

三峡水库小江流域鱼类营养层次研究

史方, 陈小娟, 杨志, 阙延福, 唐会元

(水利部中国科学院水工程生态研究所, 水利部水工程生态效应与生态修复重点实验室, 武汉 430079)

摘要:应用碳、氮稳定同位素技术对小江流域鱼类的营养层次进行全面量化, 以期为基于生态系统的三峡水库渔业与环境的科学管理提供理论支持。2013年5-6月, 于三峡水库小江流域渠口、养鹿、高阳、黄石和双江江段设点进行稳定同位素测定样品采集, 获取鱼类样品39种121尾, 基线生物——颗粒有机物样品15个。小江流域各江段的颗粒有机物 $\delta^{13}\text{C}$ 值范围为 -28.29‰ (养鹿) ~ -24.19‰ (黄石), 均值(-25.75 ± 1.98) ‰ ; $\delta^{15}\text{N}$ 值范围为 1.40‰ (养鹿) ~ 6.97‰ (高阳), 均值(4.67 ± 2.70) ‰ 。不同江段相同鱼的稳定性同位素值的配对双样本 t 检验结果显示各江段的 $\delta^{13}\text{C}$ 均无显著差异; 高阳江段与养鹿、双江和渠口江段 $\delta^{15}\text{N}$ 均有显著差异($P < 0.05$), 高阳江段与渠口江段的 $\delta^{15}\text{N}$ 差异极显著。小江流域位于最低营养级的初级消费者为草鱼, 平均相对营养级为2.15; 流域以次级消费者的杂食性鱼类种类为主, 相对营养级在2.66~3.85; 营养级3.85以上的鱼类种类向肉食性鱼类转变, 位居最高营养级的为长吻鮠, 其相对营养级为5.12。各江段的平均相对营养级范围为2.84(高阳) ~ 4.26(渠口), 差值为1.42。基线生物的选择与陆源营养物质的输入为水域生态系统营养层次分析中的关键因素; 对鱼类而言, 其生活史不同阶段体内稳定同位素的差异也应纳入考量中。

关键词:鱼类; 营养层次; 稳定同位素; 小江; 三峡水库

中图分类号:Q418 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-3075(2016)04-0070-08

传统的鱼类营养层次研究是通过胃含物分析法建立种类间的营养关系, 该方法仅能说明捕食者的瞬时摄食情况, 不能提供其长期的摄食信息以及食性转化情况, 且较难判断捕食者胃含物的消化吸收程度, 结果往往偏向于较难消化的食物, 存在较大的不确定性(李由明等, 2007; 徐军等, 2010)。此外, 鱼类较普遍地存在偶食性现象, 必须增加样品分析数量减少误差, 工作量巨大(Beaudoin, 1999)。稳定同位素法从新的角度为研究物种间营养关系提供了量化指标, 根据消费者稳定同位素比值与其食物相应同位素比值相近的原则来判断该生物的食物来源, 进而确定食物贡献; 而通过测定生态系统中不同生物的同位素比值还能比较准确地测定食物网结构和生物营养级(Gannes et al, 1997; 李忠义等, 2005; Fry, 2007)。碳稳定同位素比值($\delta^{13}\text{C}$)常用来分析消费者食物来源, 而氮稳定同位素比值($\delta^{15}\text{N}$)常用来确定生物在食物网中的营养位置(Post, 2002)。

Miyake等(1967)首次发现 $\delta^{15}\text{N}$ 在食物链中逐层富集, Deniro等(1978)证明动物体内 $\delta^{13}\text{C}$ 与其食物中的 $\delta^{13}\text{C}$ 十分接近, 并预测了稳定同位素方法在动物食性研究的应用前景。近十几年来, 稳定同位素技术已经被广泛地应用到水生生态系统的研究中(Post et al, 2000; 王玉玉等, 2009; Guzzo et al, 2011)。

小江是长江三峡水库上游区北岸的一条支流, 地处四川盆地东部边缘, 大巴山南麓, 介于北纬 $30^{\circ}50' \sim 31^{\circ}42'$ 、东经 $107^{\circ}56' \sim 108^{\circ}54'$, 流域面积 $5\,172.5\text{km}^2$, 干流全长 182.4km , 主要分布在开县、云阳两县境内, 是三峡库区移民数量最多、淹没面积和消落区面积最大的支流(长江水利委员会长江勘测规划设计研究院, 2004)。三峡水库蓄水后, 水文情势的变化改变了库区渔业生境格局和渔业资源结构, 长期居高不下的捕捞强度导致渔业资源衰退, 渔民捕捞生产效益下降, 传统的研究和渔业管理模式不能满足渔业可持续利用的需求, 必须从生态系统层面进行研究。目前小江流域的研究多集中在浮游植物群落结构(郭劲松等, 2008)、水华与营养盐特征(李哲等, 2009)、鱼类资源状况(李斌等, 2011)等方面。李斌等(2013)应用稳定同位素分析了2010年小江库湾枯水期和丰水期鱼类食物网结构, 但对鱼类营养结构的研究较为简略。本研究应用碳、氮

