DOI: 10.5846/stxb201401240180
肖协文, 王玉玉, 张欢, 于秀波.饶河枯水期主要鱼类营养级位置及其影响因素.生态学报,2015,35(18): - .
Xiao X W, Wang Y Y, Zhang H, Yu X B.Trophic position and its impact on fish in Raohe River during the dry season, Jiangxi Province.Acta Ecologica Sinica,2015,35(18): - .

饶河枯水期主要鱼类营养级位置及其影响因素

肖协文[1,3], 王玉玉[2], 张 欢[1,3], 于秀波[1,*]

1 中国科学院地理科学与资源研究所生态系统网络观测与模拟重点实验室, 北京 100101
2 北京林业大学自然保护区学院, 北京 100083
3 中国科学院大学, 北京 100049

摘要:稳定同位素技术已经越来越多地被用来研究淡水生态系统的结构与功能。本研究利用氮稳定同位素技术测定了枯水季节饶河鱼类等消费者的营养级位置,比较上、中、下游及入湖口鱼类营养级的空间差异,并分析了影响饶河鱼类营养级位置的主要因素。研究结果表明,饶河鱼类的 $\delta^{15}N$ 值范围为 4.7‰—15.6‰,大部分鱼类的 $\delta^{15}N$ 值集中在 10‰—14‰之间,其中鄱阳湖间下鱵的 $\delta^{15}N$ 值最大,为 15.6 ± 1.6‰;乔木湾鲫的 $\delta^{15}N$ 值最小值,为 4.7 ± 0.9‰。根据 $\delta^{15}N$ 值计算可知,饶河鱼类占有 3—4 个营养等级。75%的鱼类种类所占的营养级大于 3,而营养级小于 2 的鱼类种类不到 10%,可能与枯水期鱼类活动范围受限,种间捕食作用增强,肉食性或饥饿现象增加有关。另外,饶河鱼类的营养级也存在着空间差异,表现为鄱阳湖湖区和入湖口处的鱼类营养级比上、中、下游的鱼类营养级要大。该结果与颗粒有机物 POM 的 $\delta^{15}N$ 值呈现一致的变化,反映了饶河鱼类的营养级位置主要受到食物来源的影响,与鱼类的个体大小无明显相关。

关键词:饶河; 氮稳定同位素; 鱼类; 营养级; 颗粒有机物

Trophic position and its impact on fish in Raohe River during the dry season, Jiangxi Province

XIAO Xiewen[1,3], WANG Yuyu[2], ZHANG Huan[1,3], YU Xiubo[1,*]

1 *Key Laboratory of Ecosystem Network Observation and Modeling, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100101, *China*
2 *School of Nature Conservation, Beijing Forestry University, Beijing* 100083, *China*
3 *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049, *China*

Abstract: Stable isotope techniques have been increasingly used to assess the structure and function of freshwater ecosystems. In this study, we used stable nitrogen isotope analysis to determine the trophic position of fish in Raohe River during the dry season. Then we estimated the relationships between body length and trophic position of *Pseudobagrus fulvidraco* and *Hemiculter bleekeri* and the $\delta^{15}N$ values of POM, respectively. Spatial variation in trophic position of fish was compared among the upper, middle, and lower areas and estuary of the Raohe River, and the main impacts of the trophic position were also analyzed. The results showed that $\delta^{15}N$ values of fish in Raohe River ranged from 4.7‰—15.6‰, and for most of the fish species $\delta^{15}N$ values were concentrated from 10‰ to 14‰. The values of $\delta^{15}N$ in *Hemiramphus intermedius* were highest (15.6 ± 1.6‰), which was collected in Lake Poyang. However, *crucian carp* collected in Qiaomuwan had the minimum values of $\delta^{15}N$ (4.7 ± 0.9‰). From the $\delta^{15}N$ values of consumers, we estimated that fish occupied 3 to 4 trophic levels in Raohe River; 75% of fish species had a high trophic position of more than 3, and the trophic position of almost

基金项目:国家自然科学基金项目(41171030); 国家 973 项目(2009CB421106)
收稿日期:2014-01-24; **网络出版日期**:2014-11-19

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

10% of fish species was less than 2, which might be related to the increase in predation and starvation because of enhanced predator-prey interactions during the dry season. In addition, spatial variation in the trophic position of fish also occurred in Raohe River, reflecting that fish in Lake Poyang and its estuary had a higher trophic position than those in the upper, middle, and lower areas. That results were consistent with variation in $\delta^{15}N$ values of POM, which were strongly affected by intensity of N input from the catchment, revealing that the trophic position of fish in Raohe River was largely affected by food sources but not by body size. Consequently, this study may add to the knowledge of the structure of the food web in Raohe River.

