

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

王玉玉^{1,2}, 于秀波^{1,*}, 张 亮¹, 徐 军³

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100049;
3. 中国科学院水生生物研究所, 武汉 430072)

摘要: 稳定碳、氮同位素比值分析技术是研究生态系统中物质循环与能量流动的有效技术。 $\delta^{13}\text{C}$ 值常用来分析消费者食物来源, $\delta^{15}\text{N}$ 值常用来确定生物在食物网中的营养位置。应用稳定同位素技术分析了鄱阳湖北部湖口县、都昌县、星子县、吴城镇 4 个采样点 95 条鱼和其他食物网成分样品的碳、氮稳定同位素比值, 构建了鄱阳湖枯水末期水生食物网。结果表明, 不同水域颗粒有机物(POM)的 $\delta^{13}\text{C}$ 值不同, 范围为 $-27.5\text{‰} \sim -24.6\text{‰}$ 可以区分赣江、修水、鄱阳湖、长江和鄱阳湖湖交汇处水体的颗粒有机物特征。江西鄱阳湖国家级自然保护区受人类活动干扰少, 核心区生物 $\delta^{15}\text{N}$ 相对较低, 而周边人类活动频繁的星子、都昌两县附近水域生物体内的 $\delta^{15}\text{N}$ 偏高, 反映了人类活动引起的营养输入对系统的影响。在湖区不同位置捕获的相同品种水生生物 $\delta^{13}\text{C}$ 值不同, 反映了其不同的食物来源, 用 $\delta^{15}\text{N}$ 值计算发现其所占据的相对营养位置较为一致。

关键词: 食物网; 鄱阳湖; $\delta^{13}\text{C}$; $\delta^{15}\text{N}$; 人类活动

文章编号: 1000-0933(2009)03-1181-08 中图分类号: Q145 文献标识码: A

Food web structure of Poyang Lake during the dry season by stable carbon and nitrogen isotopes analysis

WANG Yu-Yu^{1,2}, YU Xiu-Bo^{1,*}, ZHANG Liang¹, XU Jun³

1 Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

2 Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

3 Institute of Hydrobiology, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430072, China

Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(3): 1181 ~ 1188.

Abstract: Stable isotopes analysis, especially carbon and nitrogen, are now commonly used to study material circulation and energy flow within ecosystems. Carbon isotope ratios ($\delta^{13}\text{C}$) are used to trace food sources of consumers, while nitrogen isotope ratios ($\delta^{15}\text{N}$) are mainly used to quantify trophic levels of organisms. In this study 95 fish and other food web components from 4 sampling sites: Houkou County, Duchang County, Xingzi County and Wucheng Town, at north Poyang Lake in dry season were used as samples and their stable carbon and nitrogen isotope ratios were analyzed in laboratory. The results of carbon isotopic analyses, ranged from $-27.5\text{‰} \sim -24.6\text{‰}$, indicated the $\delta^{13}\text{C}$ values of particulate organic matter(POM) could identify different water sources in Ganjiang River, Xiushui River, Poyang Lake and the mixed area of Poyang Lake and Yangtze River. $\delta^{15}\text{N}$ values in organisms in the heart of Poyang Lake national nature reserve were lower than those recorded in Xingzi and Duchang counties which were frequently disturbed by human activities i. e anthropogenic sewage increased $\delta^{15}\text{N}$ in the ecosystem. The $\delta^{13}\text{C}$ values of the same species of aquatic organism varied in different areas of the lake, however their relative trophic levels were similar according to the calculation of $\delta^{15}\text{N}$ values.

基金项目: 国家科技支撑计划资助项目(2006BAC08B05); 国家科技部国际合作重大资助项目(2006DFB91920)

收稿日期: 2008-07-03; **修订日期:** 2008-12-03

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: yuxb@igsrr.ac.cn

Key Words: stable isotopes; Poyang Lake; $\delta^{13}\text{C}$; $\delta^{15}\text{N}$; anthropogenic activity

水域生态系统中的物质循环和能量流动过程一直是生态学研究中的热点问题^[1~3]。研究生态系统食物网的传统方法主要是食性分析,该技术主要反映的是短期取食结果。胃含物中通常存在的是难以消化的食物,实际消化吸收的物质难以分辨,且采集到的很多样品中胃含物已排空或半排空,同时在研究小型动物方面存在困难,因而食性分析结果需要校正。测定生物体内天然存在的碳($\delta^{13}\text{C}$)、氮($\delta^{15}\text{N}$)稳定同位素比值变化可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^[1,2,4]。稳定同位素分析技术的优点是可以定量研究,如生物杂食性、外源物质输入、物种入侵、人类活动导致的污染物排放等问题对食物网结构与功能的影响^[2,5]。

