

中国百种杰出学术期刊
中国精品科技期刊
中国科协优秀期刊
中国科学院优秀科技期刊
新中国 60 年有影响力的期刊
国家期刊奖

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

Acta Ecologica Sinica

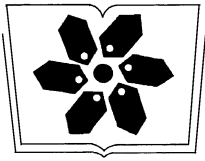
(Shengtai Xuebao)

第 31 卷 第 3 期
Vol.31 No.3
2011



中国生态学学会
中国科学院生态环境研究中心
科学出版社

主办
出版



中国科学院科学出版基金资助出版

生态学报

(SHENGTAI XUEBAO)

第 31 卷 第 3 期 2011 年 2 月 (半月刊)

目 次

景观生态学原理在城市土地利用分类中的应用·····	李伟峰, 欧阳志云, 肖 焱 (593)
中国特有濒危植物夏蜡梅的交配系统·····	赵宏波, 周莉花, 郝日明, 等 (602)
昆仑山北坡不同海拔塔里木沙拐枣的光合生理生态特性·····	朱军涛, 李向义, 张希明, 等 (611)
天山云杉天然林不同林层的空间格局和空间关联性·····	李明辉, 何风华, 潘存德 (620)
大气 CO ₂ 浓度升高对 B 型烟粉虱大小、酶活及其寄主的选择性影响·····	王学霞, 王国红, 戈 峰 (629)
桃小食心虫越冬幼虫过冷却能力及体内生化物质动态·····	王 鹏, 凌 飞, 于 毅, 等 (638)
象山港不同养殖类型海域大型底栖动物群落比较研究·····	廖一波, 寿 鹿, 曾江宁, 等 (646)
北部湾宝刀鱼的摄食生态·····	颜云榕, 杨厚超, 卢伙胜, 等 (654)
黄河三角洲自然保护区东方白鹤的巢址利用·····	段玉宝, 田秀华, 朱书玉, 等 (666)
贺兰山野化牦牛冬春季食性·····	姚志诚, 刘振生, 王兆锭, 等 (673)
杉木生长及土壤特性对土壤呼吸速率的影响·····	王 丹, 王 兵, 戴 伟, 等 (680)
中国干旱半干旱区潜在植被演替·····	李 飞, 赵 军, 赵传燕, 等 (689)
夜间增温和施肥对川西亚高山针叶林两种树苗根际效应的影响·····	卫云燕, 尹华军, 刘 庆, 等 (698)
洱海流域 44 种湿地植物的氮磷含量特征·····	鲁 静, 周虹霞, 田广宇, 等 (709)
杠柳幼苗对不同强度干旱胁迫的生长与生理响应·····	安玉艳, 梁宗锁, 郝文芳 (716)
柠条细根的空间分布特征及其季节动态·····	史建伟, 王孟本, 陈建文, 等 (726)
NaCl 和 Na ₂ SO ₄ 胁迫下两种刺槐叶肉细胞叶绿体超微结构·····	孟凡娟, 庞洪影, 王建中, 等 (734)
设施番茄果实生长与环境因子的关系·····	程智慧, 陈学进, 赖琳玲, 等 (742)
嫁接茄子根系分泌物变化及其对黄萎菌的影响·····	周宝利, 刘 娜, 叶雪凌, 等 (749)
华北地区冬小麦干旱风险区划·····	吴东丽, 王春乙, 薛红喜, 等 (760)
干旱胁迫条件下冷型小麦灌浆结实期的农田热量平衡·····	严菊芳, 张嵩午, 刘党校 (770)
秸秆不同还田量对宁南旱区土壤水分、玉米生长及光合特性的影响·····	高 飞, 贾志宽, 路文涛, 等 (777)
盐胁迫下不同基因型冬小麦渗透及离子的毒害效应·····	徐 猛, 马巧荣, 张继涛, 等 (784)
阿魏酸、对羟基苯甲酸及其混合液对土壤氮及相关微生物的影响·····	母 容, 潘开文, 王进闯, 等 (793)
岷江上游油松与云杉人工林土壤微生物生物量及其影响因素·····	江元明, 庞学勇, 包维楷 (801)
荒漠沙蒿根围 AM 真菌和 DSE 的空间分布·····	贺学礼, 王银银, 赵丽莉, 等 (812)
百菌清对落叶松人工防护林土壤微生物群落的影响·····	邵元元, 王志英, 邹 莉, 等 (819)
居住区植物绿量与其气温调控效应的关系·····	李英汉, 王俊坚, 李贵才, 等 (830)
近 33 年白洋淀景观动态变化·····	庄长伟, 欧阳志云, 徐卫华, 等 (839)
舟山群岛旅游交通生态足迹评估·····	肖建红, 于庆东, 刘 康, 等 (849)
¹⁵ N 交叉标记有机与无机肥料氮的转化与残留·····	彭佩钦, 仇少君, 侯红波, 等 (858)
沉积物老化过程中 DOC 含量变化对菲吸附-解吸的影响·····	焦立新, 孟 伟, 郑丙辉, 等 (866)
湖南石门、冷水江、浏阳 3 个矿区的苕麻重金属含量及累积特征·····	余 玮, 揭雨成, 邢虎成, 等 (874)
问题讨论	
近 55a 来河西走廊荒漠绿洲区季节变化特征及其对胡杨年生长期的影响·····	刘普幸, 张克新 (882)
利用 HYSPLIT 模型分析麦蚜远距离迁飞前向轨迹·····	郁振兴, 武予清, 蒋月丽, 等 (889)