Key Words: Raohe River; stable nitrogen isotope; fish; trophic position; particle organic matter

河流食物网描述了河流生态系统中生物与生物之间复杂的营养关系及生物有机体在网络结构中所处的等级或位置,是河流生态系统结构与功能的重要组成部分[1]。研究河流食物网有利于了解生物之间的营养关系与能量流动过程[2]。同样,加强对河流食物网中消费者之间的营养级关系研究对于深入理解河流生态系统的结构与功能具有重要意义,能够为河流生态系统的健康发展和管理提供科学指导[3,4]。

作为一种较新的技术,稳定同位素方法被广泛应用于海洋、湖泊、河流等生态系统的研究中。与传统食性方法相比,由于氮稳定同位素比值($\delta^{15}N$)在相邻两个营养级水平的生物体内有 3‰—4‰富集,能够更好地反映动物长时间地吸收、利用的食物信息[5]。在河流生态系统研究中,氮稳定同位素被用来构建河流食物网结构[6-8]、揭示污染物质的来源[9]、探讨重金属富集[10,11]等热点问题。在国内,稳定同位素分析方法应用于河流生态系统的研究仍相对较少,仅在清江[12]、怒江[13]、长江三峡[14]、辽河中游[15]等河流或江段中有相关的研究报道。

饶河是鄱阳湖的五大入湖水系之一,流经亚洲最大的铜矿矿区,接纳了大量的废水,导致部分河段水体酸化,水体重金属污染严重,对饶河及鄱阳湖湖区的生态安全与水体环境产生巨大的影响[16-18]。目前,对饶河的食物网结构及鱼类等消费者的营养关系缺乏相关研究。本研究于 2012 年 11 月份枯水期在饶河不同区域采集了鱼类、螺类等生物样品,利用氮稳定同位素方法测定了饶河优势种鱼类等消费者的营养级位置,并分析了影响其营养级的主要因素。通过分析枯水期饶河消费者的营养级位置,有利于认识饶河的食物网结构特征。

1 材料与方法

1.1 研究区域

饶河(116°30′—118°13′ E,28°34′—30°02′ N)位于鄱阳湖主湖区东面,由乐安河、昌江及一系列支流组成,流域面积为 15,300 km^2。饶河流域属于亚热带季风湿润气候区,多年平均气温在 17.3 ℃左右,多年平均年降水量 1,850 mm,10—3 月枯水期的降水量约占全年的 31%,径流量约占全年的 29%[19]。饶河流域土地利用类型多样,饶河上、中、下游从森林景观为主,逐渐过渡到农田与建设用地等为主[20]。采样点分布于乐安河与昌江上、中、下游及入鄱阳湖口,临近水文站的河流剖面。由于乐安河中游德兴段受铜矿开采影响,其矿山酸性废水对饶河下游及鄱阳湖区水生生物群落多样性产生不利影响[16],采样点位置选择避免了受重金属污染的河段。

1.2 样品采集与处理

采集到的样品包括颗粒有机物(Particle organic matter, POM)平行样品 10 个、螺类 10 种及鱼类 15 种。将采集的混合河水滤过预烧(500 ℃,2 h)的 GF/C 玻璃纤维滤膜(直径为 47 mm, Whatman),得到 POM 样品。利用改进彼得森采泥器和 D 型底栖网沿河岸采集螺、蚌等大型无脊椎动物样品,鱼类样品主要通过聘请渔民捕捞获得。鱼类的种类鉴定主要依据《中国动物志·硬骨鱼类》、《中国淡水鱼类检索》等。

