

张欢, 谢平, 吴功果, 等. 日本沼虾与秀丽白虾的营养生态位[J]. 环境科学研究, 2013, 26(1): 22-26.

ZHANG Huan, XIE Ping, WU Gongguo, et al. Studies on trophic niches of *Macrobrachium nipponensis* and *Exopalaemon modestus* [J]. Research of Environmental Sciences, 2013, 26(1): 22-26.

日本沼虾与秀丽白虾的营养生态位

张 欢^{1,2}, 谢 平^{1,2*}, 吴功果², 张 欢², 张培育², 徐 军²

1. 华中农业大学水产学院, 湖北 武汉 430070

2. 中国科学院水生生物研究所, 东湖湖泊生态系统试验站, 湖北 武汉 430072

摘要: 为科学评估虾类的营养关系及资源的保护, 利用稳定同位素技术研究了 2 种淡水虾类在大型通江湖泊——洞庭湖和鄱阳湖中的营养生态位和生态宽幅大小. 结果表明, 日本沼虾与秀丽白虾的 $\delta^{13}\text{C}$ 值呈显著差异, 而 $\delta^{15}\text{N}$ 值无明显差异. 同时, 由于营养状况及水文的差异, 虾类同位素值的差异在 2 个湖泊中表现不同. 日本沼虾的 $\delta^{13}\text{C}$ 值范围比秀丽白虾大, 频率分布相对集中在 $-25.0\text{‰} \sim -23.0\text{‰}$ 区间, 表明其摄食的食物来源更广, 对某些饵料生物有所偏好. 另外, 日本沼虾与秀丽白虾的营养生态位重叠程度较大, 表明二者的主要食物来源相同, 在食物网中占据的营养级相近, 存在着激烈的种间竞争. 在鄱阳湖中, 日本沼虾占有的营养生态位和生态宽幅大于秀丽白虾; 而在洞庭湖的研究结果则相反, 主要是由于采样区域生境的差异及人类活动干扰的程度不同所致.

关键词: 日本沼虾; 秀丽白虾; 稳定同位素; 营养生态位; 生态宽幅

中图分类号: Q958.12 文献标志码: A 文章编号: 1001-6929(2013)01-0022-05

Studies on Trophic Niches of *Macrobrachium nipponensis* and *Exopalaemon modestus*

ZHANG Huan^{1,2}, XIE Ping^{1,2}, WU Gong-guo², ZHANG Huan², ZHANG Pei-yu², XU Jun²

1. College of Fisheries, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China

2. Donghu Experimental Station of Lake Ecosystems, States Key of Freshwater Ecology and Biotechnology, Institute of Hydrobiology, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430072, China

Abstract: This study was undertaken to assess the trophic niches and niche widths between two freshwater shrimps, *Macrobrachium nipponensis* and *Exopalaemon modestus*, from the Yangtze River-connected lakes – Dongting lake and Poyang lake – using stable carbon and nitrogen isotope analysis. The overall aim was to provide the information valuable for evaluation of trophic relationships and for protection of natural resources. Results showed significant differences in $\delta^{13}\text{C}$ values between *M. nipponensis* and *E. modestus*, but no difference in $\delta^{15}\text{N}$ values between two species. Meanwhile, differences in isotopic variations of shrimps were found between lakes which had differences in nutrient level and in hydrology. The range of $\delta^{13}\text{C}$ signatures in *M. nipponensis* was greater than those of *E. modestus* and mainly distributed from -25.0‰ to -23.0‰ , indicating that *M. nipponensis* fed on more food sources but preferred a certain one. There was a large overlap of trophic niches between the two species. This result indicated that food consumed were nearly the same for both species, implying similar trophic positions and strong inter-composition. In the Poyang Lake, *M. nipponensis* had a trophic niche and niche width larger than *E. modestus*. However, there were opposite observations in the Dongting Lake due to variations of sampling habitats and the degree of human disturbances.

Key words: *Macrobrachium nipponensis*; *Exopalaemon modestus*; stable isotope; trophic niche; niche width

收稿日期: 2012-04-28 修订日期: 2012-05-13

基金项目: 国家自然科学基金项目(31170439); 国家重点基础研究发展(973)计划项目(2012CB417004)

作者简介: 张欢(1986-) 男, 湖北武汉人, zhanghuan0503@yahoo.com.cn.