北部湾宝刀鱼的摄食生态

颜云榕^{1,2}, 杨厚超¹, 卢伙胜^{1,2,*}, 李荣威¹

(1. 广东海洋大学, 水产学院, 湛江 524088; 2. 广东海洋大学, 南海渔业资源监测与评估中心, 湛江 524088)

摘要: 根据 2008 年 10 月至 2009 年 9 月的北部湾主要渔港逐月采样以及 2010 年 2 月北部湾海域的拖网调查资料, 以传统胃含物分析方法为基础, 结合碳、氮稳定同位素技术对北部湾宝刀鱼 (*Chirocentrus dorab*) 的饵料组成、营养级和摄食习性随叉长和性腺发育的个体变化等进行研究。结果表明: 宝刀鱼既摄食小型中上层鱼类, 又摄食底栖鱼类、虾蟹类和头足类, 属于广食性动物食性鱼类。以相对重要性指数百分比 (% IRI) 为指标, 表明鱼类为其最主要饵料 (99.7%), 其中优势饵料生物为犀鲭属 (*Bregmaceros* sp.)、小公鱼属 (*Thryssa* sp.)、小沙丁鱼属 (*Sardinella* sp.) 和圆鲹属 (*Decapterus* sp.) 等。宝刀鱼摄食强度和饱满指数的月份差异十分显著 ($P < 0.001$), 而以 Brillouin 指数表征的各月份营养多样性则无显著差异。雌性性腺成熟度指数 (GSI) 显示北部湾宝刀鱼 1 年中呈现 1 个产卵高峰期 (5—8 月), 与北部湾中上层水温高峰趋势相符, 表明宝刀鱼产卵高峰与水温密切相关, 且产卵期间摄食强度没有降低。随着叉长的增长, 北部湾宝刀鱼饵料生物个数变化较小, 但平均单个饵料生物重量却明显增加。聚类分析表明, 北部湾宝刀鱼以相似性系数可划分为 380mm 以下、381—530mm 以及 530mm 以上 3 个不同食性叉长组。以 $\delta^{15}\text{N}$ 计算所得宝刀鱼各叉长组的平均营养级为 3.4。

关键词: 北部湾; 宝刀鱼; 胃含物分析; 碳氮稳定同位素; 摄食习性; 营养级

Feeding ecology of dorab wolf-herring, *Chirocentrus dorab* from the Beibu Gulf

YAN Yunrong^{1,2}, YANG Houchao¹, LU Huosheng^{1,2,*}, LI Rongwei¹

1 College of Fisheries, Guangdong Ocean University, Zhanjiang 524088, China

2 Center of South China Sea Fisheries Resources Monitoring and Assessment, Guangdong Ocean University, Zhanjiang 524088, China

Abstract: Based on the monthly sampling in the main fishing ports such as Beihai, Basuo, Jianghong and Sanya of the Beibu Gulf from October 2008 to September 2009, and combined with the fishery-dependent trawl survey in February 2010, traditional stomach contents analysis and stable isotope analysis were used to study the prey category, trophic position and ontogenetic feeding habit shifts of the dorab wolf-herring, *Chirocentrus dorab* in the Beibu Gulf, South China Sea. A total of 645 (344 stomachs with contents) dorab wolf-herring, ranging in size from 193 mm to 782 mm in fork length, were randomly sampled through the trawl and gillnet commercial fishing. The results showed that the dorab wolf-herring of the Beibu Gulf was omnivorous and predated not only on the small pelagic fish but also on benthic fish, shrimps, crabs and squids. Pisces were the primary prey components of the diet with a percentage of Index of Relative Importance (% IRI) of 99.7%. Among these, 24 species were identified. Genera such as *Bregmaceros* sp., *Thryssa* sp., *Sardinella* sp. and *Decapterus* sp. were dominant in the dorab wolf-herring food constituent. The small fish, *Stolephorus zollingeri*, *Bregmaceros rarisquamosus*, *Sardinella jussieu*, *Decapterus maruadsi*, *Stolephorus commersoni* and *Caranx mate*, were also relatively important in the diet of this fish, with the weight percentages of 10.27%, 9.36%, 4.72%, 4.11%, 2.77% and 2.73%, respectively, whereas the other species prey were only present in lower percentages. The research findings revealed that the mean repletion index and vacuity coefficient varied considerably by month, while trophic diversity, calculated by Brillouin index H_2 , proved to be relatively consistent throughout the year. The spawn peak, from May to August, was recognized by the female gonad somatic index (GSI). Furthermore, the peak periods were consistent with the