将所采集的样品放置便携式冰箱带回实验室处理。将 POM 滤膜浸入过量的 1 mol/L HCL,以消除无机

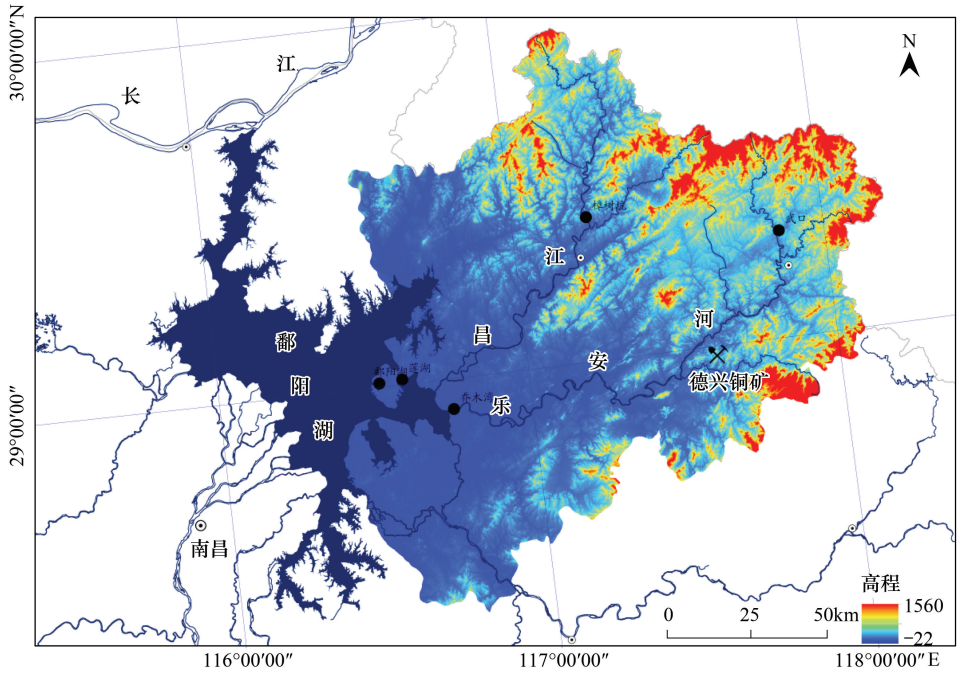

图 1　饶河流域及采样点位置,黑色圆圈表示本研究的采样点位置,深蓝色部分为鄱阳湖湖区

Fig.1　Catchment of Raohe River and sampling sites in this study. Black circles indicate sampling sites, and blue part represents Lake Poyang

碳酸盐的影响。螺类样品放入清水中过夜处理,以清空其肠含物,然后取其腹足部分用于稳定同位素分析。随机挑选个体较大的鱼类样品,取背部白色肌肉。所有样品在冷冻机内-50 ℃冷冻干燥至恒重后,用研钵将其研磨成均匀粉末,放入干燥器中保存待测。

所有样品的氮稳定同位素分析均在中国科学院地理科学与资源研究理化实验室进行,所用仪器为美国 Thermo 公司的 MAT-253 稳定同位素比值质谱仪。氮同位素比值以 δ 值的形式表达,定义为:

$$\delta X(‰) = [(R_{sample}/R_{standard}) - 1] \times 1000$$

式中,X 表示^{15}N; R_{sample}是样本的同位素比值($^{14}N/^{15}N$),$R_{standard}$是标样的同位素比值。氮稳定同位素测定的标准物质为空气中的 N_2。每测定 10 个样品插入 1 个标准样品,并随机挑选 1-2 个样品进行复测。样品的 $\delta^{15}N$ 值重现精度约为± 0.3‰。

1.3　营养级位置

由于在相邻两个营养级的生物间 $\delta^{15}N$ 的富集为 3 ‰—4 ‰,因而在食物网研究中 $\delta^{15}N$ 值多被用于分析消费者的营养级,其计算公式如下[2,7,15]:

$$TP = \frac{(\delta^{15}N_{消费者} - \delta^{15}N_{基准})}{3.4} + \lambda \quad (1)$$

式中,TP(Trophic position)表示消费者的营养等级,$\delta^{15}N_{消费者}$为消费者的 $\delta^{15}N$ 值,$\delta^{15}N_{基准}$表示初级生产者或初级消费者的 $\delta^{15}N$ 值。当 $\delta^{15}N_{基准}$为初级生产者时,λ 为 1;当 $\delta^{15}N_{基准}$为初级消费者时,λ 为 2。螺类生活周期较长,又能够反映初级生产者 $\delta^{15}N$ 的季节变化的平均特征,适合做基准生物[2,21]。为保证基准生物的一致性与可比性,因此在选择过程中尽量保证为各采样点的广布种,铜锈环棱螺(*Bellamya aeruginosa*)、赤豆螺(*Bithynia fuchsiana*)、中华沼螺(*Cipangopaludina cahayensis*)等作为营养位置计算的基准生物。

1.4　数据整理与分析

采用 *t* 检验和单因素方差分析(ANOVA),分别对饶河流域的同种消费者的 $\delta^{15}N$ 值进行正态性检验,以及对鱼类的 $\delta^{15}N$ 值和营养级位置的空间差异性检验。采用回归分析对鱼类的全长与鱼类的 $\delta^{15}N$ 值和营养级

位置与 POM 的 $\delta^{15}N$ 值进行相关关系分析。上述公式的计算和数据处理、分析均通过 Microsoft Excel 2007 和 SPSS 19.0 软件中进行操作,显著性水平设为 $P < 0.05$。实验数据用平均数 ± 标准差($\bar{x}$ ± SD)表示。

2 结果与分析

2.1 POM 与螺类的 $\delta^{15}N$ 值

在饶河所有采样点内,POM 的 $\delta^{15}N$ 值取值范围为 1.2—4.9‰,最大值出现在鄱阳湖湖区为 4.9‰,最小值出现在乐安河上游支流武口处为 1.2‰。其中,乐安河 POM 的 $\delta^{15}N$ 为 2.3 ± 1.5‰,昌江 POM 的 $\delta^{15}N$ 值为 1.7‰。整个饶河河段内,POM 的 $\delta^{15}N$ 平均值在空间范围内呈现出空间差异性特点:鄱阳湖区 >乐安河段 > 昌江段(图 2a)。

