ 的 ¹⁵N 与 ¹⁴N 比率，并与国际标准物(大气 N₂) 比对后计算出样品的 δ¹⁵N 比率值。测定精度：δ¹³C ≤ 0.1‰，δ¹⁵N ≤ 0.2‰。

1.4 数据处理

数据处理在 SPSS 15.0 下完成，生物样品中 ¹⁵N/¹⁴N 和 ¹³C/¹²C 的比值，按以下公式计算得出，

$$\delta^{13}\text{C}(\text{‰}) = \left(\frac{(^{13}\text{C}/^{12}\text{C})_{\text{sample}}}{(^{13}\text{C}/^{12}\text{C})_{\text{PDB}}} - 1 \right) \times 10^3$$

$$\delta^{15}\text{N}(\text{‰}) = \left(\frac{(^{15}\text{N}/^{14}\text{N})_{\text{sample}}}{(^{15}\text{N}/^{14}\text{N})_{\text{standard}}} - 1 \right) \times 10^3$$

式中，δ¹³C 为生物的碳同位素比值，δ¹⁵N 为生物的氮同位素比值，(¹³C/¹²C)_{sample} 和 (¹⁵N/¹⁴N)_{sample} 表示采集样品的 ¹³C/¹²C 和 ¹⁵N/¹⁴N 比值，(¹³C/¹²C)_{PDB} 表示标准物的 ¹³C/¹²C 比值，(¹⁵N/¹⁴N)_{standard} 表示标准物大气 N₂ 的 ¹⁵N/¹⁴N 比值。

食物网营养级计算公式：

$$T_{\text{trophic position}} = \frac{\delta^{15}\text{N}_{\text{sample}} - \delta^{15}\text{N}_{\text{baseline}}}{\Delta\delta^{15}\text{N}} + 2$$

式中，T_{trophic position} 表示所计算消费者的营养级位置，δ¹⁵N_{sample} 表示消费者氮稳定性同位素比值，δ¹⁵N_{baseline} 为该系统基线生物的氮稳定性同位素比值，本研究中以梨形环棱螺 (*Bellamya purificata*) δ¹⁵N 均值 5.48‰ 为 δ¹⁵N_{baseline} (T = 2)，Δδ¹⁵N 表示一个营养级的氮富集度，本研究取 3.4‰ 作为基准线 (Post 2002)。

2 结果

表 1 列出了长江中游干流宜昌至湖口江段

表 1 长江中游干流江段水生动物的 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$ 值及样品信息
 Table 1 Sample information and $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ values of aquatic species in the middle reach of the Yangtze River