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (30771653); 农业部南海渔业资源调查专项资助项目 (2008); 广东省教育厅高校优秀青年创新人才培育项目 (LYM09089); 广东海洋大学校选科研课题资助项目 (2009-11)

收稿日期: 2010-06-24; 修订日期: 2010-10-14

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: luhs@gdou.edu.cn

water temperature of surface, 20m and 30m layers provided by France CATSAT fisheries remote sensing system. It can be safely concluded that as one of the pelagic fishes, dorab wolf-herring's spawning and reproduction correlate with the sea surface temperature. Mean repletion index (RI) was highest ($RI = 2.50\%$) at the stage of V indicating that this group of dorab wolf-herring maintained strong feeding intensity during the reproduction periods. Meanwhile the vacuity coefficient was almost lowest ($VC = 0.75\%$) at the stage of VI—II indicating that the fish reverted from Stage VI to Stage II increasing their food input to compensate for energy loss during reproduction. The 12 fork length classes demonstrated significant differences with respect to prey weight and prey numbers. The tendency of mean prey weight and number increased with the body size following with the improvement of the feeding organs and swimming ability of dorab wolf-herring. Using PRIMER 5.2 software, the cluster analysis, based on% IRI values for the above fork length classes, showed that the feeding habits of dorab wolf-herring could be classified into three groups: under 380mm, between 381 to 530mm, and above 531mm. The absence of a significant linear correlation between the fork length and $\delta^{13}C$ lead to the conclusion that dorab wolf-herring were feeding all the water layers during the major part of their biological life cycle. With an average value of 3.4, the trophic level of dorab wolf-herring calculated by $\delta^{15}N$ varied not significantly from the fork length. It can be concluded that stable isotope analysis will play an import role in evaluating the fish feeding ecology and in constructing the marine food web.

Key Words: the Beibu Gulf; *Chirocentrus dorab*; stomach content analysis; $\delta^{13}C$ and $\delta^{15}N$ stable isotope analysis; feeding habits; trophic level

鱼类的摄食生态是鱼类生态学的重要内容之一。鱼类通过摄食活动获得能量和营养,为个体的存活、生长、发育和繁殖,以及种群的增长提供物质基础^[1]。伴随着捕捞导致食物网结构营养级降低^[2]、海洋环境污染、渔业资源衰退等一系列海洋生态系统失衡问题的出现,作为承载海洋生态系统能量传输和物质循环重要环节的鱼类摄食及其相关生态研究正受到广泛的关注。

国际上对鱼类摄食生态的研究不仅包括斯科舍海(Scotia sea)的灯笼鱼科(Myctophid)^[3]、西南印度洋的黄带拟羊鱼(*Mulloidichthys flavolineatus*)^[4]和墨西哥湾的西大西洋笛鲷(*Lutjanus campechanus*)^[5]等底层鱼类,也有西北太平洋的剑鱼(*Xiphias gladius*)^[6]、墨西哥湾的一些中上层鱼类仔稚鱼^[7]以及阿拉斯加湾的毛鳞鱼(*Mallotus villosus*)及狭鳕(*Theragra chalcogramma*)^[8]等中上层鱼类。而在国内,目前的研究主要是以鱼类的摄食习性及其随个体和时间发育的变化为主,包括黄海、东海和南海的带鱼(*Trichiurus lepturus*)^[9-12]、北部湾的多齿蛇鲻(*Saurida tumbil*)^[13]、东海的白姑鱼(*Pennahia argentatus*)和小黄鱼(*Pseudosciaena polyactis*)^[14],而关于中上层高营养层次鱼类摄食生态的仅有大西洋大眼金枪鱼(*Thunnus obesus*)^[15]等研究。宝刀鱼是北部湾中上层鱼类中最重要的渔获种类,具有重要的经济和生态价值,然而该鱼种摄食生态及生物学系统的研究尚属空白,国内外文献中宝刀鱼的食性研究仅见于索罗门群岛潟湖的零星报道^[16]。