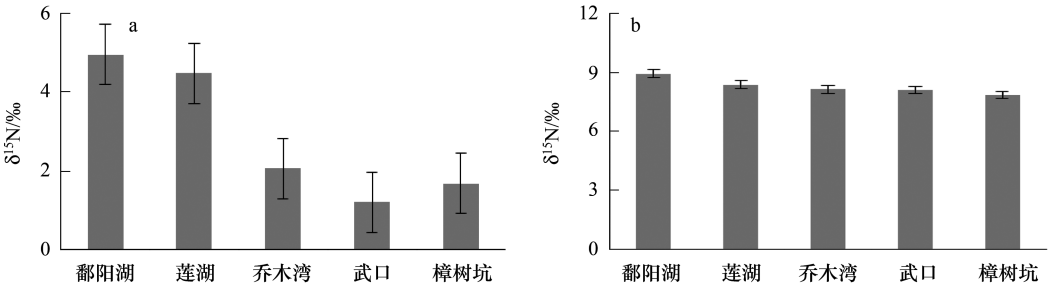

图 2 饶河不同采样点 POM (a)和螺类(b)的 $\delta^{15}N$ 值

Fig.2 $\delta^{15}N$ values of POM (a) and snails (b) in different sampling sites of Raohe River

不考虑螺类的品种,它们的 $\delta^{15}N$ 的平均值为 8.8 ± 1.2‰(n = 18),最大值出现在鄱阳湖湖区的铜锈环棱螺为 8.9‰,最小值出现在樟树坑位置的中华沼螺为 7.8 ‰。在考虑螺类品种的条件下,武口与樟树坑的中华沼螺为 8.0 ± 0.1‰(n = 6,各 3 个),其余采样点的铜锈环棱螺的 $\delta^{15}N$ 平均值为 8.2 ± 2.8 ‰(n = 12)(图 2b)。

2.2 鱼类的 $\delta^{15}N$ 值

如表 1 所示,大部分鱼类的 $\delta^{15}N$ 值都集中在 10‰—14‰之间,其中最大值出现鄱阳湖间下鱵(*Hemiramphus intermedius*)为 15.6 ± 1.6‰,最小值出现在乔木湾的鲫(*Carassius auratus*)为 4.7 ± 0.9‰。通过全长与鱼类的 $\delta^{15}N$ 值的线性回归分析发现,广布种黄颡鱼(*Pseudobagrus fulvidraco*)(y = 0.06 x + 10.09,R^2 = 0.01,P<0.05,图 3a)与贝氏 (*Hemiculter bleekeri*)

(y = 0.29 x + 10.33,R^2 = 0.39,P>0.05,图 3b)并没有呈现显著的正相关关系。

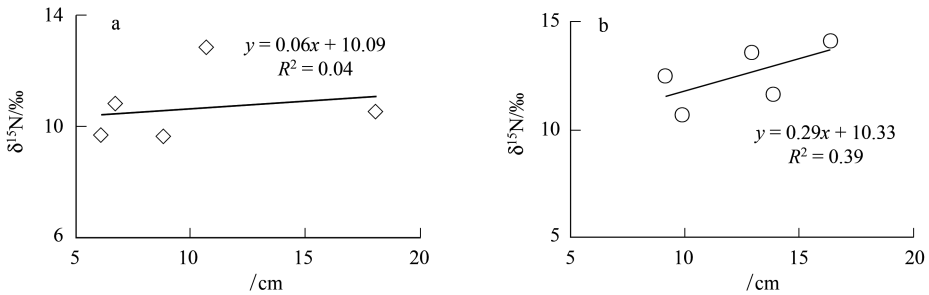

图 3 饶河黄颡鱼(a)和贝氏 (b)的 $\delta^{15}N$ 值与体长的关系

Fig.3 The relationships between $\delta^{15}N$ values and body length of *P. fulvidraco* (a) and *H. bleekeri* (b) in Raohe River

根据鱼类的不同食性可以看出,在鄱阳湖位置浮游食性的间下鱵 $\delta^{15}N$ 值最高,肉食性的短颌鲚(*Coilia brachygnathus*)为 14.6 ± 2.0‰、大眼鳜(*Siniper cakneri*)为 15.1 ± 1.5‰,要高于杂食性的鲤(*Cyprinus carpio*)

表 1　饶河和鄱阳湖不同区域鱼类样品的数量、$\delta^{15}N$ 值、体长与营养级位置

Table 1　Numbers and $\delta^{15}N$ values, body length and trophic position of fish species studied in different areas of Raohe River and Lake Poyang