收稿日期: 2015-09-25

基金项目:三峡库区及长江中游生态系统结构与功能完善关键技术与示范(2012BAC06B04); 阻隔和生境萎缩对长江上游圆口铜鱼有效群体大小的生态学影响(51309166)。

作者简介:史方, 女, 1983年生, 副研究员。E-mail: moko@mail.ihe.ac.cn

通信作者:阙延福。E-mail: yfque@mail.ihe.ac.cn

稳定同位素技术对小江流域鱼类的营养层次进行全面量化,以期为基于生态系统的三峡水库渔业与环境的科学管理提供理论支持。

1 材料与方法

1.1 样品采集与保存

2013 年 5-6 月,于三峡水库小江流域渠口、养鹿、高阳、黄石和双江江段设点进行稳定同位素测定样品采集。获取样品合计 136 个(尾),包括颗粒有机物样品 15 个、鱼类样品 39 种 121 尾。颗粒有机物样品在各采样点采上中下层水混合,抽滤到预先灼烧的 Whatman GF/C 纤维滤膜上,密封冷冻保存待测;鱼类样品通过市场、码头、渔民手中购买获得,现场鉴定种类,测量体长、体重等基础生物学性状,之后取背部一侧肌肉,密封冷冻保存待测。

1.2 稳定同位素测定

所有样品均在 60℃ 烘 48 h 以上至恒重,送往中国农业科学院农业环境稳定同位素实验室测定 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$ 值。测定过程使用 vario PYRO cube 元素分析仪连接到 ISOPRIME-100 连续流同位素比质谱仪进行。在测定过程中,每 12 个样品穿插 1 个实验室标样进行校正。碳稳定同位素测定的标准物质是美洲拟箭石(PDB)(Craig, 1957; Peterson & Fry, 1987),氮稳定同位素分析的标准物质是纯化的大气中的 N_2 (Mariottia, 1983)。

1.3 鱼类营养级计算

依据 $\delta^{15}\text{N}$ 值计算小江流域鱼类各种类的相对营养级,消费者和食物间的 $\delta^{15}\text{N}$ 差异就是营养分馏值,随着营养级增加 $\delta^{15}\text{N}$ 值不断增加,根据生物对基线生物氮稳定同位素比值的相对值计算该生物的营养级,具体计算公式如下:

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

(1)

式中: $\delta^{15}\text{N}_{\text{consumer}}$ 表示鱼类氮稳定同位素比值; $\delta^{15}\text{N}_{\text{baseline}}$ 表示颗粒有机物氮稳定同位素平均比值; $\Delta\delta^{15}\text{N}$ 为不同营养级间的 $\delta^{15}\text{N}$ 富集值的平均值,本研究取 0.34‰ (Post et al, 2000);当基线生物是生产者时 $\lambda = 1$,当基线生物是初级消费者时 $\lambda = 2$ (Post, 2002)。

2 结果与分析

2.1 碳、氮稳定性同位素特征

小江流域各江段的颗粒有机物(POM)样品 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$ 值见表 1。 $\delta^{13}\text{C}$ 值范围为 -28.29‰ (养鹿)

$\sim -24.19\text{‰}$ (黄石),均值为 $(-25.75 \pm 1.98)\text{‰}$; $\delta^{15}\text{N}$ 值范围为 1.40‰ (养鹿) $\sim 6.97\text{‰}$ (高阳),均值为 $(4.67 \pm 2.70)\text{‰}$ 。

表 1 小江流域各江段颗粒有机物稳定同位素值

Tab. 1 Stable carbon and nitrogen isotope ratio values of POM at each site in Xiaojiang River

采样点	$\delta^{13}\text{C}/\text{‰}$	$\delta^{15}\text{N}/\text{‰}$	n/个
养鹿	-28.29	1.40	1
高阳	-27.12 ± 2.21	6.97 ± 3.47	5
黄石	-24.19 ± 0.70	3.88 ± 1.09	6
双江	-25.74 ± 1.05	3.49 ± 1.13	3
总计	-25.75 ± 1.98	4.67 ± 2.70	15

小江流域各江段鱼类 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$ 值见表 2 和表 3。各江段的 $\delta^{13}\text{C}$ 值范围为 -24.28‰ (渠口) $\sim -23.16\text{‰}$ (高阳),差值为 1.12‰ ; $\delta^{15}\text{N}$ 值范围为 12.01‰ (高阳) $\sim 13.66\text{‰}$ (渠口),差值为 1.65‰ 。各种类的 $\delta^{13}\text{C}$ 值范围为 -27.70‰ (银飘鱼) $\sim -18.24\text{‰}$ (草鱼),差值为 9.46‰ ; $\delta^{15}\text{N}$ 值范围为 8.26‰ (草鱼) $\sim 17.68\text{‰}$ (长吻鲩),差值为 9.42‰ 。

不同江段相同鱼的稳定性同位素值的配对双样本 t 检验结果见表 4。各江段的 $\delta^{13}\text{C}$ 值均无显著差异 ($P > 0.05$); $\delta^{15}\text{N}$ 值的比较结果显示,高阳江段与养鹿、双江和渠口江段均有显著差异 ($P < 0.05$)。其中,高阳江段与渠口江段的 $\delta^{15}\text{N}$ 值差异极显著 ($t = 4.28, P = 0.001$)。