* 责任作者, 谢平(1961-) 男, 湖北洪湖人, 研究员, 博士, 主要从事湖泊生态学研究, xieping@ihb.ac.cn

日本沼虾(*Macrobrachium nipponensis*)和秀丽白虾(*Exopalaemon modestus*)分别隶属于甲壳纲、十足目、长臂虾科、沼虾属和白虾属, 广泛分布于我国淡水湖泊及河流中, 是长江中下游地区许多湖泊和河流中虾类资源的优势种类^[1-3], 同时也是鄱阳湖、洞庭湖重要的经济捕捞对象, 其产量占鄱阳湖虾年总产量

的70%以上^[1]。然而,在这些湖泊中日本沼虾和秀丽白虾的生存受到过度捕捞、有机氯农药残留及重金属污染等胁迫^[4-5]种质资源面临下降趋势。另外,随着湖泊富营养化的加剧、生境多样性的降低,虾类的种群结构也会受到影响。因此,对日本沼虾和秀丽白虾营养关系的研究可为健康的湖泊生态环境提供重要的理论基础。

生态位是指物种与生态系统中其他种类相互作用的总和^[6],反映了该物种所有的营养关系,也是研究种间和种类竞争关系的重要手段。传统的生态宽幅是通过肠含物分析及结合种群中个体的丰度与均匀度计算获得^[7]。稳定同位素($\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$)作为一种有效的技术手段被越来越多地应用于水生生态系统的各个领域^[8]。Bearhop等^[7,9]率先探讨了利用 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$ 值研究营养生态位及生态宽幅的有效性,并提出 $\delta^{15}\text{N}$ 值变幅(NR)、 $\delta^{13}\text{C}$ 值变幅(CR)及生态位总面积(TA)等概念。XU等^[10]发现,日本沼虾和秀丽白虾的 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$ 值能反映其栖息地生境的营养状况。另外,Zambrano等^[11]发现2种外来鱼类鲤(*Cyprinus carpio*)、罗非鱼(*Oreochromis niloticus*)与土著种墨西哥钝口螈(*Ambystoma mexicanum*)的营养生态位重叠,导致饵料资源降低,从而造成土著种生物量的锐减。该研究利用稳定同位素技术,结合已报道的食性研究结果,探讨日本沼虾和秀丽白虾的营养生态位及生态宽幅大小,以期为淡水虾类资源的保护及合理利用提供依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

洞庭湖(北纬 $28^{\circ}44'$ ~ $29^{\circ}35'$ 、东经 $111^{\circ}53'$ ~ $113^{\circ}05'$)位于湖南省东北部、长江中下游荆江段南岸,是我国第二大淡水湖。洞庭湖水位33.5 m(岳阳站,黄海基准)时湖泊面积2 625 km²;平均湖宽17.0 km,最大湖宽30.0 km;平均水深6.4 m,最大水深23.5 m。湖区年均气温 $16.4\sim 17.0\text{ }^{\circ}\text{C}$,年均降水量1 200~1 400 mm。洞庭湖水系发达,一面承受湘、资、沅、澧“四水”的汇注,一面接纳长江自松滋、太平、藕池“三口”分泄的水量,经该湖调蓄后,从岳阳城陵矶一口泄入长江。现存湖体明显分化为东洞庭湖、南洞庭湖和西洞庭湖3个湖区。

鄱阳湖(北纬 $28^{\circ}22'$ ~ $29^{\circ}45'$ 、东经 $115^{\circ}47'$ ~ $116^{\circ}45'$)位于江西省北部、长江中下游南岸,是我国第一大淡水湖,南北长173 km,东西宽70 km,湖岸线总长约1 500 km。湖区年均气温为 $17.3\text{ }^{\circ}\text{C}$,年均降

水量为1 470 mm,属亚热带湿润季风气候。湖口水位21 m(吴淞高程)时湖泊面积3 960 km²。鄱阳湖汇纳赣江、抚河、信江、饶河、修水五河之水,经调蓄后,通过湖口注入长江。其水位落差大,为季节性吞吐型湖泊。