物种 Species / 物种名称 Species name	空间位置 Location																
	鄱阳湖 Lake Poyang				饶河 Raohe River												
					入湖口 Estuary				乐安河 Lean River						昌江 Changjiang River		
									下游 Lower reach				上游 Upper reach				
					莲湖 Lianhu				乔木湾				武口			樟树坑	
	n	BL/cm	$\delta^{15}N$/‰	TP	*n*	BL/cm	$\delta^{15}N$/‰		*n*	BL/cm	$\delta^{15}N$/‰		*n*	BL/cm	$\delta^{15}N$/‰		*n*	BL/cm	$\delta^{15}N$/‰	
鳊 *Parabramis pekinensis*	4	10.5±1.4	13.3±3.6	3.3±1.0																
间下鱵 *Hemiramphus intermedius*	3	11.5±0.9	15.6±1.5	3.9±0.4																
大眼鳜 *Siniperca kneri*	6	18.3±2.5	15.1±1.5	3.8±0.4													3	20.9±2.9	12.7±1.2	3.5±0.3
鲶 *Parasilurus asotus*	5	310±148	13.4±3.3	3.3±0.8													5	29.5±2.6	10.8±1.6	2.8±0.4
短颌鲚 *Coilia brachygnathus*	7	14.8±0.9	14.6±2.0	3.6±0.6																
黄颡鱼 *Pseudobagrus fulvidraco*	5	10.8±2.2	12.8±1.9	3.1±0.6	4	6.7±0.1	10.8±1.6	3.8±0.4	2	8.9±1.6	9.6±1.8	2.4±0.5	2	6.1±2.0	10.6±2.8	2.8±1.1	2	18.1±0.7	10.5±3.1	2.8±0.9
沙塘鳢 *Odontobutis obscupus*													1	8.3	11.4	3				
马口鱼 *Opsariicjthys bidens*																				
贝氏　*Hemiculter bleekeri*	5	11.4±1.3	14.1±2.0	3.5±0.5	10	7.9±1.9	13.6±1.2	3.5±0.4	4	8.9±0.7	11.7±2.5	3.0±0.7	2	4.9±1.7	10.7±1.0	2.8±0.3	2	4.2±0.8	9.5±1.9	2.4±0.5
鲫 *Carassius auratus*	2	8.1±1.6	14.3±1.6	3.6±0.5	4	6.1±1.3	12.9±1.4	3.3±0.4	2	13.1±1.9	4.7±0.9	1.0±0.3					5	17.6±0.3	9.0±0.6	2.3±0.2
鲤 *Cyprinus carpio*	3	10.4±2.0	14.0±0.3	3.5±0.5	5	20.2±3.5	10.6±2.4	2.6±0.7	3	10.8±1.8	13.5±2.8	3.6±0.8								
泥鳅 *Misgurnus anguillicaudatus*	1	10.8	14.2	3.5									2	7.9±1.9	12.8±0.0	3.4±0.0				
赤眼鳟 *Squaliobarbus curriculus*									1	20.8	6.8	1.6								
鳑鲏 *Rhodeus ocellatus*	4	7.6±3.5	11.5±2.8	2.7±0.8	9	1.7±0.4	11.1±0.9	2.8±0.3					1	3.7	9.6	2.4				
花　*Hemibarbus maculatus*	1	11.4	13.1	3.2	3	10.3±0.5	10.3±0.6	2.6±0.2												

n:number, 表示样品的数量; BL: Body Length, 表示消费者的体长; TP: Trophic Position, 表示消费者的营养级位置

http://www.ecologica.cn

14.0 ± 0.3‰、鲫 14.3 ±1.6‰、贝氏 14.1 ± 2.0‰,植食性的鳊(*Parabramis pekinensis*)处于中间位置。在其他各个采样点位置,杂食性的鱼类贝氏 、鲤甚至要高于肉食性的大眼鳜。同一品种的鱼类在不同采样点位置的 $\delta^{15}N$ 值也呈现明显的差异性。黄颡鱼、贝氏 作为采样点内的广布种 ANOVA 分析,$F = 7.71$,$df = 4$,$P < 0.001$,它们的 $\delta^{15}N$ 值在乐安河、昌江与鄱阳湖位置具有明显的空间差异特点。通过对鄱阳湖、樟树坑两个采样点的共有种的 ANOVA 分析,$F = 29.98$,$df = 1$,$P<0.001$;鄱阳湖与乐安河武口位置的共有种 ANOVA 分析,$F = 24.82$,$df = 1$,$P<0.05$。这种空间差异特征也表现在饶河两条支流乐安河、昌江与靠近鄱阳湖区之间。

2.3 营养级位置

在饶河流域内,所有的鱼类的 $\delta^{15}N$ 取值范围在 4.7‰—15.6‰之间,这相当于在饶河范围内存在 3 个以上的营养级水平。根据公式(1)计算它们的营养级位置可知,鄱阳湖位置的间下鱵的营养级最高为 3.9 ± 0.4,营养级位置最低的为乔木湾位置的鲫,为 1.0±0.3。营养级位置大于 3 的鱼类占了 32 个平行采样物种中的 75%,营养级位置低于 2 的仅占了 0.09 左右,表明饶河的鱼类大部分处于同一营养级水平,鄱阳湖湖区的鱼类营养级相对较高。

在饶河流域,广布种的黄颡鱼、贝氏 与 POM 的 δ15N 值的线性回归分析,偏肉食杂食性的黄颡鱼的相关性系数较小($R^2 = 0.54$,$P<0.05$),以浮游动物为主食的杂食性贝氏 与 POM 的 δ15N 值呈显著相关($R^2 = 0.80$,$P<0.05$)。