物种 Species	$\delta^{13}\text{C}$ (‰)		$\delta^{15}\text{N}$ (‰)		体长 (mm) Body length	样品数 Sample size
	范围 Range	平均值 Average	范围 Range	平均值 Average		
短颌鲚 <i>Coilia brachygnathus</i>	- 28.16 ~ - 23.01	- 26.50	12.30 ~ 14.98	13.53	150 ~ 170	7
太湖新银鱼 <i>Neosalanx taihuensis</i>	- 26.21 ~ - 25.94	- 26.07	14.95 ~ 15.03	14.99	40, 65	2
胭脂鱼 <i>Myxocyprinus asiaticus</i>	- 25.63	- 25.63	7.96	7.96	55	1
鲤 <i>Cyprinus carpio</i>	- 28.84 ~ - 22.84	- 25.42	5.55 ~ 12.26	8.65	150 ~ 350	11
鲢 <i>Hypophthalmichthys molitrix</i>	- 33.14 ~ - 23.75	- 28.03	6.87 ~ 12.55	9.00	190 ~ 460	12
鳊 <i>Aristichthys nobilis</i>	- 33.83 ~ - 27.60	- 29.81	12.32 ~ 14.71	13.38	420 ~ 480	3
鲫 <i>Carassius auratus</i>	- 32.05 ~ - 22.65	- 27.77	6.43 ~ 11.17	8.80	80 ~ 100	12
棒花鱼 <i>Abbottina rivularis</i>	- 27.74 ~ - 27.36	- 27.55	7.93 ~ 11.99	9.96	85, 90	2
鳊 <i>Hemiculter leuciclus</i>	- 30.43 ~ - 23.51	- 25.93	8.16 ~ 12.12	9.75	78 ~ 105	7
黄尾鲮 <i>Xenocypris davidi</i>	- 24.75 ~ - 20.42	- 22.59	8.39 ~ 13.28	10.83	140, 155	2
长蛇鮈 <i>Saurogobio dumerili</i>	- 30.38 ~ - 24.52	- 27.45	10.66 ~ 14.49	12.58	105, 120	2
蛇鮈 <i>Saurogobio dabryi</i>	- 29.16 ~ - 24.89	- 26.33	9.19 ~ 12.83	10.83	90 ~ 100	3
银鮈 <i>Squalidus argentatus</i>	- 25.77 ~ - 23.04	- 24.35	7.64 ~ 10.16	8.72	65 ~ 80	5
华鳊 <i>Sarcocheilichthys sinensis</i>	- 29.26 ~ - 24.53	- 27.48	8.80 ~ 9.86	9.44	85 ~ 95	3
花鲢 <i>Hemibarbus maculatus</i>	- 24.09	- 24.09	8.58	8.58	145	1
铜鱼 <i>Coreius heterokon</i>	- 27.66 ~ - 18.73	- 25.74	8.35 ~ 14.53	10.72	130 ~ 160	9
麦穗鱼 <i>Pseudorasbora parva</i>	- 30.96 ~ - 24.61	- 27.24	8.49 ~ 11.29	9.94	85 ~ 95	3
大鳍鱮 <i>Acheilognathus macropterus</i>	- 29.48 ~ - 29.10	- 29.29	9.44 ~ 10.58	10.01	35, 42	2
翘嘴鲌 <i>Culter alburnus</i>	- 29.94 ~ - 21.70	- 25.44	8.77 ~ 15.13	11.83	140 ~ 210	8
长春鳊 <i>Parabramis pekinensis</i>	- 29.37 ~ - 19.73	- 23.85	5.49 ~ 10.58	7.37	160 ~ 195	8
似鳊 <i>Pseudobrama simoni</i>	- 28.55 ~ - 23.58	- 26.50	6.43 ~ 9.29	7.83	90 ~ 115	4
青鱼 <i>Mylopharyngodon piceus</i>	- 30.77 ~ - 23.08	- 28.48	8.15 ~ 13.67	10.90	290 ~ 470	5
鳊 <i>Elopichthys bambusa</i>	- 30.45 ~ - 28.45	- 29.45	11.60 ~ 12.40	12.00	240, 265	2
赤眼鲮 <i>Squaliobarbus curriculus</i>	- 25.19 ~ - 21.15	- 23.36	6.00 ~ 9.69	7.49	165 ~ 195	7
草鱼 <i>Ctenopharyngodon idellus</i>	- 30.02 ~ - 23.98	- 25.90	6.40 ~ 13.70	9.70	220 ~ 490	14
兴凯刺鲃 <i>Acanthorhodeus chankaensis</i>	- 26.61	- 26.61	9.76	9.76	35	1
紫薄鲈 <i>Leptobotia taeniaps</i>	- 28.55 ~ - 26.15	- 27.35	7.64 ~ 9.13	8.38	60, 75	2
黄沙鲈 <i>Botia xanthi</i>	- 25.86	- 25.86	8.00	8.00	90	1
花斑副沙鲈 <i>Parabotia fasciata</i>	- 27.10 ~ - 22.35	- 24.67	6.96 ~ 10.88	9.13	55 ~ 70	5
大刺鲈 <i>Mastacembelus armatus</i>	- 24.31 ~ - 21.73	- 23.02	5.72 ~ 8.11	6.91	105, 110	2
大鳞副泥鳅 <i>Paramisgurnus dabryanus</i>	- 23.82 ~ - 18.67	- 21.24	6.60 ~ 10.14	8.36	90 ~ 108	3
泥鳅 <i>Misgurnus anguillicaudatus</i>	- 26.68 ~ - 22.38	- 24.78	4.83 ~ 11.61	8.29	90 ~ 105	6
南方鲇 <i>Silurus meridionalis</i>	- 29.89 ~ - 17.36	- 23.58	7.60 ~ 14.76	10.89	190 ~ 380	11
白边鲇 <i>Leiocassis albomarginatus</i>	- 25.22	- 25.22	9.96	9.96	190	1