2.2 鱼类营养层次

以各江段颗粒悬浮物 $\delta^{15}\text{N}$ 值为基准,计算获得小江各江段鱼类的相对营养级见表 5。小江流域位于最低营养级的初级消费者为草鱼,平均相对营养级为 2.15;流域以次级消费者的杂食性鱼类种类为主,相对营养级在 2.66 $\sim$ 3.85;营养级 3.85 以上的鱼类种类向肉食性鱼类转变,位居最高营养级的为长吻鲩,其相对营养级为 5.12。各江段的平均相对营养级范围为 2.84 (高阳) $\sim$ 4.26 (渠口),差值为 1.42。

选择小江流域 11 种主要经济鱼类(拟尖头鮠、翘嘴鮠、鳊、瓦氏黄颡鱼、鲇、鳙、鲢、赤眼鲮、鲤、鲫和草鱼),通过 $\delta^{13}\text{C} - \delta^{15}\text{N}$ 值双坐标构建的相对营养位置图见图 1。肉食性鱼类包括拟尖头鮠、翘嘴鮠、鳊、瓦氏黄颡鱼、鲇均处于最高的营养位置,其次是鳙、鲢、赤眼鲮、鲤、鲫等杂食性鱼类,草食性鱼类草鱼处于最低的营养位置。

表2 小江流域各江段鱼类样品 $\delta^{13}\text{C}$ 值
Tab.2 $\delta^{13}\text{C}$ value of fish species at each site in Xiaojiang River

种 类	$\delta^{13}\text{C}/\text{‰}$					n/ 尾
	渠口	养鹿	高阳	黄石	双江	
鳊 <i>Parabramis pekinensis</i>					-20.04	1
鲢 <i>Hemiculter leucisculus</i>	-25.32					1
草鱼 <i>Ctenopharyngodon idellus</i>			-18.46	-17.31	-18.96	3
赤眼鳟 <i>Squaliobarbus curriculus</i>	-23.12	-22.74	-21.04	-22.26	-26.00	5
大鳍鱮 <i>Mystus macropterus</i>	-23.74	-23.79		-23.70		3
鳙 <i>Elopichthys bambusa</i>		-23.98		-27.09	-25.42	3
光泽黄颡鱼 <i>Pelteobagrus nitidus</i>	-25.09	-27.34	-25.28	-25.86	-25.61	5
鳊 <i>Siniperca chuatsi</i>	-24.76	-24.12	-24.28	-23.35	-25.70	5
黑尾鱼 <i>Liobagrus nigricauda</i>			-23.40	-22.58	-28.95	3
厚颌鲂 <i>Megalobrama pellegrini</i>		-22.55				1
花斑副沙鳅 <i>Parabotia fasciata</i>		-21.26	-21.88			2
华鳊 <i>Sarcocheilichthys sinensis</i>					-25.44	1
黄颡鱼 <i>Pelteobagrus fulvidraco</i>	-24.15	-22.16	-23.16		-23.38	4
黄鳝 <i>Monopterus albus</i>		-25.28				1
鲫 <i>Carassius auratus</i>	-24.32	-21.01	-18.99	-22.06	-23.52	5
间下鱈 <i>Hyporhamphus intermedius</i>	-24.48					1
鲤 <i>Cyprinus (Cyprinus) carpio</i>	-23.52	-22.83	-20.77	-21.80	-20.97	5
鲢 <i>Hypophthalmichthys molitrix</i>		-22.75	-24.94	-23.95	-26.29	4
麦穗鱼 <i>Pseudorasbora parva</i>		-21.29			-26.49	2
泥鳅 <i>Misgurnus anguillicaudatus</i>			-21.01			1
拟尖头鲌 <i>Culter oxycephaloides</i>	-24.72	-25.36	-24.60	-24.80	-25.17	5
鲢 <i>Silurus asotus</i>	-22.70	-23.00	-22.02	-24.18	-23.19	5
翘嘴鲌 <i>Culter alburnus</i>	-25.97	-24.55	-25.89	-23.91	-25.76	5
青梢鲌 <i>Erythroculter dabryi</i>		-24.76	-23.86	-24.54	-22.80	4
蛇鲈 <i>Saurogobio dabryi</i>	-23.71	-27.12		-24.76	-26.23	4
似鳊 <i>Pseudobrama simoni</i>	-21.21	-20.23	-27.08	-22.40	-21.39	5
铜鱼 <i>Coreius heterodon</i>		-26.87	-24.88	-27.73	-28.89	4
瓦氏黄颡鱼 <i>Pelteobagrus vachelli</i>	-24.67	-26.07	-24.40	-24.34	-23.60	5
乌鳢 <i>Channa argus</i>					-24.23	1
胭脂鱼 <i>Myxocyprinus asiaticus</i>				-20.74	-25.20	2
岩原鲤 <i>Procypris rabaudi</i>					-22.82	1
银鲈 <i>Squalidus argentatus</i>	-23.77	-22.20	-23.02	-22.29	-20.51	5
银鲈鱼 <i>Pseudolaubuca sinensis</i>	-27.32	-28.97	-27.12	-27.41		4
鳊 <i>Aristichthys nobilis</i>		-22.44	-25.16	-26.07	-26.66	4
圆口铜鱼 <i>Coreius guichenoti</i>					-24.61	1
长鳍吻鲈 <i>Rhinogobio ventralis</i>					-25.35	1
长吻鲈 <i>Leiocassis longirostris</i>				-26.74	-24.27	2
中华鲮 <i>Rhodeus sinensis</i>		-18.07	-18.89		-21.15	3
子陵吻虾虎鱼 <i>Rhinogobius giurinus</i>	-24.46	-22.55	-22.61		-20.77	4
总 计	-24.28	-23.59	-23.16	-23.91	-24.17	121