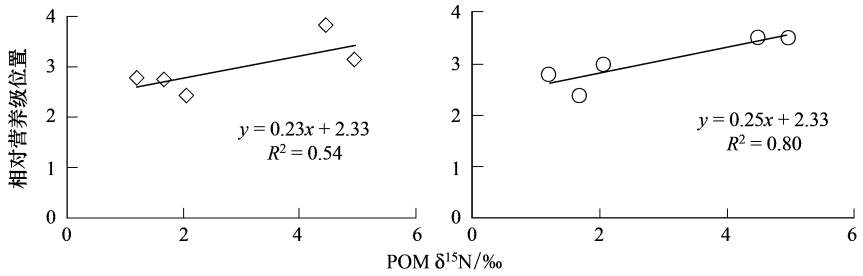

图 4 黄颡鱼(a)和贝氏 (b)的营养级位置与 POM 的 $\delta^{15}N$ 值间的相关关系

Fig.4 The relationships between $\delta^{15}N$ values of POM and trophic position of *P. fulvidraco* (a) and *H. bleekeri* (b) in Raohe River

3 讨论

3.1 饶河主要鱼类的营养级位置

在饶河的食物网结构中,存在着 3 个以上的营养等级。营养级位置为 3 的主要为肉食性鱼类,大部分鱼类的营养级处于 2—3 之间。与肠含物分析结果相比,基于氮稳定同位素计算得到的营养级位置是连续的数值[21],因而能够更加客观地反映饶河鱼类等消费者的营养级和食性特征。与其他区域相比,与饶河河流域的同一品种鱼类的营养级位置存在差异性。例如,与王玉玉等[22]对鄱阳湖湖区的短颌鲚等要低一个营养级,油鲹却高一个营养级。这种现象,也同时存在于与巢湖[23]、太湖[24]的鱼类消费者品种的营养级对比。这可能与河流食物网结构比湖泊食物网结构简单,在河流食物资源可获得性方面[25],要远远低于湖泊,高营养级水平的鱼类与低营养级水平的位置差异不够明显。

此外,饶河流域鱼类的营养级位置除了与长江大型湖泊具有空间差异,在饶河流域内部,河流上、中、下游不同采样点的同一品种的鱼类的营养级位置不同。根据表 1 结果显示,通过对鱼类体内的 $\delta^{15}N$ 值的双因素 ANOVA,鱼类的营养级位置在不同采样点具有明显的空间差异。这种空间差异特征的研究,对于研究河流食物网结构具有重要意义。

3.2 影响饶河鱼类营养级位置的因素

许多研究指出,鱼类的营养级位置取决于食性和食物组成,而且受到个体发育水平或栖息生境的影响。同一物种的不同个体间也会出现明显的营养级位置高低差异,从而引起营养级的变化[4]。食性和食物组成

是影响鱼类营养级位置的关键因素。在太湖、巢湖、鄱阳湖等湖泊生态系统中,以肉食性鱼类如大眼鳜、鲶等属于河流、湖泊生态系统中较高等级的消费者,杂食性与植食性的鱼类次之,以浮游生物食性的最低。

表 2　饶河鱼类与鄱阳湖、太湖、巢湖鱼类营养级位置的比较

Table 2　Comparison with trophic position of fishes between Raohe River and Lake Poyang, Lake Taihu and Lake Chaohu

物种名称 Species name	空间位置 Location						
	巢湖 Lake Chaohu	太湖 Lake Taihu	饶河 Raohe River	鄱阳湖 Lake Poyang			
				吴城	星子	都昌	湖口
大眼鳜 *Siniperca kneri*	3.5	3.3	3.2	2.8±0.1	4.0±0.6	—	—
间下鱵 *Hemiramphus intermedius*	3.2	—	3.9	—	—	—	—
鲤 *Cyprinus carpio*	3	2.4	3.3	—	2.8±0.3	3.4	—
鲫 *Carassius auratus*	3	1.9	2.4	2.1±0.2	2.9±0.0	2.8±0.2	—
鲚 *Coilia ectenes* *	2.9	3.4	3.6	—	4.2±0.2	—	4.0±0.1
花　*Hemibarbus maculatus*	2.9	—	2.9	—	—	—	—
贝氏　*Hemiculter bleekeri*	2.8	3.1	3.0	2.5	2.32	2.8±0.3	—
高体鳑鲏 *Rhodeus ocellatus*	2.4	—	3.0	—	—	—	—
鳊 *Parabramis pekinensis*	2.36	1.9	2.9	2.2±0.0	—	3.1	—
黄颡鱼 *Pseudobagrus fulvidraco*	3.2	3.0	3.0	3.3±0.3	4.2±0.1	—	3.7±0.0

* 表示比较的鱼类为同属但不同种类,如短颌鲚与湖鲚(太湖、巢湖),黄颡鱼与光泽黄颡鱼;　表示鱼类营养级位置的数据来源为已发表的文献

本研究结果分析表明,饶河流域内的不同品种的鱼类营养级位置的高低,同样受到它们食性的影响,肉食性大眼鳜、马口鱼、沙塘鳢等高于杂食性的鲤、鲫等的营养级位置,也高于植食性的鳊的营养级位置。由于鱼类饵料组成的季节变化较明显[26],鱼类的食性转变也会导致鱼类的营养级位置的改变。在饶河枯水期阶段,鲤的营养级位置比太湖、巢湖、鄱阳湖夏季的要高,而黄颡鱼的营养级位置要比鄱阳湖湖区的要低,杂食性的鲤、黄颡鱼等在饶河内的食物可获得性要小于大型湖泊而受到食性的季节转变引起的。