续表 1

物种 Species	$\delta^{13}\text{C}$ (‰)		$\delta^{15}\text{N}$ (‰)		体长 (mm) Body length	样品数 Sample size
	范围 Range	平均值 Average	范围 Range	平均值 Average		
粗唇鲮 <i>Leiocassis crassilabris</i>	- 25.78	- 25.78	9.70	9.70	180	1
长吻鲮 <i>Leiocassis longirostris</i>	- 23.20 ~ - 22.01	- 22.61	9.35 ~ 9.82	9.58	170, 198	2
黄颡鱼 <i>Pelteobagrus fulvidraco</i>	- 29.20 ~ - 22.11	- 25.08	6.64 ~ 12.53	9.30	110 ~ 160	14
鳊 <i>Siniperca chuatsi</i>	- 26.12 ~ - 21.87	- 24.16	10.23 ~ 13.32	11.89	120 ~ 150	13
圆尾斗鱼 <i>Macropodus ocellatus</i>	- 31.05 ~ - 24.16	- 27.00	5.05 ~ 10.88	8.20	40 ~ 50	3
子陵吻虾虎鱼 <i>Rhinogobius giurinus</i>	- 24.53	- 24.53	9.92	9.92	70	1
乌鳢 <i>Channa argus</i>	- 30.36 ~ - 26.78	- 27.02	8.93 ~ 12.82	10.80	200 ~ 220	3
沙塘鳢 <i>Odontobutis obscurus</i>	- 27.44 ~ - 24.51	- 25.97	9.22 ~ 12.06	10.64	80, 95	2
小黄鲮鱼 <i>Micropercops swinhonis</i>	- 30.06	- 30.06	12.24	12.24	80	1
鱮 <i>Hemirhamphus sajori</i>	- 24.14	- 24.14	10.86	10.86	75	1
秀丽白虾 <i>Leander modestus</i>	- 27.30 ~ - 20.23	- 24.68	7.26 ~ 12.73	9.12		8
克氏原螯虾 <i>Procambarus clarkii</i>	- 25.76 ~ - 25.61	- 25.69	7.70 ~ 8.36	8.03		2
梨形环棱螺 <i>Bellamya purificata</i>	- 28.99 ~ - 27.45	- 28.22	3.75~8.41	5.48		6