3 讨论

碳由初级生产者通过光合作用从无机碳合成转化为有机碳,通过食物网在生态系统中传递和循环(Peterson & Fry,1987)。小江流域颗粒有机物的 $\delta^{13}\text{C}$ 从河口到库尾有降低的趋势,但同种鱼 $\delta^{13}\text{C}$ 值在不同采样江段并无明显差异,与同为三峡水库主要支流大宁河的特征(邓华堂等,2014)相似,可能与库尾至河口水域面积逐渐增大有关。随着水域面积增大,初级生产力中的碳主要来源于空气中 $\delta^{13}\text{C}$

值更高的 CO_2 和碳酸盐风化作用产生的碳,而非呼吸作用产生的 CO_2 中的碳(Post,2002;李斌等,2013)。 $\delta^{13}\text{C}$ 常被用来分析生态系统有机物来源及其对食物网基础能量的贡献(Raymond & Bauer,2001)。小江流域主要经济鱼类的 $\delta^{13}\text{C}$ 均高于颗粒有机物,说明颗粒有机物在其基础能量来源中并非占主要部分,暗示一方面小江流域外源性营养物质输入可能是食物网基础能量的重要供给部分(Van-note et al,1980;Findlay et al,1998;李斌等,2013),另一方面小江流域鱼类碳源可能主要来自近岸底层

表 3 小江流域各江段鱼类样品 $\delta^{15}\text{N}$ 值

Tab. 3 $\delta^{15}\text{N}$ value of fish species at each site in Xiaojiang River

种 类	$\delta^{15}\text{C}/\text{‰}$					n/尾
	渠口	养鹿	高阳	黄石	双江	
鳊 <i>Parabramis pekinensis</i>					10. 37	1
鲮 <i>Hemiculter leucisculus</i>	12. 50					1
草鱼 <i>Ctenopharyngodon idellus</i>			7. 15	8. 69	8. 95	3
赤眼鳟 <i>Squaliobarbus curriculus</i>	14. 28	12. 53	11. 66	8. 13	7. 97	5
大鳍鲮 <i>Mystus macropterus</i>	14. 60	15. 90		16. 42		3
鳊 <i>Elopichthys bambusa</i>		14. 88		15. 15	14. 49	3
光泽黄颡鱼 <i>Pelteobagrus nitidus</i>	14. 01	13. 40	13. 46	14. 13	14. 90	5
鳊 <i>Siniperca chuatsi</i>	16. 33	14. 35	13. 39	15. 05	15. 70	5
黑尾鱼 <i>Liobagrus nigricauda</i>			10. 86	9. 32	12. 77	3
厚颌鲂 <i>Megalobrama pellegrini</i>		11. 47				1
花斑副沙鳅 <i>Parabotia fasciata</i>		13. 08	12. 07			2
华鳊 <i>Sarcocheilichthys sinensis</i>					12. 70	1
黄颡鱼 <i>Pelteobagrus fulvidraco</i>	12. 03	13. 29	10. 81		13. 64	4
黄鳝 <i>Monopterus albus</i>		8. 58				1
鲫 <i>Carassius auratus</i>	12. 15	12. 99	10. 25	12. 48	9. 17	5
间下鱈 <i>Hyporhamphus intermedius</i>	13. 92					1
鲤 <i>Cyprinus (Cyprinus) carpio</i>	14. 34	10. 55	9. 17	13. 31	11. 24	5
鲢 <i>Hypophthalmichthys molitrix</i>		10. 48	10. 65	10. 78	13. 47	4
麦穗鱼 <i>Pseudorasbora parva</i>		12. 02			13. 73	2
泥鳅 <i>Misgurnus anguillicaudatus</i>			11. 38			1
拟尖头鲌 <i>Culter oxycephaloides</i>	14. 98	15. 99	14. 76	15. 41	15. 57	5
鲢 <i>Silurus asotus</i>	13. 31	13. 63	12. 57	13. 47	14. 32	5
翘嘴鲌 <i>Culter alburnus</i>	15. 38	14. 14	14. 54	13. 99	17. 77	5
青梢鲌 <i>Erythroculter dabryi</i>		14. 86	14. 65	15. 84	14. 23	4
蛇鲻 <i>Saurogobio dabryi</i>	11. 48	12. 17		15. 84	11. 77	4
似鳊 <i>Pseudobrama simoni</i>	10. 45	10. 58	10. 15	11. 30	11. 19	5
铜鱼 <i>Coreius heterodon</i>		14. 68	16. 48	18. 19	18. 90	4
瓦氏黄颡鱼 <i>Pelteobagrus vachelli</i>	14. 72	13. 39	12. 77	13. 16	13. 33	5
乌鳊 <i>Channa argus</i>					10. 35	1
胭脂鱼 <i>Myxocyprinus asiaticus</i>				9. 13	9. 66	2
岩原鲤 <i>Procypris rabaudi</i>					10. 77	1
银鲌 <i>Squalidus argentatus</i>	13. 65	12. 34	11. 99	13. 48	13. 64	5
银鲃 <i>Pseudolaubuca sinensis</i>	14. 63	12. 89	14. 48	11. 37		4
鳊 <i>Aristichthys nobilis</i>		12. 21	11. 68	16. 00	16. 80	4
圆口铜鱼 <i>Coreius guichenoti</i>					11. 81	1
长鳍吻鲌 <i>Rhinogobio ventralis</i>					11. 38	1
长吻鲌 <i>Leiocassis longirostris</i>				18. 23	17. 13	2
中华鲮 <i>Rhodeus sinensis</i>		9. 92	9. 61		11. 36	3
子陵吻虾虎鱼 <i>Rhinogobius giurinus</i>	13. 19	12. 60	11. 68		11. 84	4
总 计	13. 66	12. 81	12. 01	13. 43	12. 93	121