鱼类的个体大小与鱼类营养级位置高低也存在相关关系,随着个体增长,鱼类的 $\delta^{15}N$ 值不断富集,营养级位置相应增加[27-28]。Power 等对鲑鱼(*Salvelinus spp.*)的研究中发现,鱼类体长增大,体内的 $\delta^{15}N$ 值降低,营养级位置也逐渐降低[29]。而在其他区域,Jennings 等人分析了英国北海底栖鱼类和无脊椎动物的营养级,结果发现,大约 60%的鱼类个体体长与其 $\delta^{15}N$ 值之间存在显著的相关性关系[30]。在本研究中,对于饶河上、中、下游的广布种黄颡鱼、油鲹的全长与体内的 $\delta^{15}N$ 值的线性回归分析发现,这两种鱼类的全长与 $\delta^{15}N$ 值的相关性并不明显。因而,可以推测出黄颡鱼等广布种鱼类的全长对它们的营养级位置的空间差异不够明显。

鱼类营养级位置的变化还能够受到栖息地生境的影响,从而导致同一物种的营养等级在不同采样点出现差异。不同来源的氮素通过影响鱼类等捕食者体内的 ^{15}N 值富集,进而影响它的营养级位置。在西非加纳地区,人类向泻湖排放的污水导致滤食性的粉虾(*Penaeus notialis*)与底栖的蓝蟹(*Callinectes latimanus*)体内不同部位的 $\delta^{15}N$ 值升高[31]。Caroline Anderson 等[8]人对加拿大魁北克省的 82 条河流的氮素来源分析,初级消费者、肉食性的无脊椎动物的平均 $\delta^{15}N$ 值与农业生产、生活排放的污水呈现很高的相关性。在饶河流域内,饶河上游的武口、樟树坑以森林覆盖为主,到中下游地区的莲湖、鄱阳湖位置以农田、城市为主,土地利用与覆盖的差异导致 POM 的 $\delta^{15}N$ 值的变化,饶河上游至下游的 POM 的 $\delta^{15}N$ 值呈现增加的趋势。同时,我们发现黄颡鱼、油鲹的营养级位置也存在着明显的空间差异。通过 POM 的 $\delta^{15}N$ 值与黄颡鱼、油鲹营养级位置分析发现呈显著相关,表明浮游食性的油鲹的营养级位置更容易受到外来营养物质输入的影响。POM 的 $\delta^{15}N$ 值的空间差异反映了不同生境下人为氮营养物质输入的差异[32]。通过对不同食物源的摄食,鱼类体内对 ^{15}N 的富集程度不同,导致鱼类的 $\delta^{15}N$ 值在不同采样点的差异,最终对整个饶河鱼类的营养级产生影响。

4　结语

本研究通过对饶河枯水期 POM、螺类与鱼类的 $\delta^{15}N$ 值测定,分析了饶河鱼类等消费者的营养级位置。结

果表明,饶河鱼类占据 3—4 个营养等级,并且其营养级位置存在明显的空间差异,可能与上、中、下游和入湖口区域饵料生物的组成和生物量大小有关。另一方面,广布种鱼类的营养等级受个体大小的影响较小,POM 的 $\delta^{15}N$ 值能够影响饶河鱼类的营养级位置,表明饶河消费者的营养级受到营养物质来源的影响。本研究仅考虑了饶河枯水期河流鱼类的营养级位置和影响营养级位置的因素,今后将考虑水位变化和其他环境因素对饶河鱼类营养级关系的影响研究。

参考文献(References):

[1] 董哲仁. 河流生态系统结构功能模型研究. 水生态学杂志, 2008, 1(1): 1-7.

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

[3] Lindeman R L. The trophic-dynamic aspect of ecology. Ecology, 1942, 23(4): 399-418.

[4] 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. 中国水产科学, 2010, 17(4): 878-887.

[5] Zanden M J V, Rasmussen J B. Primary consumer $\delta^{13}C$ and $\delta^{15}N$ and the trophic position of aquatic consumers. Ecology, 1999, 80(4): 1395-1404.

[6] Thorp J H, Delong M D, Greenwood K S, Casper A F. Isotopic analysis of three food web theories in constricted and floodplain regions of a large river. Oecologia, 1998, 117(4): 551-563.

[7] Jepsen D B, Winemiller K O. Structure of tropical river food webs revealed by stable isotope ratios. Oikos, 2002, 96(1): 46-55.

[8] Anderson C, Cabana G. Estimating the trophic position of aquatic consumers in river food webs using stable nitrogen isotopes. Journal of the North American Benthological Society, 2007, 26(2): 273-285.