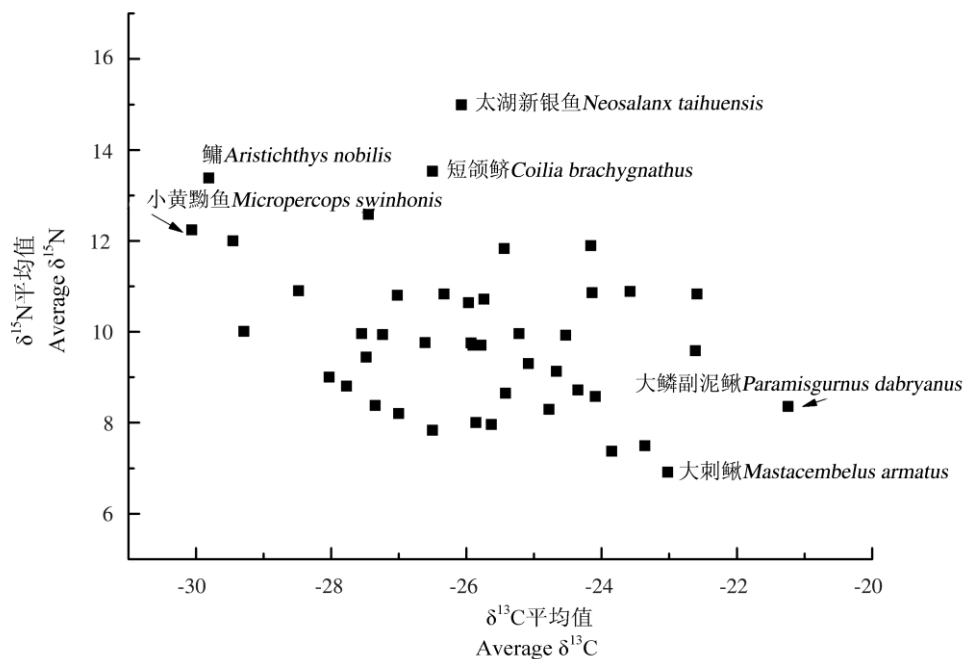


图 2 长江中游干流江段主要鱼类 $\delta^{13}\text{C}$ - $\delta^{15}\text{N}$ 图

Fig. 2 The distribution of $\delta^{13}\text{C}$ - $\delta^{15}\text{N}$ value in the dominant fish species in the middle reach of Yangtze River

所采集的 44 种鱼类和 3 种水生无脊椎动物共 47 种生物的 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$ 值范围和营养级计算结果。该生态系统鱼类的 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$ 值跨度很

大, $\delta^{13}\text{C}$ 值范围为 - 33.83‰ (鳊) ~ - 17.36‰ (南方鲇 *Silurus meridionalis*), 相差 16.47‰, $\delta^{13}\text{C}$ 平均值范围为 - 30.06‰ (小黄鲮鱼

Micropercops swinhonis) ~ - 21.24‰ (大鳞副泥鳅 *Paramisgurnus dabryanus*)。 $\delta^{15}\text{N}$ 值范围为 4.83‰ (泥鳅 *Misgurnus anguillicaudatus*) ~ 15.13‰ (翘嘴鲌), 相差 10.3‰, $\delta^{15}\text{N}$ 平均值范围为 6.91‰ (大刺鲃 *Mastacembelus armatus*) ~ 14.99‰ (太湖新银鱼 *Neosalanx taihuensis*) (图 2)。底栖无脊椎动物中, 秀丽白虾 (*Leander modestus*) 的 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$ 值范围跨度较大, 分别为 7.07‰ 和 5.47‰; 底栖动物梨形环棱螺的 $\delta^{13}\text{C}$ 值范围为 - 28.99‰ ~ - 27.45‰, $\delta^{15}\text{N}$ 值范围为 3.75‰ ~ 8.41‰, 相差 4.66‰。

长江中游干流江段主要生物资源种类的营养级处于 2.42 ~ 4.88, 集中在 2.83 ~ 3.61 之间, 鱼类平均营养级为 3.28。营养级大于 2.83 的生物种类数量占了总生物种数的 80.85%。大刺鲃和长春鳊营养层级最低。营养层级大于 4.0 的高级消费者为太湖新银鱼、短颌鲚 (*Coilia brachygnathus*)、鳙和长蛇鮈 (*Saurogobio dumerili*), 分别为 4.88 ± 0.01 、 4.37 ± 0.27 、 4.32 ± 0.35 和 4.09 ± 0.78 , 其次为小黄魮鱼、鳊、鳙 (*Siniperca chuatsi*)、翘嘴鲌、青鱼和南方鲇, 营养级分别 3.99 、 3.92 ± 0.16 、 3.89 ± 0.27 、 3.87 ± 0.62 、 3.59 ± 0.69 和 3.59 ± 0.57 (图 3)。

3 讨论

本研究江段太湖新银鱼的 $\delta^{15}\text{N}$ 均值为 14.99‰, 营养级位置为 4.88 ± 0.01 , 另有研究发现在长江秭归和三斗坪两个江段银鱼的营养级也处于较高位置, $\delta^{15}\text{N}$ 均值分别为 11.92‰ 和 13.23‰ (张亮 2007), 从传统食性角度分析, 太湖新银鱼和鳙为典型的浮游动物滤食性鱼类, 难以理解其为何处于较高营养级位置, 可能是由于其主要摄食的水体浮游动物的 $\delta^{15}\text{N}$ 偏高所造成的。Xu 等 (2011) 利用浮游动物和 3 种蚌类生物作为基线生物计算鳙的营养级位置在 2.4 ~ 3.9 之间, 以蚌类生物均值作为基线时其平均营养位置为 3.4, 其处于高营养级位置时可能也会摄食如鱼类等处于较高营养级的消费者。短颌鲚是一种小型经济鱼类, 在长江中