应用稳定同位素技术分析水域生态系统食物网结构在国外开展较为广泛,国内的研究也已起步。Post 等人对美国 25 个湖泊初级消费者营养位置进行了分析,并分析了影响食物链长度的因素^[6,7]。Vander Zanden 等人对加拿大 14 个湖泊影响消费者 $\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{15}\text{N}$ 值及食物链长度主要因素进行了分析,并分析了全球水生生态系统食物链长度,其中湖泊的食物链长度约为 4^[8,9]。Xu 等人利用稳定碳、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,揭示了外来营养物质输入是导致大型水生植物稳定同位素值升高的原因^[10~12]。Zhang 等人应用稳定同位素分析技术研究了长江三峡江段食物网结构,并分析了浮游食性鱼类与颗粒有机物(POM)的关系^[12]。Cai 等人^[14~17]与 Wan 等人^[18]应用碳、氮稳定同位素技术研究了崂山湾、渤海湾、黄东海等海洋生态系统营养关系和食物网结构。目前国内尚无关于通江湖泊鄱阳湖、洞庭湖食物网结构的稳定同位素研究。

鄱阳湖渔业长期以天然捕捞为主,捕捞强度大,加上人类活动导致的鄱阳湖流域土地利用方式变化,生物多样性锐减,需要开展上述人类活动对生态系统结构和功能的影响的研究。针对鄱阳湖面临的水环境污染与水生生物多样性锐减等问题,本文的研究目的是应用碳、氮稳定同位素技术重点探讨鄱阳湖枯水末期食物网的中生物营养位置及湖区不同地点水生食物网的差异。

1 研究地点和方法

1.1 研究区概况

鄱阳湖(N28°22'~29°45', E115°47'~116°45')是我国第一大淡水湖,是大型过水性、季节性湖泊,地处江西省的北部,是长江流域最大的通江湖泊和国际重要湿地,分为南北鄱阳湖两部分,北鄱阳湖为入江水道,南鄱阳湖为主湖体,接纳赣江、抚河、修水、饶河、信江五河来水,调蓄后经湖口注入长江^[19,20]。湖区复杂的水陆交替环境为多种生物提供了栖息地,为长江洄游鱼类和本地种提供了产卵和育幼的场所,也是候鸟的重要越冬地,现有各级自然保护区 15 处,其中国家级 2 个,省级 3 个。湖区农业、渔业捕捞、工业等人类生产活动干扰较为强烈。枯水期一般是 10 月至翌年 3 月份,洪枯水位湖体的面积相差 10 多倍。鄱阳湖已记载的鱼类有 140 种,隶属于 21 科,主要是鲤科,有 75 种。湿生植被优势种主要是藨草(*Carex* spp.)、沉水植物主要是马来眼子菜(*Potamogeton malaianus*)、苦草(*Vallisneria spiralis*)和黑藻(*Hydrilla verticillata*)^[19,20]。

本研究于 2008 年 3 月 5~20 日在鄱阳湖北部湖区开展采样工作。采样点分布在鄱阳湖北部入江水道沿岸的湖口县、都昌县、星子县、吴城镇,研究区域水位年际变化大,水陆交替出现(图 1)。鄱阳湖水在湖口注入长江,沿入江水道上游在星子和都昌附近水域采样,其中吴城镇采样点位于江西鄱阳湖国家级自然保护区大湖池内。

1.2 样品采集与测定

鱼类样品主要是通过设置网具和从渔民的渔获物中获得^[11,21]。取其背部肌肉,冷冻保存,带回实验室在 55℃ 下连续烘干至恒重,使用研钵研碎成均匀粉末,干燥保存。底栖动物蚌和螺去壳取肌肉烘干至恒重,用研钵研成粉末,干燥保存。植物样品采集后洗净烘干,研碎待测。在各采样点采上中下层水混合后用 GF/C 滤膜过滤水样获得 POM 样品,冷冻保存,在实验室使用 1 mol/L 盐酸酸化去除碳酸盐的影响,后用去离子水冲洗

烘干,用研钵充分磨碎^[20]。其中在吴城镇大湖池采集鄱阳湖国家级保护区核心区和流经该镇的修水、赣江北支水样 POM 样品各 2 个,在湖口鄱阳湖水域采集样品 3 个,长江和鄱阳湖湖交汇处样品 2 个,其余两地各采集 3 个。所有样品均使用美国 Thermo 公司的 MAT 253 稳定同位素比值分析仪(中国科学院地理科学与资源研究所)分析,SE ±0.3‰,碳稳定同位素测定的标准物质是美洲拟箭石(PDB),氮稳定同位素分析的标准物质是纯化的大气中的 N₂,每测 20 个样品插入测定 1 个标准样品。

2 结果与分析

2.1 样品分析

在 4 个采样点共采集鱼类 25 种 95 尾,分别隶属于 5 目 9 科 13 属,其中有鲤科 13 属 15 种,为优势种^[22,23],共采集底栖动物贝类 7 种 13 个,另外还有秀丽白虾(*Exopalaemon modestus*)、日本沼虾(*Macrobrachium nipponense*)各 5 只、中华绒螯蟹(*Eriocheir sinensis*)1 只。共测定样品 139 个,其中颗粒有机物(POM)样品 16 个。湖泊定居型鱼类瓦氏黄颡鱼(*Pelteobagrus vachelli*)是唯一在 4 个采样点都出现的物种,现已成为鄱阳湖渔获物的重要组成部分^[20]。由于湖区采砂等经济活动频繁本次随机采样中水生维管束植物样品难以获得。虽然由于采样处在春季气温较低,鱼类活动少,但与历史资料对比^[19,20,22],在各采样点采集的鱼类种类锐减,个体呈低龄化和小型化。吴城采集鱼类 9 种,星子采集 20 种,都昌 5 种,湖口 11 种,常见鱼类种数远小于历史记录。