1.2 样品的采集与处理

日本沼虾和秀丽白虾样品分别于2010年3月、8月在鄱阳湖湖口区域和洞庭湖岳阳区域采集,均从渔民的渔获物中获得。其中,采集到日本沼虾样品37尾,秀丽白虾29尾。将虾去壳,取尾部肌肉冷冻保存,带回实验室处理。在 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下烘干48 h至恒质量,用研钵研磨成均匀粉末后放入干燥器保存。

1.3 稳定同位素分析

虾的稳定同位素分析在中国科学院水生生物研究所东湖生态系统试验站进行,所用仪器为美国Thermo公司的Carlo Erba EA-1110元素分析仪与Delta Plus Finnigan同位素质谱仪。碳氮同位素比值以 δ 值的形式表达:

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

式中 X 为 ^{13}C 或 ^{15}N ; R_{sample} 为所测得的同位素比值,碳同位素是 $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$,氮同位素是 $^{14}\text{N}/^{15}\text{N}$; R_{standard} 为标准物质的同位素比值,碳氮稳定同位素测定的标准物质分别为PDB(美洲拟箭石)和 N_2 。 δ 值越小表示样品重同位素(^{13}C 或 ^{15}N)含量越低,越大表示样品重同位素(^{13}C 或 ^{15}N)含量越高。每测定10个样品插入1个标准样品,并随机挑选1~2个样品复测。样品 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$ 值重现精度约为 $\pm 0.2\%$ 。

2 结果

2.1 稳定同位素分析

由图1可见,在不同湖泊中,秀丽白虾的 $\delta^{15}\text{N}$ 值

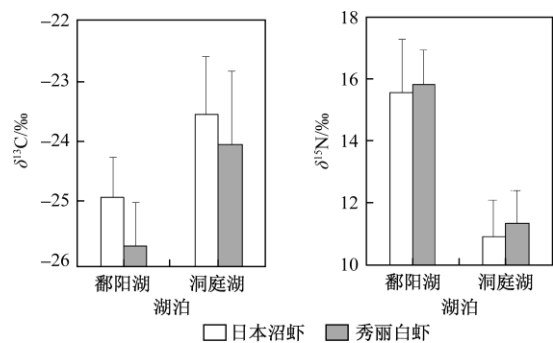


图1 鄱阳湖、洞庭湖中日本沼虾与秀丽白虾的 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$ 值

Fig. 1 $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ values of *M. nipponensis* and *E. modestus* in Poyang Lake and Dongting Lake

均大于日本沼虾,但无显著差异(鄱阳湖 $P = 0.640$, 洞庭湖 $P = 0.253$); 2 种虾的 $\delta^{13}\text{C}$ 值差异显著 ($P < 0.05$). 鄱阳湖中日本沼虾的 $\delta^{13}\text{C}$ 值 ($-24.9\text{‰} \pm 0.7\text{‰}$) 显著大于秀丽白虾 ($-25.7\text{‰} \pm 0.7\text{‰}$, $P < 0.01$), 而洞庭湖中没有显著差异 ($P = 0.159$).

2.2 $\delta^{13}\text{C}$ 值的频率分布

由图 2 可知,日本沼虾的 $\delta^{13}\text{C}$ 值的分布区间

($-26.1\text{‰} \sim -21.4\text{‰}$) 大于秀丽白虾,表明其食物来源较广. 另外,日本沼虾 $\delta^{13}\text{C}$ 值的频率分布相对集中在 $-25.0\text{‰} \sim -23.0\text{‰}$, 所占比例大于 60%, 反映其对某些饵料生物有所偏好,而秀丽白虾的 $\delta^{13}\text{C}$ 值频率分布较为均匀,表明该虾对食物源的选择性不明显. 在不同湖泊中 2 种虾的 $\delta^{13}\text{C}$ 值频率分布范围的差异也不同.