本研究通过一周年逐月对北部湾宝刀鱼胃含物的定量分析及该海域中上层水温的渔业遥感环境数据,研究宝刀鱼饵料生物组成、摄食强度及其随生长发育和月份的变化,分析摄食习性与产卵高峰和海水温度的关系,并结合碳、氮稳定同位素研究宝刀鱼食物来源与营养级随叉长和周年变化,旨在补充宝刀鱼食性和生物学系统研究内容,丰富中上层鱼类摄食生态资料,为构建北部湾海洋食物网模型提供基础数据。

1 材料和方法

1.1 样品采集与分析

2008年10月至2009年9月,逐月在广西北海以及按季节在广东江洪、海南八所和三亚等北部湾主要渔港进行1a渔获物采样,样品主要为底拖网和流刺网的渔获物,采样渔船作业范围为北部湾内中方海域及北部湾口海域。共采集宝刀鱼样品645尾(实胃数344尾)。按照海洋调查规范(GB12763.3-91)^[17]在渔港现场测定其叉长、体重、性腺重以及纯体重等生物学参数,胃含物低温速冻并带回实验室进行分析。

体重和纯体重精确到克,性腺重精确到 0.1g,叉长精确到 1 mm。性腺成熟度分为 6 期^[17-18],本研究同时考虑繁殖后的 VI 转 II 期,以超过 III 期平均叉长界定 II 期中的 VI—II 期,以进一步分析 II 期与 VI—II 摄食强度区别^[13]。胃从接近口部的食道处剪断,并速冻在零下 20℃ 作分析用。

2010 年 2 月 20 日—2010 年 3 月 1 日,随广西北海“桂北渔 63021”拖网渔船出海现场采样,主机功率 588kW,船长 40.8m,船宽 6.8m,采集宝刀鱼及其主要饵料生物,带回实验室进行生物学测定后作同位素分析。

在实验室内,使用双筒解剖镜(Leica Zoom 2000 Z45V)进行胃含物分析,参考海洋生物分类资料^[20-22],用传统胃含物分析方法对宝刀鱼的食物组成进行研究,依据形态特征尽可能精确分到最低的分类阶元,用滤纸吸干表面水后,用精度为 0.001g 的电子天平(Shimadzu Auy220)分别称重。

1.2 稳定同位素分析

取宝刀鱼及其饵料鱼类背部肌肉适量,混合相同长度组肌肉(5—10 尾),虾取腹部肌肉,贝类取闭壳肌,所有样品处理完后在人工气候箱(HPG-400HX)55℃ 下 48h 恒温烘干至恒重,最后用石英研钵充分磨匀以备稳定同位素分析。

实验样品碳、氮稳定同位素比值用德国 Thermo Finnigan 公司的 Flash EA1112 元素仪与 Delta Plus XP 稳定同位素质谱仪通过 ConFlo II 相连进行测定。为保证结果准确性,同一样品的碳、氮稳定同位素分别进行测定。每种生物测定 3 个平行样,为保持实验结果的准确性和仪器的稳定性,每测定 5 个样品后插测 1 个标准样,并且对个别样品进行 2—3 次复测。碳、氮稳定同位素比值精密密度为 $\pm 0.2\%$ 。

1.3 营养多样性指数

计算营养多样性指数采用合并样方法^[23-26],根据随机合并的累计胃样本数量来计算累计营养多样性,评价各个月份的样本数量是否满足计算要求,采用 Brillouin 指数 H_k 评估营养多样性^[27]:

$$H_k = \frac{1}{N} \log_{10} \frac{N!}{N_1! N_2! \dots N_k!} \quad (1)$$

式中, N 指 k 种饵料生物物种的总个数, N_k 指第 k 种饵料的个体数。每个月 H_k 进行随机迭代 1000 次取平均值取得,通过计算机 C 语言编程实现;同时计算最大营养多样性指数(total trophic diversity) H_z 和处于 $H_z \pm 0.05H_z$ 范围内的个数,如果在此范围内每个月个数不少于 2,则可认为各月样本数量满足评估营养多样性的要求^[28]。

1.4 数据处理与统计分析

采用物种个数百分比(%N)、饵料质量百分比(%W)、出现频率(%F)和相对重要性指数百分比(%IRI)等指标,评价各种饵料的重要性^[29]:

$$IRI = (\%N + \%W) \times \%F \quad (2)$$

$$\%IRI = (IRI / \sum IRI) \times 100 \quad (3)$$

用饱满指数(RI,%)和空胃率^[24,30]评估宝刀鱼每月的摄食强度,用雌性性成熟指数(GSI)^[30]判断宝刀鱼 1a 中的繁殖高峰期,并与饱满指数、空胃率等相对比研究其食性随个体发育阶段的变化,公式如下:

$$RI = \text{饵料质量} / \text{纯体质量} \times 100 \quad (4)$$

$$GSI = \text{卵巢质量} / \text{纯体质量} \times 100 \quad (5)$$

稳定同位素质谱仪分析生物样品中¹⁵N/¹⁴N 和¹³C/¹²C 的比值, $\delta^{15}\text{N}$ 和 $\delta^{13}\text{C}$ 按以下公式计算得出^[32]:

$$\delta^{15}\text{N} = \left(\frac{{}^{15}\text{N}/{}^{14}\text{N}_{\text{样品}}}{{}^{15}\text{N}/{}^{14}\text{N}_{\text{大气}}} - 1 \right) \times 1000 \quad (6)$$

$$\delta^{13}\text{C} = \left(\frac{{}^{13}\text{C}/{}^{12}\text{C}_{\text{样品}}}{{}^{13}\text{C}/{}^{12}\text{C}_{\text{箭石}}} - 1 \right) \times 1000 \quad (7)$$

$$TL = 1 + \sum_{i=1}^s (T_i \times P_i) \quad [1] \quad (8)$$

$$TL = \frac{\delta^{15}N_{\text{样品}} - \delta^{15}N_0}{\delta^{15}N_c} + 2.0 \quad [35] \quad (9)$$

式中, $^{15}N/^{14}N_{\text{大气}}$ 为标准大气氮同位素比值^[36]; $^{13}C/^{12}C_{\text{箭石}}$ 为国际标准物质箭石 (Peedee Belemnite limestone) 的碳同位素比例^[37]; TL 为某种鱼类的营养级; T_i 为饵料的营养级; P_i 为饵料在食物中所占的比例, s 为饵料种类。 $\delta^{15}N_{\text{样品}}$ 为鱼类样品测量所得的 δ 值; $\delta^{15}N_0$ 营养等级的基线, $\delta^{15}N_c$ 为营养等级富集度。一般采用生态系统中常年存在, 食性简单的浮游动物或底栖生物等消费者作为基线生物^[37], 华贵栉孔扇贝 (*Chlamys nobilis*) 符合此要求, 在本研究中作为计算营养级的基线值 (baseline), 营养等级富集度取 3.4‰^[33,35], 华贵栉孔扇贝的营养级定为 2.0^[38]。

北部湾各月份表面水温 (SST)、20m 水温及 30m 水温数据来自法国 CATSAT (凯撒) 渔业遥感系统。统计分析应用 SPSS 17.0 软件, 应用非参数秩检验 (Kruskal-Wallis test- $H(d, N)$)^[39] 检验每月饱满指数、各叉长组的饵料重量和饵料个数差异显著性, 并用单样本 t -检验分析营养多样性和营养级周年变化。聚类分析采用 Primer 5.2 软件^[40], 分析各叉长组宝刀鱼基于各饵料生物 % IRI 的 Bray-Curtis 相似性指数^[41]。

2 结果

2.1 营养多样性曲线

2008 年 10 月至 2009 年 9 月逐月在北部湾主要渔港采样, 共取得宝刀鱼样品 645 尾 (表 1), 其中实胃样品 344 尾, 样品叉长范围 193—782 mm, 各月平均叉长 254—492 mm; 2009 年 6 月休渔期样品全部来自八所单片刺网渔获, 由于胃含物中仅有不可辨认鱼类导致营养多样性指数 (H_z) 为 0, 其余各月份的 H_z 变化较小, 以周年平均值 0.446 作单样本 t -检验, H_z 月份差异不显著 ($t = -0.002, P = 0.998$)。

表 1 北部湾宝刀鱼样品情况及营养多样性指数

Table 1 Summary of diet samples and trophic diversity of dorab wolf-herring in the Beibu Gulf

时间 Time	叉长范围 FL range /mm	平均叉长 Average FL /mm	总胃数 Stomachs number	空胃数 Empty stomachs	营养多样性 Trophic diversity H_z	营养级 Trophic level TL	$H_z \pm 0.05H_z$ 样品个数 Samples number within $H_z \pm 0.05H_z$
2008-10	285—540	360 ± 13	24	4	0.30	3.05	13
2008-11	255—517	341 ± 8	63	35	0.56	3.00	26
2008-12	236—530	254 ± 24	54	24	0.57	2.68	23
2009-01	339—520	390 ± 8	25	9	0.54	2.46	8
2009-02	237—416	315 ± 6	50	30	0.28	3.09	31
2009-03	276—503	376 ± 8	57	40	0.27	3.08	29
2009-04	277—782	410 ± 13	45	23	0.63	2.81	14
2009-05	276—766	439 ± 7	92	41	0.79	3.22	40
2009-06	444—595	492 ± 10	17	15	0	3.14	—
2009-07	290—555	411 ± 7	49	39	0.20	3.04	22
2009-08	193—743	408 ± 10	119	59	0.51	2.81	60
2009-09	303—724	403 ± 9	50	22	0.70	3.04	16