2.2 碳稳定同位素值分析

$\delta^{13}\text{C}$ 常被用来分析生态系统中消费者的食物来源^[1,5]。本研究中 POM 样品 $\delta^{13}\text{C}$ 值范围为 -27.5‰ ~ -24.6‰,吴城保护区大湖池内 POM 值为 -24.7‰ ± 0.1‰,修水 -25.4‰ ± 0.2‰,赣江 -26.5‰ ± 0.2‰(表 1)。由于修水和赣江上游河流流经不同的地区,流域内的光照、营养物质含量和陆地植被组成不同导致水体中颗粒有机物组成由不同。湖口鄱阳湖水域 POM 值为 -27.2‰ ± 0.4‰,长江和鄱阳湖湖交汇处为 -26.1 ± 0.2‰,江湖交汇处由于有长江水注入混合而发生变化。鱼类 $\delta^{13}\text{C}$ 值范围为 -31.3‰ ~ -23.4‰,在 4 个采样点均出现的瓦氏黄颡鱼 $\delta^{13}\text{C}$ 范围 -30.0‰ ~ -27.7‰(表 2),由于瓦氏黄颡鱼取食存在杂食性,采样点分布在湖区不同水域,不同湖区自然植被和生物组成有所不同,周边城镇化发展程度也有所差别,导致其

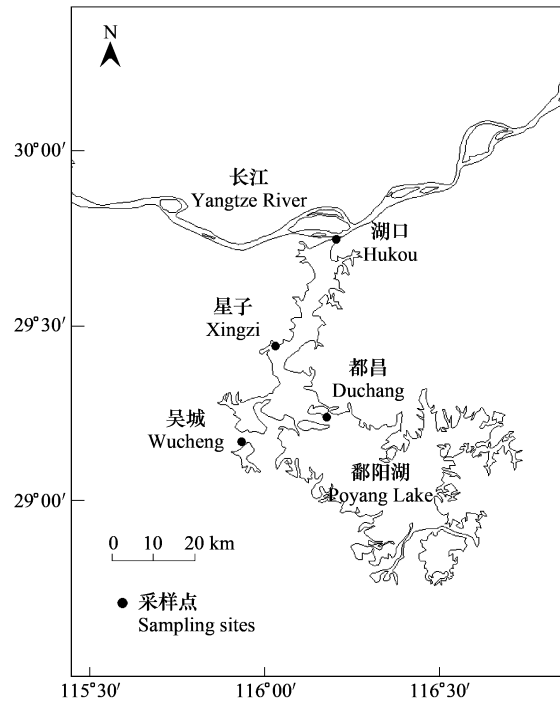


图 1 采样点分布图

Fig. 1 Map of Poyang Lake and location of sampling sites

表 1 各水域 POM 碳、氮稳定同位素值

Table 1 Stable carbon and nitrogen isotope ratio of POM in different water areas

POM	($\delta^{13}\text{C} \pm \text{SD}$)‰	($\delta^{15}\text{N} \pm \text{SD}$)‰	n
大湖池 Dahu Lake	-24.7 ± 0.7	4.2 ± 0.3	2
赣江 Gan River	-26.5 ± 0.2	7.0 ± 0.7	2
修水 Xiu River	-25.4 ± 0.2	5.3 ± 0.3	2
星子水域 Xingzi water area	-26.1 ± 0.0	4.4 ± 0.3	3
都昌水域 Duchang water area	-25.8 ± 0.2	5.7 ± 0.8	3
长江和鄱阳湖交汇处 Mixed area of Poyang Lake and Yangtze River	-26.1 ± 0.2	7.1 ± 0.1	2
长江 Yangtze River	-27.4 ± 0.0	4.0 ± 0.0	2
鄱阳湖 Poyang Lake	-27.2 ± 0.4	4.5 ± 0.4	2

体内碳稳定同位素值有差异。测定吴城水陆交错带的藁草 $\delta^{13}\text{C}$ 值为 -29.4‰ , 与当地植食性鱼类平均 $\delta^{13}\text{C}$ 值 -25.2‰ 差值为 4.2‰ , 说明藁草不是当地鱼类的主要食物来源。与资料上记载藁草群丛主要功能是作为鱼类产卵和活动的庇护所相符合^[19,20]。都昌初级消费者 5 种蚌类背瘤丽蚌 (*Lamprotula leai*), 圆顶珠蚌 (*Unio douglasiae*), 扭蚌 (*Arconaia lanceolata*), 鱼尾楔蚌 (*Cuneopsis pisciculus*), 洞穴丽蚌 (*Lamprotula caveatal*) $\delta^{13}\text{C}$ 值变化范围为 $-26.1\text{‰} \sim -25.5\text{‰}$ ($\text{SD} = 0.18\text{‰}$, $n = 9$), 与其取食范围较固定, 个体寿命较长有关, 多年生初级消费者的稳定同位素值反映的是其长期生存的环境本底值, 可避免短期变化的影响^[1]。稳定碳同位素分析可以帮助确定分析营养级的基准物的选择。