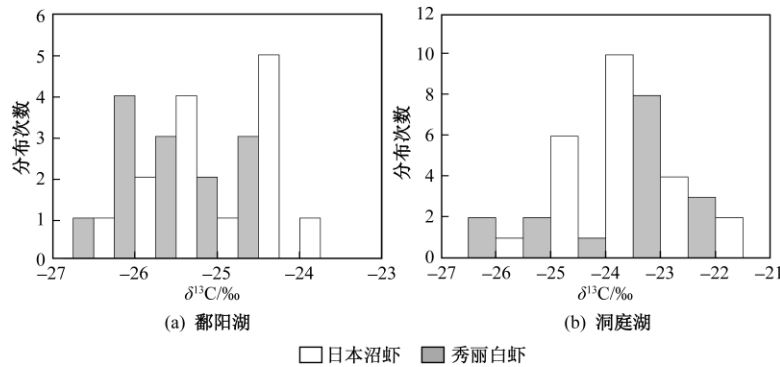
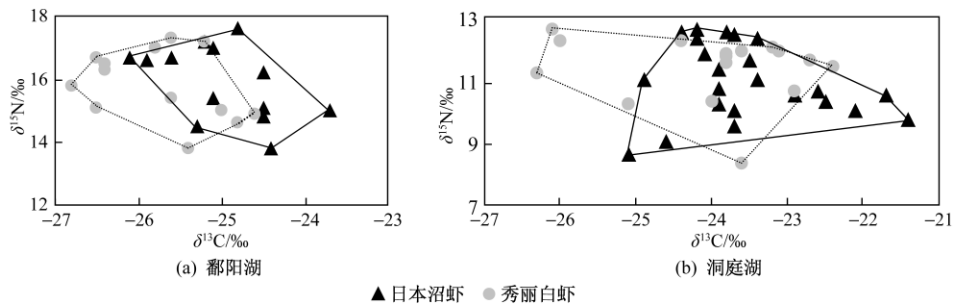


图 2 日本沼虾和秀丽白虾在鄱阳湖、洞庭湖中的 $\delta^{13}\text{C}$ 值频率分布
Fig. 2 Frequency distributions of $\delta^{13}\text{C}$ signatures in *M. nipponensis* and *E. modestus* from Poyang Lake and Dongting Lake

2.3 营养生态位及生态宽幅

由图 3 可知 2 种虾的营养生态位重叠程度较大, 表明二者的主要食物来源相同, 在食物网中所处的营养级相近, 并且存在激烈的种间竞争关系. 在鄱阳湖中, 日本沼虾的 $\delta^{15}\text{N}$ 值变幅 (NR), $\delta^{13}\text{C}$ 值变幅 (CR) 及

生态位总面积 (TA) 分别为 3.8、2.4、4.93, 均比秀丽白虾大 (见表 1). 然而, 在洞庭湖中, 日本沼虾的营养生态位变量却都小于秀丽白虾, 即后者的营养生态位更高, 占有的生态宽幅更大, 表明秀丽白虾对栖息地、食物资源的利用及竞争能力更强.



注: 闭合区域代表物种占有的总营养生态位.
图 3 鄱阳湖、洞庭湖日本沼虾与秀丽白虾的营养生态位

Fig. 3 Trophic niches of *M. nipponensis* and *E. modestus* in Poyang Lake and Dongting Lake

表 1 日本沼虾和秀丽白虾的营养生态位变量

Table 1 Trophic niche variables estimated for *M. nipponensis* and *E. modestus* in Poyang Lake and Dongting Lake

项目	鄱阳湖		洞庭湖	
	日本沼虾	秀丽白虾	日本沼虾	秀丽白虾
$\delta^{13}\text{C}$ 值变幅 (NR)	3.8	3.5	4.0	4.3
$\delta^{15}\text{N}$ 值变幅 (CR)	2.4	2.2	3.7	3.9
生态位总面积 (TA)	4.93	4.71	8.88	9.27

3 讨论

传统的胃含物分析认为,日本沼虾和秀丽白虾都是杂食性动物^[3, 12-13]. 日本沼虾主要摄食植物碎片和有机碎屑, 其次为水生昆虫、水生寡毛类、鱼虾和浮游动物^[12]. 秀丽白虾则主要以浮游动物、浮游植物、植物碎屑、有机碎屑及腐殖质等为食^[3, 13]. 该研究发现, 日本沼虾的 $\delta^{13}\text{C}$ 值显著大于秀丽白虾, 表明日本