除 2009 年 6 月外, 其余各月样品 H_z 落在 $H_z \pm 0.05H_z$ 范围内均超过 2 个 (表 1), 而各条曲线总体趋向于渐近线 (图 1), 说明各月样品数足够用于分析宝刀鱼的摄食情况, 按月绘制北部湾宝刀鱼的营养多样性曲线 (trophic diversity curves), 其中, 2009 年 5 月最高 (0.79), 而 2009 年 6、7 月最低, 分别为 0 和 0.20。

2.2 食物组成

北部湾宝刀鱼摄食包括鱼类、甲壳类和头足类 3 大类, 其中可辨别鱼类 24 种 (表 2)。从各饵料种类的相对重要性指数百分比 (% IRI) 来看, 鱼类为该海域宝刀鱼主要饵料生物, 占食物组成 99.7%, 其次为甲壳类和

头足类,分别占 0.2% 和 0.1%;在能鉴定出的种类中,优势饵料生物为犀鲭属 (*Bregmaceros* sp.)、小公鱼属 (*Thryssa* sp.)、小沙丁鱼属 (*Sardinella* sp.)、毛虾属 (*Acetes* sp.) 和圆鲹属 (*Decapterus* sp.) 等。

2.3 摄食习性随月份变化及与水温的关系

北部湾宝刀鱼摄食强度月变化明显(图 2),12 个月间平均饱满指数 *RI* 差异极显著(Kruskal-Wallis 检验 $H_{(11,645)} = 50.585, P < 0.001$),月平均 *RI* 在 11 月、3 月及 6 月出现 3 个峰值,并且与空胃率呈现负相关性,反映北部湾宝刀鱼在全年中摄食强度波动明显。2009 年 6 月平均 *RI* 最低而空胃率最高,而平均 *RI* 最高值(2.31)则出现在 2009 年 4 月。

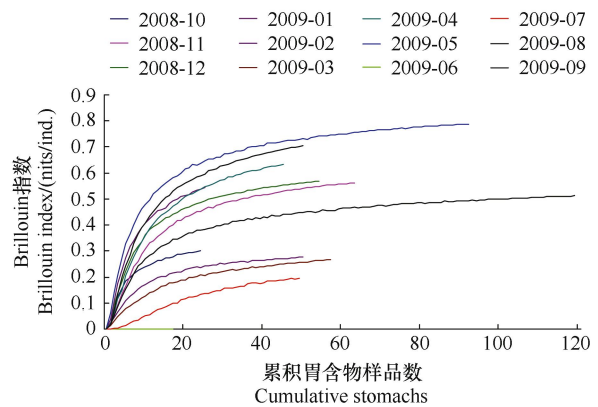


图 1 北部湾宝刀鱼各月份营养多样性曲线图

Fig. 1 Cumulative monthly trophic diversity curves of dorab wolf-herring in the Beibu Gulf

表 2 北部湾宝刀鱼的食物组成

Table 2 Diet composition of dorab wolf-herring in the Beibu Gulf

饵料种类 Prey category	个数 Number	个数百分比 Number percentage N/%	质量百分比 Weight percentage W/%	出现频率 Frequency F	频率百分比 Frequency percentage F/%	相对重要性指数 Index of relative importance IRI	IRI 比例 Index of relative importance percentage% IRI/%
甲壳类 Crustacea							
中国毛虾 <i>Acetes chinensis</i>	21	2.70	0.12	10	2.44	6.89	0.16
鹰爪虾 <i>Trachypenaeus curvirostris</i>	1	0.13	+	1	0.24	0.03	+
不可辨别虾类 Unidentified shrimps	6	0.77	0.03	5	1.22	0.98	0.02
不可辨别蟹类 Unidentified crabs	1	0.13	0.01	1	0.24	0.03	+
鱼类 Pisces							
金色小沙丁鱼 <i>Sardinella aurita</i>	4	0.51	0.46	3	0.73	0.71	0.02
裘氏小沙丁鱼 <i>Sardinella jussieu</i>	8	1.03	4.72	5	1.22	7.03	0.16
鳓 <i>Ilisha elongata</i>	1	0.13	0.12	1	0.24	0.06	+
尖吻小公鱼 <i>Stolephorus heteroloba</i>	3	0.39	0.56	3	0.73	0.69	0.02
青带小公鱼 <i>Stolephorus zollingeri</i>	33	4.24	10.27	15	3.67	53.23	1.21
康氏小公鱼 <i>Stolephorus commersoni</i>	9	1.16	2.77	7	1.71	6.73	0.15
中华小公鱼 <i>Stolephorus chinensis</i>	9	1.16	1.77	5	1.22	3.58	0.08
小公鱼属 <i>Stolephorus</i> sp.	51	6.56	12.74	34	8.31	160.43	3.64
赤鼻棱鯷 <i>Thryssa kammalensis</i>	1	0.13	0.30	1	0.24	0.11	+
汉氏棱鯷 <i>Thryssa hamiltonii</i>	4	0.51	2.21	3	0.73	2.00	0.05
中颌棱鯷 <i>Thryssa mystax</i>	1	0.13	0.38	1	0.24	0.12	+
杜氏棱鯷 <i>Thryssa dussumieri</i>	1	0.13	0.37	1	0.24	0.12	+
长颌棱鯷 <i>Thryssa setirostris</i>	12	1.54	2.32	7	1.71	6.61	0.15
黄鲫 <i>Setipinna taty</i>	4	0.51	2.25	2	0.49	1.35	0.03
少鳞犀鲭 <i>Bregmaceros Rarisquamosus</i>	178	22.88	9.36	79	19.32	622.76	14.14
银腰犀鲭 <i>Bregmaceros nectabanus</i>	8	1.03	0.14	5	1.22	1.42	0.03
犀鲭属 <i>Bregmaceros</i> sp.	1	0.13	0.02	1	0.24	0.04	+
多鳞鳢 <i>Sillago maculate</i>	3	0.39	0.42	2	0.49	0.39	0.01
丽叶鲹 <i>Caranx kalla</i>	2	0.26	1.77	2	0.49	0.99	0.02
游鳍叶鲹 <i>Caranx mate</i>	4	0.51	2.73	3	0.73	2.38	0.05
蓝圆鲹 <i>Decapterus maruadsi</i>	6	0.77	4.11	6	1.47	7.16	0.16