[9] Anderson C, Cabana G. Does $\delta^{15}N$ in river food webs reflect the intensity and origin of N loads from the watershed? Science of the Total Environment, 2006, 367(2): 968-978.

[10] Ikemoto T, Tu N P C, Okuda N, Iwata A, Omori K, Tanabe S, Tuyen B C, Takeuchi I. Biomagnification of trace elements in the aquatic food web in the Mekong Delta, South Vietnam using stable carbon and nitrogen isotope analysis. Archives of environmental contamination and toxicology, 2008, 54(3): 504-515.

[11] Kwon S Y, McIntyre P B, Flecker A S, Campbell L M. Mercury biomagnification in the food web of a neotropical stream. Science of the Total Environment, 2012, 417: 92-97.

[12] 温芳妮. 清江流域二级河流叹气沟河大型底栖动物群落的食物网研究. 武汉: 华中科技大学, 2008.

[13] 周琼. 碳、氮稳定同位素技术在湖泊与河流食物网研究中的应用. 武汉: 中国科学院水生生物研究所, 2009.

[14] 李斌. 三峡库区小江鱼类食物网结构、营养级关系的 C、N 稳定性同位素研究. 重庆: 西南大学, 2012.

[15] 霍堂斌, 姜作发, 马波, 李喆, 于洪贤. 应用同位素分析黑龙江中游主要鱼类营养层次. 淡水渔业, 2013, 43(2): 3-8.

[16] 朱江, 任淑智. 德兴铜矿废水对乐安江底栖动物群落的影响. 应用与环境生物学报, 1996, 2(2): 162-168.

[17] 高玉荣, 许木启. 乐安江重金属污染对浮游植物群落结构的影响. 应用与环境生物学报, 1996, 2(2): 175-183.

[18] 初娜. 江西省德兴铜矿地区重金属元素的环境效应研究. 北京: 中国地质科学院, 2008.

[19] 江西省水利厅. 江西河湖大典. 武汉: 长江出版社, 2010.

[20] 郭延凤. 基于 CLUE 模型的江西省土地利用变化及其对水源涵养服务的影响. 合肥: 安徽师范大学, 2011.

[21] 徐军, 张敏, 谢平. 氮稳定同位素基准的可变性及对营养级评价的影响. 湖泊科学, 2010, 22(1): 8-20

[22] 王玉玉, 于秀波, 张路, 徐军. 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. 生态学报, 2009, 29(3): 1181-1188.

[23] Zhang M, Xie C X, Hansson L A, Hu W M, Che J P. Trophic level changes of fishery catches in Lake Chaohu, Anhui Province, China: Trends and causes. Fisheries Research, 2012, 131-133(0):15-20.

[24] Mao Z G, Gu X H, Zeng Q F, Zhou L H, Sun M B. Food web structure of a shallow eutrophic lake (Lake Taihu, China) assessed by stable isotope analysis. Hydrobiologia, 2012, 683(1): 173-183.

[25] Sabo J L, Finlay J C, Kennedy T, Post D M. The role of discharge variation in scaling of drainage area and food chain length in rivers. Science, 2010, 330(6006): 965-967.

[26] Grey J. Ontogeny and dietary specialization in brown trout (*Salmotrutta L.*) from Loch Ness, Scotland, examined using stable isotopes of carbon and nitrogen. Ecology of Freshwater Fish, 2001, 10(3): 168-176.

[27] Currin C A, Wainright S C, Able K W. Determination of food web support and trophic position of the Mummichog, Fundulusheteroclitus in New Jersey smooth Cordgrass (*Spartina alterniflora*), common reed (*Phragmites australis*), and restored salt marshes. Estuaries, 2003, 26(2): 96-510.

[28] Power M, Power G, Caron F, Doucett R R. Growth and dietary niche in *Salvelinus alpinus* and *Salvelinus frontalis* as revealed by stable isotopeanalysis. Environmental Biology of Fishes, 2002, 64(1/3): 75-85.

[29] Jennings S, Greenstreet S P R, Hill L, Piet G J, Pinnegar J K, Warr K J. Long-termtrends in the trophic structure of the North Sea fish community: evidence from stable isotope analysis, size-spectra and communitymetrics. Marine Biology, 2002, 141(6): 1085-1097.

[30] Diebel M W, Zanden M J V. Nitrogen stable isotopes in streams: effects of agricultural sources and transformations. Ecological Applications, 2009, 19(5): 1127-1134.

[31] Nixon S W, Buckley B A, Granger S L, Entsua-Mensah M, Ansa-Asare O, White M J, McKinney R A, Mensah E. Anthropogenic enrichment and nutrients in some tropical lagoons of Ghana, West Africa. Ecological Applications, 2007, 17(5): 144-164.

[32] Berto D, Rampazzo F, Noventa S, Cacciatore F, Gabellirni M, Aubry F B, Girolimetto A, Brusa R B. Stable carbon and nitrogen isotope ratios as tools to evaluate the nature of particulate organic matter in the Venice lagoon. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2013, 135: 66-76.