沼虾摄食的食物源富集更多的 ^{13}C ,与XU等^[10]的研究结果一致.日本沼虾与秀丽白虾主要依赖于底栖食物源,但是后者摄食的浮游饵料相对较多.由于底栖动物食物源的 $\delta^{13}\text{C}$ 值要大于浮游食物源^[10],因而秀丽白虾的 $\delta^{13}\text{C}$ 值比日本沼虾要低.另外,储张杰等^[14]发现,日本沼虾偏爱动物性饵料,也支持了该研究结果.对于 $\delta^{15}\text{N}$ 值,XU等^[10]在巢湖和太湖的研究结果与该研究及WANG等^[15]的研究结果相反.这种差异可能与湖泊的富营养水平、连通性、食物资源等有关.对于大型通江湖泊(鄱阳湖、洞庭湖),由于其水流速度较快,交换周期较短,有利于藻类 ^{15}N 的富集^[16].在河流生态系统中,浮游食性的消费者及浮游动物的稳定同位素值往往表现为低 $\delta^{13}\text{C}$ 值、高 $\delta^{15}\text{N}$ 值^[17].所以在水流较急的通江湖泊,摄食浮游食物源相对较多的秀丽白虾可能表现出较高的 $\delta^{15}\text{N}$ 值.

对于日本沼虾而言,动物性饵料要比浮游植物重要得多^[12].一些动物性饵料(如水生寡毛类、水生昆虫、鱼虾和浮游动物等)出现频率虽然相对较低,但因其生物量较大,因而这类饵料在日本沼虾的食物组成中起着相对重要的作用^[12].该研究发现,日本沼虾 $\delta^{13}\text{C}$ 值的频率分布主要集中在 $-25.0\text{‰} \sim -23.0\text{‰}$,与日本沼虾偏爱动物性饵料的结论相同.然而秀丽白虾 $\delta^{13}\text{C}$ 值的频率分布较为均匀,表明其对饵料生物没有明显的选择性,主要取决于饵料生物的易得性^[3].由于鄱阳湖、洞庭湖营养水平及饵料资源的差异^[18-19],2种虾的 $\delta^{13}\text{C}$ 值频率分布范围的差异也不同.

理论上物种占据的生态位会受到许多因子的影响,其中生物因子包括食物密度及多样性、种群大小、竞争及捕食关系^[7, 20-21].种群密度的增大导致对食物的竞争压力增加,迫使一些物种扩大其原有的食物种类^[22-24],从而引起生态宽幅变大.当饵料生物的丰度较低时,物种的生态宽幅减小^[25].反之,物种的生态宽幅越大,其占有的食物资源及利用资源的能力越高,竞争能力越强^[26-27].该研究发现,日本沼虾与秀丽白虾的营养生态位重叠严重,表明二者的主要食物相同,竞争激烈,并且在食物网中占据的营养级相近.通过胃含物分析发现,2种虾胃含物中都含有植物碎片、有机碎屑、水生昆虫及浮游动物等食物源,并且相同种类的饵料生物出现率较高^[3, 12-13, 28],支持了日本沼虾和秀丽白虾营养生态位重叠的结论.同样,XU等^[10, 15]的研究也表明,日本沼虾和秀丽白虾的主要食物来源相同,重叠程度较大.在鄱阳湖中,日本沼

虾的 $\delta^{15}\text{N}$ 值变幅(NR)、 $\delta^{13}\text{C}$ 值变幅(CR)及生态位总面积(TA)均要大于秀丽白虾,而洞庭湖的结果则恰好相反.这一方面表明日本沼虾在鄱阳湖利用的食物资源更广,占有的生态宽幅比秀丽白虾大,与其在鄱阳湖的 $\delta^{13}\text{C}$ 值频率分布范围大于秀丽白虾的结论一致;另一方面是由于鄱阳湖虾类样品的采集在湖口区域,而洞庭湖虾类样品的采集区域在岳阳所致.采样区域生境的差异及人类活动干扰的程度不同,是导致日本沼虾和秀丽白虾在不同湖泊营养生态位差异的重要原因. CHEN等^[29]也发现,营养生态位的变化与生态系统的特征紧密相关.此外,在鄱阳湖采集的虾类样品数量偏少是造成2种虾在洞庭湖的营养生态位变量大于鄱阳湖的又一原因,在以后的研究中有待改进.相比鄱阳湖^[18],在富营养化水平相对较重的洞庭湖中^[19],秀丽白虾的营养生态位高于日本沼虾,占有的生态宽幅也更大,表明秀丽白虾在对栖息地、食物资源的利用及竞争能力要更强.该结论与2种虾类在鄱阳湖、巢湖及太湖的资源调查情况相符^[1, 27, 30].