2.3 氮稳定同位素值与环境的关系

仅含有大气沉降氮的地下水 $\delta^{15}\text{N}$ 值较低, 而人类活动所排放的污水中硝化和反硝化作用导致其中 $\delta^{15}\text{N}$ 值增高, 分析氮稳定同位素比值可以用来监测人类活动对水生生态系统的影响^[1,2,24~26]。在鄱阳湖北部四个采样点 POM $\delta^{15}\text{N}$ 范围为 $4.0\text{‰} \sim 7.5\text{‰}$, 吴城自然保护区水域采样点 POM $\delta^{15}\text{N}$ 为 4.3‰ , 低于流经吴城镇的修水 POM $\delta^{15}\text{N}$ 5.3‰ 、赣江北支 POM $\delta^{15}\text{N}$ 7.0‰ (表 3)。由于赣江北支流经永修县, 当地没有污水处理设施, 生活污水多直接就近排入赣江, 致使 POM $\delta^{15}\text{N}$ 值升高, 枯水期更为突出。永修县境内修水航运较发达, 人类活动将大量污水排入河水中使得修水 POM $\delta^{15}\text{N}$ 值较流经该地的赣江北支高。湖口长江和鄱阳湖交汇处由于长江水的注入使其 POM $\delta^{15}\text{N}$ 均值 7.4‰ 高于鄱阳湖区 4.5‰ 。瓦氏黄颡鱼的 $\delta^{15}\text{N}$ 值 $9.1\text{‰} \sim 12.1\text{‰}$ 在 4 个采样点不同一方面由于湖泊通江水体交换和流动性大导致各采样点其食物体内值 $\delta^{15}\text{N}$ 不同, 另一方面由于鱼类取食活动范围大导致^[26]。

表 2 鱼类、底栖动物、水生植物 $\delta^{13}\text{C}$ 值
Table 2 $\delta^{13}\text{C}$ value of selected fish, zoobenthos, macrophytes

	($\delta^{13}\text{C} \pm \text{SD}$) ‰ (n)			
	吴城 Wucheng	星子 Xingzi	都昌 Duchang	湖口 Hukou
植物 Plant				
竹叶眼子菜 <i>Potamogeton malaianus</i>			$-15.6 \pm 0.7(2)$	$-23.5 \pm 1.0(1)$
底栖动物 Zoobenthos				
中华圆田螺 <i>Cipangopaludina cathayensis</i>	$-27.1 \pm 0.9(3)$		$-24.8 \pm 0.3(3)$	
节肢动物 Arthropod				
日本沼虾 <i>Macrobrachium nipponense</i>		$-27.9 \pm 0.1(2)$		$-25.2 \pm 2.1(3)$
秀丽白虾 <i>Exopalaemon modestus</i>		$-24.4 \pm 2.0(2)$		$-24.7 \pm 0.9(3)$
鱼类 Fish				
短颌鲚 <i>Coilia brachygnathus</i>		$-29.5 \pm 0.7(2)$		$-28.1 \pm 0.9(3)$
草鱼 <i>Ctenopharyngodon idellus</i>	$-24.4 \pm 1.4(2)$		$-23.9 \pm 2.2(2)$	
鳊 <i>Hemiculter leucisculus</i>	$-28.1(1)$	$-27.2(1)$	$-25.7 \pm 1.4(3)$	
鳊 <i>Parabramis pekinensis</i>	$-25.9 \pm 0.0(2)$		$-28.1(1)$	
黑鳍鲈 <i>Sarcocheilichthys nigripinnis</i>		$-29.3 \pm 1.3(2)$	$-28.0(1)$	
蛇鮈 <i>Saurogobio dabryi</i>		$-25.6 \pm 0.9(2)$		$-25.0 \pm 0.6(3)$
鲤 <i>Cyprinus carpio</i>		$-26.7 \pm 1.4(2)$	$-24.4(1)$	
鲫 <i>Carassius auratus</i>	$-26.4 \pm 0.7(4)$	$-29.9 \pm 1.6(2)$	$-26.9 \pm 0.7(3)$	
花斑副沙鳅 <i>Parabotia fasciata</i>		$-25.2(1)$		$-29.9(1)$
鲢 <i>Silurus asotus</i>	$-26.8 \pm 0.2(3)$	$-28.0 \pm 0.0(3)$	$-25.6 \pm 2.2(3)$	
瓦氏黄颡鱼 <i>Pelteobagrus vachelli</i>	$-27.7(1)$	$-29.6 \pm 0.5(2)$	$-28.2(1)$	$-29.4(1)$
光泽黄颡鱼 <i>Pelteobagrus nitidus</i>	$-26.9 \pm 1.2(2)$	$-27.6 \pm 0.0(2)$		$-24.4 \pm 0.3(2)$
鳊 <i>Siniperca chuatsi</i>	$-26.4 \pm 0.5(4)$	$-28.7 \pm 0.3(2)$		