游干流江段多分布于洞庭湖、鄱阳湖与长江交汇江段附近, 其营养级位置也很高, 达到 4.37 ± 0.27 , 其原因可能以其食物来源有关, 因在长江口水域对同属的刀鲚 (*Coilia ecetenes*) 和凤鲚 (*C. mystus*) 的胃含物研究发现, 其摄食对象主要为虾类、桡足类和鱼类 (庄平等 2010)。

长江中游干流江段鱼类的 $\delta^{13}\text{C}$ 平均值范围为 - 30.06‰ ~ - 21.24‰, 主要集中于 - 27.0‰ ~ - 24.0‰, 可以在一定程度上反映出该江段鱼类食物来源, 有较强的食物竞争压力。长江中游干流江段鱼类的 $\delta^{15}\text{N}$ 平均值范围为 6.91‰ ~ 14.99‰, $\delta^{15}\text{N}$ 平均值主要集中于 8.0‰ ~ 11.0‰ (图 3), 多数鱼类营养级位置重叠, 可能是其食物来源几近相同, 会进一步导致鱼类在该生态系统内较为强烈的食物竞争关系。大型河流的营养来源复杂, 尤其是流量很大的长江干流江段, 受长江径流的影响较大, 由于初级生产者比较匮乏, 系统中鱼类消费者的食物几乎没有固定来源, 大都取决于食物的存在与否和食物容易获得的程度 (张亮 2007)。本研究中长江中游干流江段鱼类营养级差异可能与所采集标本的体长、体重差异有关, 也可能是样品采集的不同江段其食物组成也有所不同。由于水生生物的杂食性和营养塑性普遍存在, 使得同种生物在不同时间和空间其食物组成也不相同, 而且现代食物网动力学理论也认为生物的营养“层次”是动态的, 而不是固定的 (Jennings et al. 1997)。鱼类在不同的生命阶段中摄取的食物不同, 也相应处于不同的营养层次, 因而其稳定碳氮同位素与其所处的生命阶段也有着很大相关性 (卢伙胜等 2009)。

在研究水生生物营养层级时往往倾向于采用浮游动物或底栖无脊椎动物等消费者作为基线生物 (Cabana et al. 1996)。有研究表明, 浮游动物的 $\delta^{15}\text{N}$ 具有明显的季节性变化 (宁加佳等 2012), 因此, 本研究选择了长江中游干流江段初级消费者梨形环棱螺的 $\delta^{15}\text{N}$ 均值 5.48‰ 进行基线校正。虽然营养层级的精确评估, 还需要考虑到多种食物来源, 物种个体大小以及