初级食物源多样性的降低将导致消费者营养生态位的趋同,食物网稳定性减弱^[31].对于杂食性的日本沼虾和秀丽白虾而言,湖泊富营养化的加剧,尤其是沉水植物的衰退,将会引起食物资源及栖息地多样性下降,2种虾类更加倾向于摄食相同的饵料来源,进而导致营养生态位更加重叠,种间竞争越发激烈.因此,加强对湖泊富营养化的管理及虾类栖息地的保护,有利于维持虾类资源及湖泊生态系统的稳定.

4 结论

a) 通江湖泊(洞庭湖和鄱阳湖)中日本沼虾与秀丽白虾的 $\delta^{13}\text{C}$ 值呈明显差异,而 $\delta^{15}\text{N}$ 值没有发现显著性差异.在不同的湖泊中,稳定同位素值的差异大小表现不同,主要是由于湖泊的营养状况、饵料生物的组成及可有效利用的食物源之间的差异造成的.

b) 日本沼虾的 $\delta^{13}\text{C}$ 值范围大于秀丽沼虾,表明其食物来源更广.另外,日本沼虾 $\delta^{13}\text{C}$ 值的频率分布主要集中在 $-25.0\text{‰} \sim -23.0\text{‰}$ 区间,而秀丽白虾的分布则较为平均,表明日本沼虾偏爱某些食物源,秀丽白虾对饵料生物无明显选择性,与胃含物的观察结果一致.

c) 日本沼虾与秀丽白虾的营养生态位重叠严重,表明二者摄食的主要食物来源相同,在食物网中所处的营养级相近.在鄱阳湖中,日本沼虾的 $\delta^{15}\text{N}$ 值

变幅(NR)、 $\delta^{13}\text{C}$ 值变幅(CR)及生态位总面积(TA)均大于秀丽白虾,表明其获得的食物资源更广,占有的生态宽幅更大,而在洞庭湖的研究结果则相反,主要是由于采样区域生境的差异及人类活动干扰的程度不同所致。

参考文献(References):