表 4 不同江段相同鱼碳氮稳定性同位素比较

Tab. 4 $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ value comparison of the same species at each site

对比江段	种类数	$\delta^{13}\text{C}$				$\delta^{15}\text{N}$			
		均值	检验值	自由度	显著性	均值	检验值	自由度	显著性
		Mean	t	df	Sig(P)	Mean	t	df	Sig(P)
渠口 - 养鹿	16	-0. 20	-0. 45	15	0. 656	0. 55	1. 53	15	0. 146
渠口 - 高阳	14	-0. 68	-1. 07	13	0. 306	1. 55	4. 28	13	0. 001
渠口 - 黄石	14	-0. 39	-1. 17	13	0. 263	0. 48	0. 75	13	0. 467
渠口 - 双江	14	-0. 31	-0. 61	13	0. 554	0. 59	0. 96	13	0. 355
养鹿 - 高阳	20	0. 03	0. 06	19	0. 953	0. 55	2. 27	19	0. 035
养鹿 - 黄石	19	0. 12	0. 33	18	0. 742	-0. 61	-1. 37	18	0. 188
养鹿 - 双江	21	0. 86	1. 72	20	0. 100	-0. 67	-1. 36	20	0. 188
高阳 - 黄石	18	0. 09	0. 21	17	0. 834	-0. 75	-1. 56	17	0. 138
高阳 - 双江	20	0. 83	1. 38	19	0. 182	-1. 42	-3. 51	19	0. 002
黄石 - 双江	21	0. 78	1. 57	20	0. 133	-0. 09	-0. 22	20	0. 831

表 5 小江流域各江段鱼类相对营养级

Tab.5 Trophic level of fish species at each site in Xiaojiang River

种 类	营 养 级					
	渠口	养鹿	高阳	黄石	双江	平均
草鱼 <i>Ctenopharyngodon idellus</i>			1.42	2.41	2.61	2.15
泥鳅 <i>Misgurnus anguillicaudatus</i>			2.66			2.66
胭脂鱼 <i>Myxocyprinus asiaticus</i>				2.54	2.82	2.68
黄鳝 <i>Monopterus albus</i>		2.76				2.76
中华鲮 <i>Rhodeus sinensis</i>		3.16	2.14		3.31	2.87
黑尾鱼 <i>Liobagrus nigricauda</i>			2.51	2.60	3.73	2.95
乌鳢 <i>Channa argus</i>					3.02	3.02
鳊 <i>Parabramis pekinensis</i>					3.02	3.02
似鳊 <i>Pseudobrama simoni</i>	3.31	3.35	2.30	3.18	3.26	3.08
赤眼鳟 <i>Squaliobarbus curriculus</i>	4.44	3.92	2.74	2.25	2.32	3.13
岩原鲤 <i>Procypris rabaudi</i>					3.14	3.14
鲢 <i>Hypophthalmichthys molitrix</i>		3.32	2.44	3.03	3.94	3.18
鲫 <i>Carassius auratus</i>	3.81	4.06	2.33	3.53	2.67	3.28
长鳍吻鲈 <i>Rhinogobio ventralis</i>					3.32	3.32
鲤 <i>Cyprinus (Cyprinus) carpio</i>	4.46	3.34	2.01	3.77	3.28	3.37
圆口铜鱼 <i>Coreius guichenoti</i>					3.45	3.45
花斑副沙鳅 <i>Parabotia fasciata</i>		4.09	2.86			3.47
子陵吻虾虎鱼 <i>Rhinogobius giurinus</i>	4.12	3.94	2.75		3.46	3.57
黄颡鱼 <i>Pelteobagrus fulvidraco</i>	3.78	4.15	2.49		3.99	3.60
厚颌鲂 <i>Megalobrama pellegrini</i>		3.61				3.61
华鳊 <i>Sarcocheilichthys sinensis</i>					3.71	3.71
银鲌 <i>Squalidus argentatus</i>	4.25	3.87	2.84	3.82	3.98	3.75
银鲃 <i>Pseudolaubuca sinensis</i>	4.54	4.03	3.57	3.20		3.84
蛇鲈 <i>Saurogobio dabryi</i>	3.61	3.82		4.52	3.44	3.85
鲇 <i>Silurus asotus</i>	4.15	4.25	3.01	3.82	4.19	3.88
瓦氏黄颡鱼 <i>Pelteobagrus vachelli</i>	4.57	4.18	3.07	3.73	3.89	3.89
麦穗鱼 <i>Pseudorasbora parva</i>		3.77			4.01	3.89
鲮 <i>Hemiculter leucisculus</i>	3.91					3.91
鳊 <i>Aristichthys nobilis</i>		3.83	2.75	4.56	4.92	4.01
光泽黄颡鱼 <i>Pelteobagrus nitidus</i>	4.36	4.18	3.27	4.01	4.36	4.04
青梢鲌 <i>Erythroculter dabryi</i>		4.61	3.62	4.52	4.16	4.23
鳊 <i>Siniperca chuatsi</i>	5.04	4.46	3.25	4.29	4.59	4.33
间下鱈 <i>Hyporhamphus intermedius</i>	4.33					4.33
翘嘴鲌 <i>Culter alburnus</i>	4.76	4.40	3.59	3.97	5.20	4.38
鳊 <i>Elopichthys bambusa</i>		4.62		4.31	4.24	4.39
拟尖头鲌 <i>Culter oxycephaloides</i>	4.64	4.94	3.65	4.39	4.55	4.44
大鳍鲈 <i>Mystus macropterus</i>	4.53	4.91		4.69		4.71
铜鱼 <i>Coreius heterodon</i>		4.56	4.16	5.21	5.53	4.86
长吻鲈 <i>Leiocassis longirostris</i>				5.22	5.01	5.12
总 计	4.26	4.00	2.84	3.81	3.78	