2.4 营养位置

营养级关系是群落内各生物成员之间最重要的联系, 是群落赖以生存的基础, 也是了解生态系统能量流动的核心。消费者和食物间的 $\delta^{15}\text{N}$ 差异就是营养级馏 (trophic fractionation) 值随着营养级增加 $\delta^{15}\text{N}$ 值不断增加, 不同营养级间的 ^{15}N 富集值的平均值为 3.4‰ ^[1,6]。

营养级计算公式:

$$TL = \frac{\delta^{15}N_{\text{consumer}} - \delta^{15}N_{\text{baseline}}}{\delta^{15}N} + \lambda \quad (1)$$

式中, $\Delta\delta^{15}N = 3.4\text{‰}$ ^[1,6], 当 baseline 是生产者时, $\lambda = 1$; 当 baseline 是初级消费者时, $\lambda = 2$ ^[6]。

表 3 鱼类、底栖动物、水生植物 $\delta^{15}N$ 值
Table 3 $\delta^{15}N$ value of selected fish, zoobenthos, macrophytes

	($\delta^{15}N \pm SD$) ‰			
	吴城 Wucheng	星子 Xingzi	都昌 Duchang	湖口 Hukou
植物 Plant				
竹叶眼子菜 <i>Potamogeton malaianus</i>			8.4 ± 0.5	2.3 ± 0.8
底栖动物 Zoobenthos				
中华圆田螺 <i>Cipangopaludina cathayensis</i>	6.1 ± 0.9		13.0 ± 0.9	
节肢动物 Arthropod				
日本沼虾 <i>Macrobrachium nipponense</i>		14.3 ± 0.5		13.0 ± 1.5
秀丽白虾 <i>Exopalaemon modestus</i>		14.7 ± 0.3		14.4 ± 1.5
鱼类 Fish				
短颌鲚 <i>Coilia brachygnathus</i>		15.4 ± 0.3		14.8 ± 0.1
草鱼 <i>Ctenopharyngodon idellus</i>	6.2 ± 0.2		11.2 ± 0.7	
鳊 <i>Hemiculter leucisculus</i>	9.2	8.9	11.8 ± 0.5	
鳊 <i>Parabramis pekinensis</i>	8.4 ± 0.0		15.2	
黑鳍鳊 <i>Sarcocheilichthys nigripinnis</i>		12.0 ± 0.3	13.8	
蛇鮈 <i>Saurogobio dabryi</i>		11.1 ± 0.9		11.5 ± 0.8
鲤 <i>Cyprinus carpio</i>		10.6 ± 0.1	13.7	
鲫 <i>Carassius auratus</i>	8.1 ± 0.6	10.8 ± 0.9	12.0 ± 0.7	
花斑副沙鳅 <i>Parabotia fasciata</i>		14.8		10.2
鲢 <i>Slilurus asotus</i>	12.9 ± 1.1	13.4 ± 0.7	15.0 ± 0.9	
瓦氏黄颡鱼 <i>Pelteobagrus vachelli</i>	9.6	11.4 ± 0.5	12.0	11.6
光泽黄颡鱼 <i>Pelteobagrus nitidus</i>	12.3 ± 0.9	15.1 ± 0.5		13.9 ± 0.0
鳊 <i>Siniperca chuatsi</i>	10.4 ± 0.3	14.7 ± 0.2		

POM 包括浮游动物、浮游植物和颗粒有机物^[26], 相对于以某种浮游动物作为计算相对营养位置单一基础更加合适。在本研究中, 以 POM 作为各采样点计算时的基准物质, 即 $\lambda = 1$ 。以 POM 为基准物质计算, 发现肉食性鱼鲢 (*Slilurus asotus*) 和青梢鲌 (*Culter dadryi*) 分别占据了吴城和都昌采集到的生物中最高的营养位置 3.5 ± 0.3 和 3.8 , 而在星子和湖口偏肉食性小型鱼铜鱼 (*Coreius heterodon*) 和短颌鲚 (*Coilia brachygnathus*) 占据了最高的营养位置 4.3 ± 0.1 和 4.0 ± 0.1 (见表 4)。都昌的 5 种蚌类计算得营养级变化范围为 $2.3 \sim 2.7$ ($SD = 0.1, n = 0.9$), 这种大型初级消费者的所占据的营养位置较为固定。