- [1] 李长春,李云,谢钦铭,等. 鄱阳湖虾类资源最大持续产量及其开发利用的研究[J]. 江西科学, 1990, 8(4): 28-33.
- [2] 江辉,肖克宇,何燕林,等. 湖南沅江南洞庭湖湖虾蟹资源的初步调查[J]. 水利渔业, 2006, 26(5): 72-73.
- [3] 施炜钢,严小梅,邢旭文. 太湖秀丽白虾生物学与食性的研究[J]. 湖泊科学, 1995, 7(1): 69-76.
- [4] 史双昕,卢婉云,邵丁丁,等. 太湖、洞庭湖野生青虾肌肉中有机氯农药的气相色谱-质谱法测定[J]. 湖泊科学, 2009, 21(5): 631-636.
- [5] 祝云龙,姜加虎,黄群,等. 大通湖及东洞庭湖区生物体重金属的水平及其生态评价[J]. 湖泊科学, 2007, 19(6): 690-697.
- [6] ELTON C S. Animal ecology [M]. London: Sidgwick & Jackson, 1927: 22-211.
- [7] BEARHOP S, ADAMS C E, WALDRON S, et al. Determining trophic niche width: a novel approach using stable isotope analysis [J]. Journal of Animal Ecology, 2004, 73(5): 1007-1012.
- [8] HOBSON K A. Tracing origins and migration of wildlife using stable isotopes: a review [J]. Oecologia, 1999, 120(3): 314-326.
- [9] LAYMAN C A, ARRINGTON D A, MONTÑA C G, et al. Can stable isotope ratios provide for community-wide measures of trophic structure? [J]. Ecology, 2007, 88(1): 42-48.
- [10] XU Jun, ZHANG Min, XIE Ping. Stable isotope changes in freshwater shrimps (*Exopalaemon modestus* and *Macrobrachium nipponensis*): trophic pattern implications [J]. Hydrobiologia, 2008, 605(1): 45-54.
- [11] ZAMBRANO L, VALIENTE E, VANDER Z M J. Food web overlap among native axolotl (*Ambystoma mexicanum*) and two exotic fishes: carp (*Cyprinus carpio*) and tilapia (*Oreochromis niloticus*) in Xochimilco, Mexico City [J]. Biological Invasions, 2010, 12(9): 3061-3069.
- [12] 刘军,龚世园,何绪刚,等. 武汉日本沼虾食性的研究[J]. 淡水渔业, 2005, 35(1): 25-28.
- [13] 胡廷尖,周志明,黄鲜明,等. 秀丽白虾生物学特征及资源开发的初探[J]. 水利渔业, 2001, 21(2): 7-8.
- [14] 储张杰,李红敬,郭灿灿,等. 日本沼虾领域行为生态的初步研究[J]. 湖北农业科学, 2007, 46(4): 608-609.
- [15] WANG Yuyu, YU Xiubo, LI Wenhua, et al. Potential influence of water level changes on energy flows in a lake food web [J]. Chinese Science Bulletin, 2011, 56(26): 2794-2802.
- [16] TRUDEAU V, RASMUSSEN J B. The effect of water velocity on stable carbon and nitrogen isotope signatures of periphyton [J]. Limnology and Oceanography, 2003, 48(6): 2194-2199.
- [17] BUNN S E, DAVIES P M, WINNING M. Sources of organic carbon supporting the food web of an arid zone floodplain river [J]. Freshwater Biology, 2003, 48(4): 619-635.
- [18] 王毛兰,周文斌,胡春华. 鄱阳湖区水体氮、磷污染状况分析[J]. 湖泊科学, 2008, 20(3): 334-338.
- [19] 杨坪罗,易敏. 东洞庭湖水生态健康状况分析[J]. 内陆水产, 2009(11): 44-45.
- [20] VAN VALEN L. Morphological variation and width of ecological niche [J]. The American Naturalist, 1965, 99: 377-390.
- [21] FOX B J. Niche parameters and species richness [J]. Ecology, 1981, 62(6): 1415-1425.
- [22] WERNER E E. Species packing and niche complementarity in three sunfishes [J]. The American Naturalist, 1977, 111: 553-578.
- [23] SVANBÄCK R, BOLNICK D I. Intraspecific competition drives increased resource use diversity within a natural population [J]. Proceedings of Royal Society of London B, 2007, 274: 839-844.
- [24] SVANBÄCK R, PERSSON L. Individual diet specialization, niche width and population dynamics: implication for trophic polymorphisms [J]. Journal of Animal Ecology, 2004, 73(5): 973-982.
- [25] WINEMILLER K O, PIANKA E R, VITT L J, et al. Food web laws or niche theory? six independent empirical tests [J]. The American Naturalist, 2001, 158(2): 193-199.
- [26] HUTCHINSON G E. A treatise on limnology [M]. New York: John Wiley & Sons Inc, 1957.
- [27] OLSSON K, STENROTH P, NYSTRÖM P, et al. Invasions and niche width: do niche width of an introduced crayfish differ from a native crayfish? [J]. Freshwater Biology, 2009, 54(8): 1731-1740.
- [28] 温周瑞,谢平,徐军. 太湖贡湖湾虾类种类组成与时空分布特征[J]. 湖泊科学, 2011, 23(6): 961-966.
- [29] CHEN Gang, WU Zaohe, GU Binhe, et al. Isotopic niche overlap of two planktivorous fish in southern China [J]. Limnology, 2011, 12(2): 151-155.
- [30] 谈奇坤,温耀群,董秀英,等. 巢湖虾类资源现状及其利用意见[J]. 淡水渔业, 1985(3): 10-13.
- [31] ROONEY N, MCCANN K S, GELLNER G, et al. Structural asymmetry and the stability of diverse food webs [J]. Nature, 2006, 442: 265-269.

(责任编辑: 郑朔方)