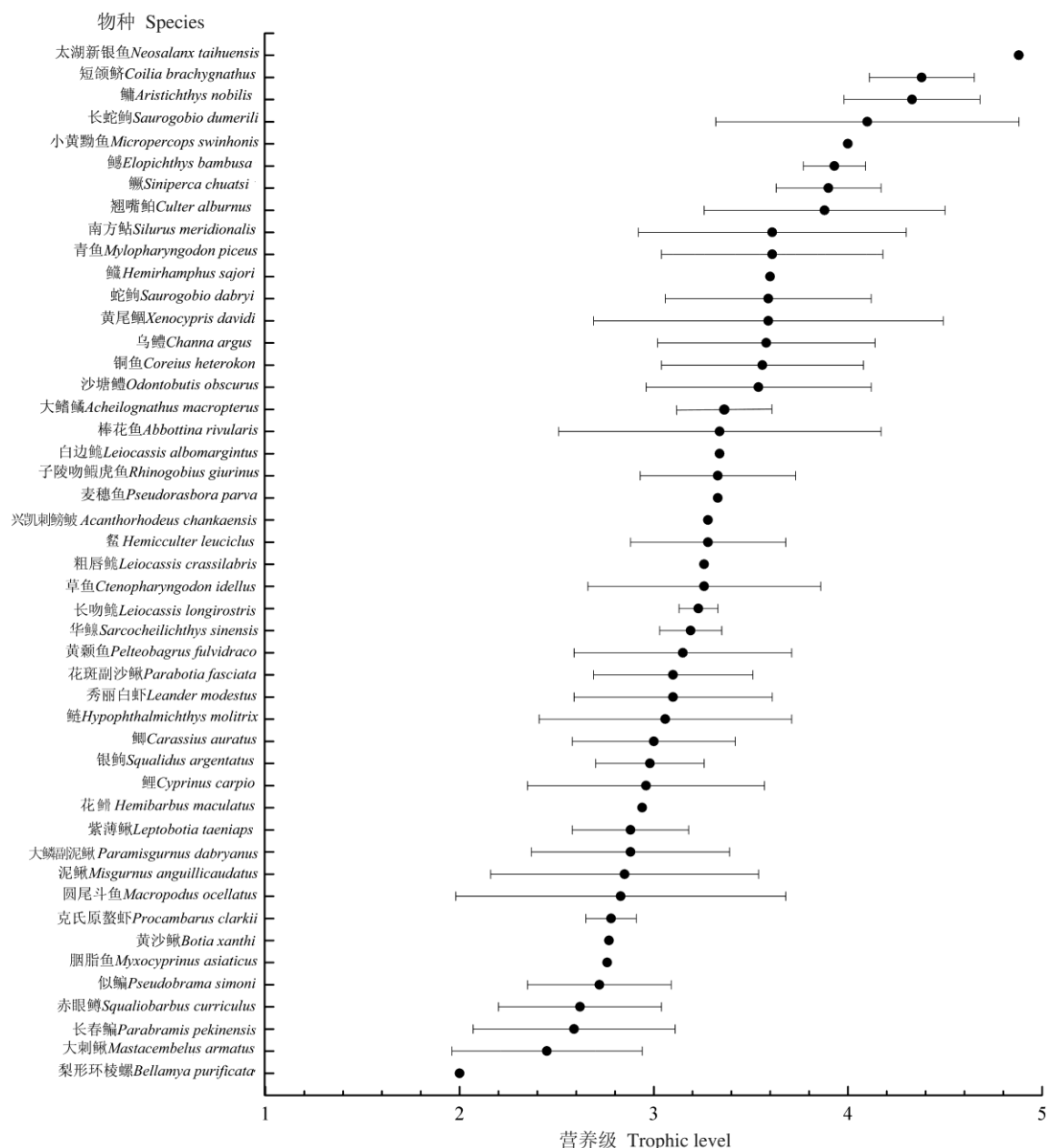


图 3 长江中游水体食物网连续营养谱

Fig. 3 Nutrition spectra of aquatic food web in the middle reach of Yangtze River

各种组织间同位素富集的异质性等因素 (Middelburg 2014)。受实验条件及样本采集限制，目前利用基准生物相对位置评估食物网的物种营养层级的方法仍然是应用最为广泛的 (Boecklen et al. 2011, Layman et al. 2012)。三峡大坝和葛洲坝对水位和流量的人为调控，使坝下干流江段鱼类的食物来源和摄食可能经常

发生变化，导致鱼类的营养级位置出现不稳定的状态，这也是河流生态学研究中存在许多不确定因素的原因之一。从长江上游到下游，以水生昆虫和着生藻类为食的鱼类随着其食物成分的减少而逐渐减少，与此同时，以鱼虾类、浮游动物为食的鱼类则逐渐增加，相比长江上游江段，长江中游江段以小鱼虾为食的鱼类较

多,食物网结构也较为复杂(丁宝清等 2011)。

营养关系是群落内各生物成员之间最重要的联系,是了解生态系统能量流动的核心,也是群落赖以生存的基础。了解水域食物网营养级状况和营养级关系对理解和解释生态系统的特征和过程有着重要意义。消费者的营养级变化,特别是高级捕食者的营养级变化在维持水生生态系统的稳定性中扮演重要角色,主要是因为其决定了食物网的食物链长度(Vander Zanden et al. 2007)。河流环境的扰动可能通过限制鱼类食物中次级消费者的丰度而缩短食物链长度,影响到鱼类的平均营养层级,而且鱼类在水文变化较大的环境中摄食到中间捕食者的机会小于稳定环境(McHugh et al. 2010)。研究水域生态系统食物网的传统方法主要是食性分析,反映的是短期取食结果,传统的胃容量法局限于测定主要鱼类的营养层次以及低等生物如浮游生物和无脊椎动物食物网中各营养层次生物的种间关系研究。利用稳定性同位素方法对今后进一步开展长江中游干流渔业生态系统受水利工程、河道整治、过度捕捞和水污染等影响的食物网结构及能流模式研究将十分有效和便利。