3 讨论

3.1 生物相对营养位置

研究发现, 光泽黄颡鱼营养级 (*Pelteobagrus nitidus*) 比同属的瓦氏黄颡鱼高, 表明光泽黄颡鱼比瓦氏黄颡鱼更偏向摄食动物性饵料或其食物来源中动物性饵料比例更大。比较在鄱阳湖通江水道南北两侧湖口、星子、都昌附近水域中采集的秀丽白虾、日本沼虾、鲫 (*Carassius auratus*), 瓦氏黄颡鱼, 蛇鮈 (*Saurogobio dabryi*), 鲢, 黑鳍鳊 (*Sarcocheilichthys nigripinnis*) 等物种的相对营养位置, 发现差别较小, 说明使用稳定同位素技术分析生物营养位置较为准确。

3.2 $\delta^{13}C$ 值区分不同水系及其中生物食物来源

水域生态系统的碳源既包括水体内部生长的藻类、水生大型植物等, 也包括外来的如陆地植物碎屑, 流域内不同的营养本底值和周围植被组成会引起河流 POM $\delta^{13}C$ 值不同。利用稳定性碳同位素技术可以区分赣江、修水、鄱阳湖、江湖交汇处水体的 POM 不同 (表 1)。

星子采集的短颌鲚 $\delta^{13}C$ 为 $-29.5\text{‰} \pm 0.7\text{‰}$, 而湖口采集的样品 $\delta^{13}C$ 为 $-28.1\text{‰} \pm 0.9\text{‰}$, $\delta^{13}C$ 值相差 1.4‰ 说明二者的食物来源不同。由于湖口采样点位于长江和鄱阳湖交汇处, 两个采样水域的水生环境有所

不同,来自长江中的生物对湖口当地的食物网起主要影响,因此生活在其中的浮游生物 $\delta^{13}\text{C}$ 值与星子就有所不同,导致短颌鲚体内 $\delta^{13}\text{C}$ 值有差别^[1,5,18,29~32]。

表 4 鱼类、底栖动物相对营养位置
Table 4 Relative trophic level of selective fish, zoobenthos

	营养位置 Trophic level \pm SD			
	吴城 Wucheng	星子 Xingzi	都昌 Duchang	湖口 Hukou
底栖动物 Zoobenthos				
中华圆田螺 <i>Cipangopaludina cathayensis</i>	1.5 \pm 0.3		3.1 \pm 0.3	
节肢动物 Arthropod				
日本沼虾 <i>Macrobrachium nipponense</i>		3.9 \pm 0.1		3.5 \pm 0.4
秀丽白虾 <i>Exopalaemon modestus</i>		4.0 \pm 0.1		3.9 \pm 0.5
鱼类 Fish				
短颌鲚 <i>Coilia brachygnathus</i>		4.2 \pm 0.2		4.0 \pm 0.1
草鱼 <i>Ctenopharyngodon idellus</i>	1.6 \pm 0.1		2.6 \pm 0.5	
鲢 <i>Hemiculter leucisculus</i>	2.5	2.32	2.8 \pm 0.3	
鳊 <i>Parabramis pekinensis</i>	2.2 \pm 0.0		3.1	
黑鳍鳊 <i>Sarcocheilichthys nigripinnis</i>		3.2 \pm 0.2	3.4	
蛇鮈 <i>Saurogobio dabryi</i>		3.0 \pm 0.1		3.1 \pm 0.2
鲤 <i>Cyprinus carpio</i>		2.8 \pm 0.3	3.4	
鲫 <i>Carassius auratus</i>	2.1 \pm 0.2	2.9 \pm 0.0	2.8 \pm 0.2	
花斑副沙鳅 <i>Parabotia fasciata</i>		4.0		2.7
鲢 <i>Silurus asotus</i>	3.5 \pm 0.3	3.6 \pm 0.1	3.7 \pm 0.4	
瓦氏黄颡鱼 <i>Pelteobagrus vachelli</i>	2.6	3.1 \pm 0.1	2.9	3.1
光泽黄颡鱼 <i>Pelteobagrus nitidus</i>	3.3 \pm 0.3	4.2 \pm 0.1		3.7 \pm 0.0
鳊 <i>Siniperca chuatsi</i>	2.8 \pm 0.1	4.0 \pm 0.6		

3.3 人类活动对水生生态系统的影响

由于不同来源的含氮物质具有不同的 $\delta^{15}\text{N}$ 值,因此,氮同位素也是一种很有效的污染物示踪剂。吴城镇位于鄱阳湖国家级自然保护区核心区内,其 POM $\delta^{15}\text{N}$ 值为 4.2‰ 比周边其他河流低, $\delta^{15}\text{N}$ 值,鱼类 $\delta^{15}\text{N}$ 值总体偏低,说明人类活动对这片水域影响较小,保护区的设立起到了明显的保护作用(表 2 ~ 表 4)。星子县靠近著名风景名胜景点,旅游业发达,每年有大量游客进入,产生的污水直接排放到湖区,因此在该县城附近水域采集的鱼类体内 $\delta^{15}\text{N}$ 值高于其他 3 处。都昌和湖口的食物网 $\delta^{15}\text{N}$ 值居中。都昌水域中总氮含量在鄱阳湖水质富营养化调查的各采样点中偏高^[23,24],都昌水域水质还受都昌县城工业废水、生活污水的影响,人类活动已经产生了影响。Xu^[10~12], Bannon^[25], Nixon^[29] 等人的研究中都指出人类活动产生的污水排放引起食物网中生物 $\delta^{15}\text{N}$ 值升高。