续表

饵料种类 Prey category	个数 Number	个数百分比 Number percentage N/%	质量百分比 Weight percentage W/%	出现频率 Frequency F	频率百分比 Frequency percentage F/%	相对重要性指数 Index of relative importance IRI	IRI 比例 Index of relative importance percentage% IRI/%
竹荚鱼 <i>Trachurus japonicus</i>	2	0.26	0.72	2	0.49	0.48	0.01
鹿斑鲷 <i>Leiognathus ruconius</i>	2	0.26	0.25	2	0.48	0.12	+
粗纹鲷 <i>Leiognathus lineolatus</i>	4	0.51	0.62	3	0.73	0.83	0.02
条鲷 <i>Leiognathus riviulatus</i>	1	0.13	0.00	1	0.24	0.03	+
带鱼 <i>Trichiurus lepturus</i>	8	1.03	2.23	8	1.96	6.38	0.14
不可辨别鱼类 Unidentified fishes	371	47.69	34.28	175	42.79	3506.97	79.62
头足类 Cephalopoda							
乌贼属 <i>Sepia</i> sp.	8	1.03	0.40	6	1.47	2.09	0.05
枪乌贼属 <i>Loligo</i> sp.	2	0.26	0.14	2	0.48	0.09	+
中国枪乌贼 <i>Loligo chinensis</i>	4	0.51	1.37	3	0.73	1.38	0.03
双喙耳乌贼 <i>Sepiola birostrata</i>	1	0.13	0.01	1	0.24	0.03	+

+ ;所占比例 <0.01%

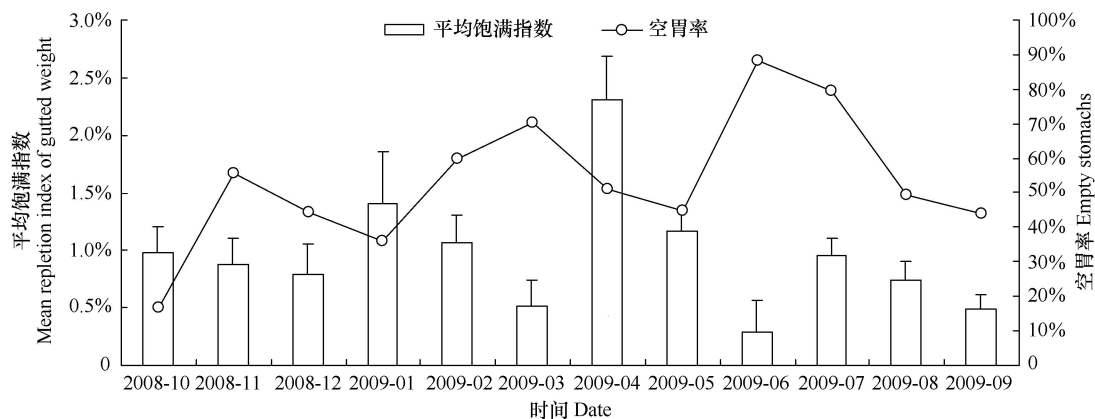


图2 北部湾宝刀鱼月平均饱满指数与空胃率关系图

Fig. 2 Monthly variation of mean repletion index and vacuity index of dorab wolf-herring in the Beibu Gulf