本研究仅对长江中游干流江段主要鱼类的营养级进行了初步研究,今后可以开展多季节或年际连续采样,分析各江段主要鱼类营养级的时空变化及年际动态变化,将鱼类营养级的动态变化作为对该江段渔业资源乃至水生生态系统评估的重要内容之一,也可进一步分析长江中游人类活动对该水域生态系统造成的影响。另外,今后通过增加该江段水体颗粒有机物、浮游生物、无脊椎动物等鱼类主要食物来源的稳定同位素比值分析,可以初步建立长江中游干流江段主要鱼类食物网结构并分析其物质循环及能量流动过程等。

致谢 感谢李世健、范振华、李树华和俞立雄同学在野外调查及样品采集过程中给予的支持和热情帮助。

参 考 文 献

- Boecklen W J, Yarnes C T, Cook B A, et al. 2011. On the use of stable isotopes in trophic ecology. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 42: 411–440.
- Cabana G, Rasmussen J B. 1996. Comparing aquatic food chains using nitrogen isotopes. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 93(20): 10844–10847.
- Chen D Q, Xiong F, Wang K, et al. 2009. Status of research on Yangtze fish biology and fisheries. *Environmental Biology of Fishes*, 85(4): 337–357.
- Fry B. 1988. Food web structure on Georges Bank from stable C, N and S isotope compositions. *Limnology and Oceanography*, 33(5): 1182–1190.
- Fry B. 1991. Stable isotope diagrams of freshwater food webs. *Ecology*, 72(6): 2293–2297.
- Jennings S, Reñones O, Morales-Nin B, et al. 1997. Spatial variation in the $\delta^{15}\text{N}$ and $\delta^{13}\text{C}$ stable isotope composition of plants, invertebrates and fishes on Mediterranean reefs: Implication for the study of trophic pathway. *Marine Ecology Progress Series*, 146(1/3): 109–116.
- Layman C A, Araujo M S, Boucek R, et al. 2012. Applying stable isotopes to examine food-web structure: an overview of analytical tools. *Biological Reviews*, 87(3): 545–562.
- Li Z Y, Jin X S, Zhuan Z M, et al. 2005. Applications of stable isotope techniques in aquatic ecological studies. *Acta Ecologica Sinica*, 25(11): 3052–3060.
- Mao Z G, Gu X H, Zeng Q F, et al. 2012. Food web structure of a shallow eutrophic lake (Lake Taihu, China) assessed by stable isotope analysis. *Hydrobiologia*, 683(1): 173–183.
- McHugh P A, McIntosh A R, Jellyman P G. 2010. Dual influences of ecosystem size and disturbance on food chain length in streams. *Ecology Letters*, 13(7): 881–890.
- Middelburg J J. 2014. Stable isotopes dissect aquatic food webs from the top to the bottom. *Biogeosciences*, 11(8): 2357–2371.
- Pauly D, Palomares M L, Froese R, et al. 2001. Fishing down Canadian aquatic food webs. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 58(1): 51–62.