本研究仅对枯水期鄱阳湖北部食物网的研究,今后可以开展洪水期、平水期等时段的多月份连续采样,增加初级生产的样品量包括附着藻类、浮游藻类、水生高等植物,帮助分析鄱阳湖食物网的主要营养来源。在鄱阳湖五大入湖河流、主湖区、通江水道等不同地域,全面反映鄱阳湖水生生态系统在实施“平垸行洪,退田还湖”生态恢复政策后生态系统功能恢复情况。

References:

- [1] Vander Zanden J M, Rasmussen B J. Primary consumer $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ and the trophic position of aquatic consumers. *Ecology*, 1999, 80(4): 1395—1404.
- [2] Vander Zanden J M, Rasmussen B J. Variation in $\delta^{15}\text{N}$ and $\delta^{13}\text{C}$ trophic fractionation: Implications for aquatic food web studies. *Limnol. Oceanogr*, 2001, 46(8): 2061—2066.
- [3] Gery J. The use of stable isotope analyses in freshwater ecology: current awareness. *Pol. J. Ecol.*, 2006, 54(4): 563—584.
- [4] Li Z Y, Jin X S, Zhuan Z M, Tan Q H, Su Y Q. Applications of stable isotope techniques in aquatic ecological studies. *Acta Ecologia Sinica*, 2005, 25(11): 3052—3060.

- [5] Vander Zanden J M, Casselman M J, and Rasmussen B J. Stable isotope evidence for the food web consequences of species invasions in lakes. *Nature*, 1999, 401: 464 — 467.
- [6] Post D M. Using stable isotopes to estimate trophic position: models, methods, and assumptions. *Ecology*, 2002, 83 (3): 703 — 718.
- [7] Post D M, Pace L M, Hairston Jr G N. Ecosystem size determines food-chain length in lakes. *Nature*, 2000, 405: 1047 — 1049.
- [8] Vander Zanden J M, Shuter J B, Lester N, Rasmussen B J. Patterns of food chain length in lakes: a stable isotope study. *The American Naturalist*, 1999, 154(4): 407 — 416.
- [9] Vander Zanden J M, Fetzer W W. Global patterns of aquatic food chain length. *Oikos*, 2007, 116: 1378 — 1388.
- [10] Xu J, Xie P. Studies on the food web structure of Lake Donghu using stable carbon and nitrogen isotope ratios. *Journal of Freshwater Ecology*, 2004, 19(4): 645 — 650.
- [11] Xu J, Xie P, Zhang M, Yang H. Variation in stable isotope signatures of seston and a zooplanktivorous fish in a eutrophic Chinese lake. *Hydrobiologia*, 2005, 541: 215 — 220.
- [12] Xu J, Li S, Xie P. Differences in $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ of particulate organic matter from the deep oligotrophic Lake Fuxian Connected with the Shallow Eutrophic Lake Xingyun, People's Republic of China. *Bull. Environ. Contam. Toxicol.*, 2005, 74: 281 — 285.
- [13] Zhang L, Xu J, Xie P, Zang X P, Qiu G S, Zeng J F. Stable isotope variations in particulate organic matter and a planktivorous fish in the Yangtze River. *Journal of Freshwater Ecology*, 2007, 22(3): 82 — 86.
- [14] Cai D L, Meng F, Han Y B, Gao S L. 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. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 1999, 30(6): 671 — 678.
- [15] Cai D L, Hong X G, Mao X H, Zhang S F, Han Y B, Gao S L. Preliminary studies on trophic structure of tidal zone in the Laoshan Bay by using carbon stable isotopes. *Acta Oceanologica Sinica*, 2001, 23(4): 41 — 47.
- [16] Cai D L, Wang R, Bi H S. Trophic relationships in the Bohai ecosystem: preliminary investigation from $\delta^{13}\text{C}$ analysis. *Acta Ecologica Sinica*, 2001, 21(8): 1354 — 1358.
- [17] Cai D L, Li H Y, Tang Q S, Sun Y. Establishment of trophic continuum in the food web of the yellow sea and East sea ecosystem: insight from carbon and nitrogen stable isotopes. *Science in China*, 2005, 35(2): 123 — 130.
- [18] Wan Y, Hu J Y, An L H, *et al.* Determination of trophic relationships within a Bohai Bay food web using stable $\delta^{15}\text{N}$ and $\delta^{13}\text{C}$ analysis. *Chinese Science Bulletin*, 2005, 50(10): 708 — 712.
- [19] Zhu H H, Zhang B. General nature and social conditions of Poyang lake; Freshwater organisms and fishery. In: *Poyang lake-Hydrology, organism, sediment, wetlands development and reparation*. Hefei: University of Science and Technology of China Press, 1997. 1 — 2, 146 — 159.
- [20] Ecosystem assessment of Poyang Lake Wetlands In: Wang X H, *et al.* *Ecosystem assessment of Poyang Lake Wetlands*. Beijing: Science Press, 2004.
- [21] Beaudoin P C, Prepas E E, Tonn M W, *et al.* A stable carbon and nitrogen isotope study of lake food webs in Canada's Boreal Plain. *Freshwater Biology*, 2001, 46, 465 — 477.
- [22] Zhang T L, Li Z J. Fish resources and fishery utilization of Lake Poyang. *Journal of Lake Sciences*, 2007, 19(4): 434 — 44.
- [23] Chen Y Y. *Fauna Sinica: Osteichthyes Cypriniformes*. Beijing: Science Press, 1995.
- [24] Hansson S, Hobbie E J, Elmgren R, Larsson U, Fry B, Johansson S. The stable nitrogen isotope ratio as a maker of food-web interactions and fish migration. *Ecology*, 1997, 78(7): 2249 — 2257.
- [25] Bannon O R and Roman T C. Using stable isotopes to monitor anthropogenic nitrogen inputs to estuaries. *Ecological Applications*, 2008, 18(1): 22 — 30.
- [26] Kendall C, Silva R S, Kelly J V. Carbon and nitrogen isotopic compositions of particulate organic matter in four large river systems across the United States. *Hydrological Processes*, 2001, 15: 1301 — 1346.
- [27] Xia L L, Zhou W B. Characters of nitrogen and phosphorus of the Poyang Lake. *Journal of Chemical and Industry in Jiangxi*, 2007, 3: 105 — 106.
- [28] Lu L J. Investigation on Poyang Lake water pollution by eutrophication. *Journal of Lake Sciences*, 1996, 8(3): 241 — 247.
- [29] Nixon W S, Buckley A B, Granger L S, *et al.* Anthropogenic enrichment and nutrients in some tropical lagoons of Ghana, West Africa. *Ecological Applications*, 2007, 17(5) (Supplement): S144 — S164.
- [30] Vander Zanden J M, Vadeboncoeur Y. Fishes as integrators of benthic and pelagic food webs in lakes. *Ecology*, 2002, 83(8): 2152 — 2161.
- [31] Gu B H, Schekske C, Hoyer V M. Intrapopulation feeding diversity in Blue Tilapia: evidence from stable-isotope analyses. *Ecology*, 1997, 78(7): 2263 — 2266.