营养传递途径,浮游营养传递途径占比相对较低 (Vander & Vadeboncoeur,2002;Vadeboncoeur et al, 2011;李云凯和贡艺,2014)。

氮通过大气与地表径流进入水体被初级生产者 和微生物利用后通过食物网进入动物组织,通过排 泄和分解作用重新返回水体 (Robinson,2001)。颗 粒有机物的组成通常包括浮游植物、其他微小生物 和有机碎屑 (Xu et al,2005)。水域地理位置、流域 植被类型及人类活动污染物排放等均会影响颗粒有 机物 $\delta^{15}\text{N}$,继而影响食物网中其他生物的 $\delta^{15}\text{N}$ (Ca- bana & Rasmussen,1996;Bannon & Roman,2008)。 小江流域高阳江段的颗粒有机物 $\delta^{15}\text{N}$ 明显高于养

鹿、黄石和双江江段,而同种鱼在小江流域高阳江段的 $\delta^{15}\text{N}$ 显著高于养鹿、渠口和双江江段,与颗粒有 机物 $\delta^{15}\text{N}$ 体现出相似的特征。这是因为高阳江段 相对养鹿、渠口和黄石江段人口和人类活动更为密 集。此外,双江江段虽较高阳江段人口更为密集,但 三峡库区干流的交汇对颗粒有机物的 $\delta^{15}\text{N}$ 产生了一 定的稀释效应。在 39 种鱼中,草鱼的 $\delta^{15}\text{N}$ 值最 低,而长吻鲈的 $\delta^{15}\text{N}$ 值最高,超过草鱼 $\delta^{15}\text{N}$ 值的 2 倍,体现了由草食性鱼类至肉食性鱼类随着营养级 升高的 $\delta^{15}\text{N}$ 富集 (Fry,2007)。

种间营养关系是食物网中最重要 的联系,也是 了解生态系统能流规律的基础 (Bannon & Roman,

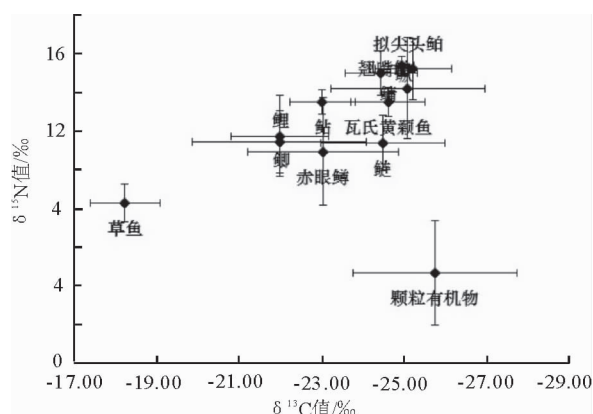


图 1 小江流域主要经济鱼类相对营养位置

Fig.1 Relative trophic levels of the primary economic fish species in Xiaojiang River