- Persic A, Roche H, Ramade F. 2004. Stable carbon and nitrogen isotope quantitative structural assessment of dominant species from the Vaccarès lagoon trophic web (Camargue Biosphere Reserve, France). *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 60(2): 261–272.
- Pingram M A, Collier K J, Hamilton D P, et al. 2014. Spatial and temporal patterns of carbon flow in a temperate, large river food web. *Hydrobiologia*, 729(1): 107–131.
- Post D M. 2002. Using stable isotopes to estimate trophic position: models, methods, and assumptions. *Ecology*, 83(3): 703–718.
- Power M E, Holomuzki J R, Lowe R L. 2013. Food webs in Mediterranean rivers. *Hydrobiologia*, 719(1): 119–136.
- Vander Zanden M J, Cabana G, Rasmussen J B. 1997. Comparing the trophic position of littoral fish estimated using stable nitrogen isotopes ($\delta^{15}\text{N}$) and dietary data. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 54(5): 1142–1158.
- Vander Zanden M J, Fetzner W W. 2007. Global patterns of aquatic food chain length. *Oikos*, 116(8): 1378–1388.
- Vander Zanden M J, Rasmussen J B. 1999. Primary consumer $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ and the trophic position of aquatic consumers. *Ecology*, 80(4): 1395–1404.
- Xu J, Xie P, Zhang M, et al. 2005. Variation in stable isotope signatures of seston and a zooplanktivorous fish in a eutrophic Chinese lake. *Hydrobiologia*, 541(1): 215–220.
- Xu J, Xie P. 2004. Studies on the food web structure of Lake Donghu using stable carbon and nitrogen isotope ratios. *Journal of Freshwater Ecology*, 19(4): 645–650.
- Xu J, Zhang M, Xie P. 2011. Sympatric variability of isotopic baselines influences modeling of fish trophic patterns. *Limnology*, 12(2): 107–115.
- Zhang L, Xu J, Xie P, et al. 2007. Stable isotope variations in particulate organic matter and a planktivorous fish in the Yangtze River. *Journal of Freshwater Ecology*, 22(3): 383–386.
- 陈宜瑜. 1998. 中国动物志 硬骨鱼纲 鲤形目 (中卷). 北京: 科学出版社.
- 丁宝清, 刘焕章. 2011. 长江流域鱼类食性同资源集团组成特征分析. *四川动物*, 30(1): 31–35.
- 范振华, 巴家文, 段辛斌. 2012. 长江宜昌至城陵矶江段鱼类资源现状及物种多样性研究. *淡水渔业*, 42(4): 20–25.
- 湖北省水生生物研究所鱼类研究室. 1976. 长江鱼类. 北京: 科学出版社.
- 湖南省水产科学研究所. 1980. 湖南鱼类志. 长沙: 湖南科学技术出版社.
- 霍堂斌, 姜作发, 马波, 等. 2013. 应用同位素分析黑龙江中游主要鱼类营养层次. *淡水渔业*, 43(2): 3–8.
- 柯福恩, 危起伟, 罗俊德, 等. 1994. 三峡工程对长江渔业资源的影响与补救措施. *淡水渔业*, 24(1): 6–9.
- 李忠义, 金显仕, 庄志猛, 等. 2005. 稳定同位素技术在水域生态系统研究中的应用. *生态学报*, 25(11): 3052–3060.
- 李忠义, 左涛, 戴芳群, 等. 2010. 运用稳定同位素技术研究长江口及南黄海水域春季拖网渔获物的营养级. *中国水产科学*, 17(1): 103–109.
- 刘绍平, 段辛斌, 陈大庆, 等. 2005. 长江中游渔业资源现状研究. *水生生物学报*, 29(6): 708–711.
- 卢伙胜, 欧帆, 颜云榕, 等. 2009. 应用氮稳定同位素技术对雷州湾海域主要鱼类营养级的研究. *海洋学报*, 31(3): 167–174.
- 宁加佳, 刘辉, 古滨河, 等. 2012. 流溪河水库颗粒有机物及浮游动物碳、氮稳定同位素特征. *生态学报*, 32(5): 1502–1509.
- 苏纪兰, 唐启升. 2002. 中国海洋生态系统动力学研究——II. 渤海生态系统动力学过程. 北京: 科学出版社, 216–217.
- 孙明, 刘修泽, 李轶平, 等. 2013. 应用氮稳定性同位素技术研究辽东湾海域主要渔业生物的营养级. *中国水产科学*, 20(1): 189–197.
- 薛莹, 金显仕. 2003. 鱼类食性和食物网研究评述. *海洋水产研究*, 24(2): 76–87.
- 乐佩琦. 2000. 中国动物志: 硬骨鱼纲 鲤形目 (下卷). 北京: 科学出版社.
- 张亮. 2007. 长江三峡江段鱼类碳、氮稳定性同位素研究. 武汉: 中国科学院水生生物研究所博士学位论文.
- 庄平, 罗刚, 张涛, 等. 2010. 长江口水域中华鲟幼鱼与 6 种主要经济鱼类的食性及食物竞争. *生态学报*, 30(20): 5544–5554.