- [32] Harvey J C, Kitchell F J. A stable isotope evaluation of the structure and spatial heterogeneity of a Lake Superior food web. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, 2000, 57: 1395 – 1403.

参考文献:

- [4] 李忠义, 金显仕, 庄志猛, 唐启升, 苏永全. 稳定同位素技术在水域生态系统研究中的应用. *生态学报*, 2005, 25(11): 3052 ~ 3060.
- [14] 蔡德陵, 孟凡, 韩贻兵, 高素兰. $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ 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. *海洋与湖沼*, 1999, 30(6): 671 ~ 678.
- [15] 蔡德陵, 洪旭光, 毛兴华, 张淑芳, 韩贻兵, 高素兰. 崂山湾潮间带食物网结构的碳稳定同位素初步研究. *海洋学报*, 2001, 23(4): 41 ~ 47.
- [16] 蔡德陵, 王荣, 毕洪生. 渤海生态系统的营养关系: 碳同位素研究的初步结果. *生态学报*, 2001, 21(8): 1354 ~ 1358.
- [17] 蔡德陵, 李红燕, 唐启升, 孙耀. 黄东海生态系统食物网连续营养谱的建立: 来自碳氮稳定同位素方法的结果. *中国科学*, 2005, 35(2): 123 ~ 130.
- [18] 万祎, 胡建英, 安立会, 安伟, 杨敏, 伊藤光明, 服部达也, 陶澍. 利用稳定氮和碳同位素分析渤海湾食物网主要生物种的营养层次. *科学通报*, 2005, 50(7): 708 ~ 712.
- [19] 湖区自然地理和社会经济概况; 水生生物及渔业. 见: 朱海虹张本等著. 鄱阳湖——水文生物沉积湿地开发整治. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 1997. 1 ~ 2, 146 ~ 159.
- [20] 鄱阳湖湿地生态系统的动态变化及原因分析. 见: 王晓鸿主编, 鄱阳湖湿地生态系统评估. 北京: 科学出版社, 2004. 44 ~ 111
- [22] 张堂林, 李钟杰. 鄱阳湖鱼类资源及渔业利用. *湖泊科学*, 2007, 19(4): 434 ~ 444.
- [23] 陈宜瑜. 中国动物志硬骨鱼纲鲤形目(上卷). 北京: 科学出版社, 1995.
- [27] 夏黎莉, 周文斌. 鄱阳湖水体氮磷污染特征及控制对策. *江西化工*, 2007, 3: 105 ~ 106.
- [28] 吕兰军. 鄱阳湖富营养化调查与评价. *湖泊科学*, 1996, 8(3): 241 ~ 247.