2008)。消费者和饵料生物间的 $\delta^{15}\text{N}$ 差异由氮同位素分馏引起,随着营养级增加不断增加。本研究得出小江流域食物网中至少为 4 个营养级,这与 Wangtzen 等(2002)在湖泊生态系统中相关研究的结果一致。然而,李斌等(2013)研究小江库湾在枯水期和丰水期均有 3 个营养级,比本研究结果少 1 个营养级。造成该差异的原因可能与 $\delta^{15}\text{N}$ 基线生物的选择及研究样本的大小有关 (Persson et al, 1992; 徐军等, 2010)。本研究中选取颗粒有机物作为基线生物,李斌等(2013)的研究采用枯水期螺类和蚌类 $\delta^{15}\text{N}$ 值的平均值作为基线值,螺类和蚌类比颗粒有机物至少高 1 个营养级;另外,本研究的鱼类样本种类(39 种)和数量(121 尾)均高于李斌等(2013)的鱼类样本种类(17 种)和数量(49 尾),高营养层次鱼类的取样也相对全面。

本文利用稳定同位素 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$ 对三峡水库支流小江流域采集到的 39 种鱼样本进行了营养层次分析,结果反映了该流域主要鱼类间的相对营养关系,对流域主要渔业种类的选择有一定的参考价值。研究表明,基线生物的选择与陆源营养物质的输入应为水域生态系统营养层次分析中值得注意的关键因素;此外,对鱼类而言,其生活史不同阶段体内稳定同位素的差异也应纳入考量中。为获取水域渔业营养结构的完整数据,下一步将对目标渔业种类各饵料生物类群包括浮游动植物、水生植物、底栖生物等开展稳定同位素研究,以进一步确定其食物组成,并将研究结果应用于渔业模型构建,以量化食物网中的营养关系、物质循环和能量流动特征,为三峡水库生态系统的保护与生态修复、渔业资源的合理开发利用提供依据。

参考文献

- 长江水利委员会长江勘测规划设计研究院, 2004. 三峡库区小江(澎溪河)流域生态环境综合整治工程可行性研究报告[R]. 武汉: 57-85.
- 邓华堂, 段辛斌, 刘绍平, 等, 2014. 大宁河下游主要鱼类营养结构的时空变化[J]. 生态学报, 34(23): 7110-7118.
- 郭劲松, 陈杰, 李哲, 等, 2008. 156m 蓄水后三峡水库小江回水区春季浮游植物调查及多样性评价[J]. 环境科学, 29(10): 2710-2715.
- 李斌, 江星, 王志坚, 等, 2011. 三峡库区蓄水后小江鱼类资源现状[J]. 淡水渔业, 41(6): 37-42.
- 李斌, 王志坚, 杨洁萍, 等, 2013. 三峡库区干流鱼类食物网动态及季节性变化[J]. 水产学报, 37(7): 1015-1022.
- 李斌, 徐丹丹, 王志坚, 等, 2013. 三峡库区小江库湾鱼类食物网的稳定 C、N 同位素分析[J]. 生态学报, 33(20): 6704-6711.
- 李由明, 黄翔鹄, 刘楚吾, 2007. 碳氮稳定同位素技术在动物食性分析中的应用[J]. 广东海洋大学学报, 27(4): 99-103.
- 李云凯, 贡艺, 2014. 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, 33(6): 1-6.
- 李哲, 方芳, 郭劲松, 等, 2009. 三峡小江回水区段 2007 年春季水华与营养盐特征[J]. 湖泊科学, 21(1): 36-44.
- 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[J]. 生态学报, 25(11): 3052-3060.
- 王玉玉, 于秀波, 张摇亮, 等, 2009. 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, 29(3): 1181-1188.
- 徐军, 张敏, 谢平, 2010. 氮稳定同位素基准的可变性及对营养级评价的影响[J]. 湖泊科学, 22(1): 8-20.
- Bannon RO, Roman CT, 2008. Using stable isotopes to monitor anthropogenic nitrogen inputs to estuaries [J]. Ecological Applications, 18(1): 22-30.
- Beaudoin CP, TomWM, PrepasEE, et al, 1999. Individuals specialization and trophic adapt ability of northern pike (*Esox lucius*): an isotope dietary analysis [J]. Oecologia, 120: 386-396.
- Cabana G, Rasmussen JB, 1996. Comparison of aquatic food chains using nitrogen isotopes [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 93(20): 10844-10847.
- Craig H, 1957. Isotopic standards for carbon and oxygen and correction factors for mass spectrometric analysis of carbon dioxide [J]. Geochim Cosmochim Acta, 12: 133-149.

- Deniro MJ, Epstein S, 1978. Influence of diet on the distribution of carbon isotopes in animals [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 42: 495–506.
- Findlay S, Sinsabaugh RL, Fischer DT, et al, 1998. Sources of dissolved organic carbon supporting planktonic bacterial production in the tidal freshwater Hudson River [J]. *Ecosystems*, 1(3): 227–239.
- Fry B, 2007. *Stable Isotope Ecology* [M]. London: Springer.
- Gannes LZ, O'Brien DM, Dribo CM, 1997. Stable isotopes in animal ecology: Assumptions, caveats, a call for more laboratory experiments [J]. *Ecology*, 78: 1271–1276.
- Guzzo MM, Haffner GD, Sorge S, et al, 2011. Spatial and temporal variabilities of $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ within lower trophic levels of a large lake: implications for estimating trophic relationships of consumers [J]. *Hydrobiologia*, 675: 41–53.
- Mariotti A, 1983. Atmospheric nitrogen is a reliable standard for natural ^{15}N abundance measurements [J]. *Nature*, 303: 685–687.
- Miyake Y, Wade E, 1967. The abundance ratio of $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$ in marine environments [C]//文部省日本国内ユネスコ委員会. *Records of Oceanographic Works in Japan*, 9: 32–59.
- Persson L, Didhl S, Johansson L, et al, 1992. Trophic interactions in temperate lake ecosystems—a test of food-chain theory [J]. *The American Naturalist*, 140(1): 59–68.
- Peterson BJ, Fry B, 1987. Stable isotopes in ecosystem studies [J]. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 18: 293–320.
- Post DM, Pace ML, Hairston NG, 2000. Ecosystem size determines food-chain length in lakes [J]. *Nature*, 405: 1047–1049.
- Post DM, 2002. Using stable isotopes to estimate trophic position: models, methods, and assumptions [J]. *Ecology*, 83: 703–718.
- Raymond PA, Bauer JE, 2001. Riverine export of aged terrestrial organic matter to the North Atlantic Ocean [J]. *Nature*, 409: 497–500.
- Robinson D, 2001. $\delta^{15}\text{N}$ as an integrator of the nitrogen cycle [J]. *Trends in Ecology and Evolution*, 16: 153–162.
- Vadeboncoeur Y, McIntyre PB, Vander Zanden MJ, 2011. Borders of biodiversity: Life at the edge of the world's large lakes [J]. *BioScience*, 61: 526–537.
- Vander Zanden MJ, Vadeboncoeur Y, 2002. Fishes as integrators of benthic and pelagic food webs in lakes [J]. *Ecology*, 83: 2152–2161.
- Vannote RL, Minshall GW, Cummins KW, et al, 1980. The river continuum concept [J]. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 37(1): 130–137.
- Wangtzen KM, Machado FA, Voss M, 2002. Seasonal isotopic shifts in fish of the Pantanal wetland, Brazil [J]. *Aquatic Sciences*, 64(3): 239–251.
- Xu J, Xie P, Zhang M, et al, 2005. Variation in stable isotope signatures of season and a zooplanktivorous fish in a eutrophic Chinese lake [J]. *Hydrobiologia*, 541: 215–220.

(责任编辑 张俊友)

Determination of Fish Trophic Level in Xiaojiang River of Three Gorges Reservoir by Stable Carbon and Nitrogen Isotope Analysis

SHI Fang, CHEN Xiao-juan, YANG Zhi, QUE Yan-fu, TANG Hui-yuan

(Key Laboratory of Ecological Impacts of Hydraulic-Projects and Restoration of Aquatic Ecosystem of Ministry of Water Resources, Institute of Hydroecology, Ministry of Water Resources and Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430079, P. R. China)

Abstract: The impoundment of Three Gorges Reservoir altered fish habitat and community structure in the reservoir area. Additionally, long-term overfishing has caused the decline of fish populations and affected the sustainable development of fishery resources. The traditional fishery management system must be improved and ecosystem characteristics must be considered to support the scientific management of fishery resources and the environment in Three Gorges Reservoir. In this study, the trophic level of 39 fish species in Xiaojiang River of Three Gorges Reservoir was determined using stable carbon and nitrogen isotope analysis. Samples were collected from May to June of 2013 in the Qukou, Yanglu, Gaoyang, Huangshi and Shuangjiang sections of Xiaojiang River, including 121 fish representing 39 species and 15 samples of particle organic matter (POM). The $\delta^{13}\text{C}$ values of POM samples ranged from -28.29‰ to -24.19‰, with a mean value of $(-25.75 \pm 1.98)\text{‰}$, and those for $\delta^{15}\text{N}$ ranged from 1.40‰ to 6.97‰, with a mean value of $(4.67 \pm 2.70)\text{‰}$. The $\delta^{13}\text{C}$ value of POM decreased upstream from the estuary, but the $\delta^{13}\text{C}$ value for fish of the same species did not differ significantly with location, indicating that POM was not the main energy source for the Xiaojiang River food web. The $\delta^{15}\text{N}$ value of POM in Gaoyang was higher than Yanglu, Huangshi and Shuangjiang, while $\delta^{15}\text{N}$ values for fish of the same species in Gaoyang was significantly higher than that of Yanglu, Qukou and Shuangjiang, probably related to the intensity of human activity at each site. There were at least four trophic levels identified in the Xiaojiang River food web and relative trophic levels in the fish community ranged from 2.15 to 5.12. Grass carp was at the lowest trophic level among the primary economic fish species. Most fish species were omnivorous with trophic levels ranging from 2.66 to 3.85. Fish species with a trophic level above 3.85 are carnivorous and *Leiocassis longirostris* was at the highest trophic level among the primary economic fish species with a trophic level of 5.12. The mean value of the trophic level at each section ranged from 2.84 to 4.26 with the lowest mean trophic level at Gaoyang and the highest at Qukou. The results of this study reflect the nutritional relationships among the primary fish species in the Xiaojiang River basin and provide a reference for the selection of primary fish species in the river basin.

Keywords: fish species; trophic level; stable isotopes; Xiaojiang River; Three Gorges Reservoir