图3反映主要饵料生物在每月中重量百分比组成,其中,不能辨别的鱼类百分比最高,为34.28%,每月均有出现;其次为小公鱼属(12.74%),再次为青带小公鱼(*Stolephorus zollingeri*, 10.27%)和少鳞犀鲷(*Bregmaceros rarisquamosus*, 9.36%)。其他饵料种类比例相对较低,部分饵料生物仅在个别月份出现,如金色小沙丁鱼(*Sardinella aurita*)、鰺(*Ilisha elongata*)、康氏小公鱼(*Stolephorus commersoni*)、赤鼻棱鯷(*Thryssa kammalensis*)、中颌棱鯷(*Thryssa mystax*)、黄鲫(*Setipinna taty*)、多鳞鱧(*Sillago maculate*)、游鳍叶鲷(*Caranx mate*)、鹿斑鲷(*Leiognathus ruconius*)、粗纹鲷(*Leiognathus lineolatus*)、条鲷(*Leiognathus riviulatus*)、鹰爪虾(*Trachypenaeus curvirostris*)和双喙耳乌贼(*Sepiola birostrata*)等,反映北部湾宝刀鱼摄食种类多样,具有较强的食物适应性。

根据宝刀鱼主要饵料生物 $\delta^{15}\text{N}$ 稳定同位素值代入式(6)计算出相应的营养级,并结合各月份食物重量比例(图3)分别计算出各月宝刀鱼的营养级,列于表1中。宝刀鱼各月平均值为2.95,以该值作单样本 t -检验,营养级TL月份差异不显著($t=0.26, P=0.979$)。

根据式(5)计算各月雌性宝刀鱼GSI(图4)。图中显示5—8月份为唯一的1个峰值期,表明北部湾宝刀鱼在该阶段进入产卵高峰。图4中由CATSAT(凯撒)渔业遥感系统提供的表层海水温度(SST)与20m深度处的水温十分接近,相比30m深度处的水温略高,但该3个水层水温的变化趋势基本一致,且在周年水温高

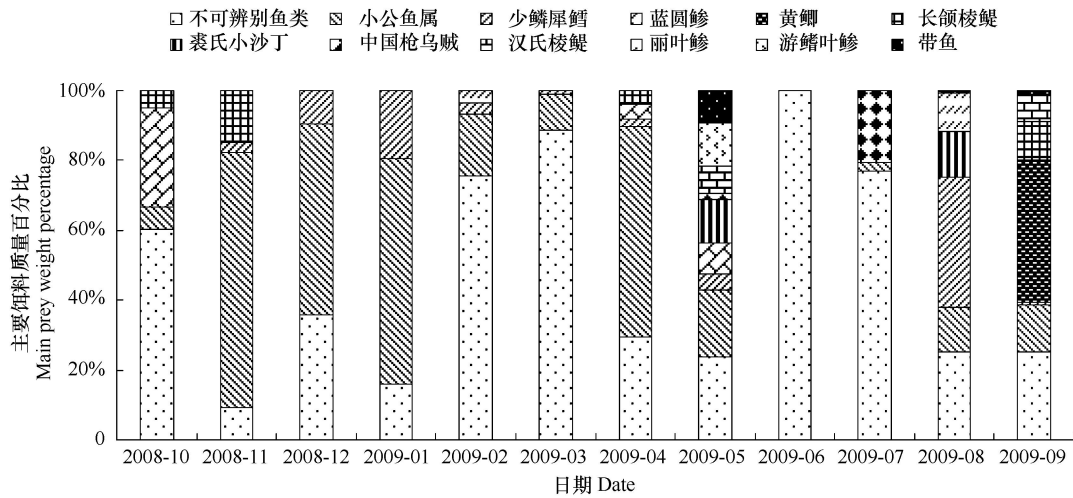


图3 北部湾宝刀鱼主要饵料生物组成质量比例图

Fig. 3 Monthly variation of main prey weight percentage of dorab wolf-herring in the Beibu Gulf

峰期处与 GSI 高峰接近,反映宝刀鱼的产卵高峰与中上层水温密切相关。

2.4 摄食随个体生长发育的变化

北部湾宝刀鱼摄食强度在性腺发育过程中比较稳定(图5), I至VI间的空胃率稳定保持在50%左右的水平,反映其摄食强度比较稳定;平均饱满指数 RI 则波动较大,RI 在产卵期(V)达到最高值(1.50%),在II期则为最低(0.72%),但II期的空胃率也达最高值(56.89%)。宝刀鱼产卵后VI—II期接近 RI 最低值(0.75%),同时VI—II期空胃率降至最低(33.33%),反映宝刀鱼在产卵后为补充能量消耗大量摄食。

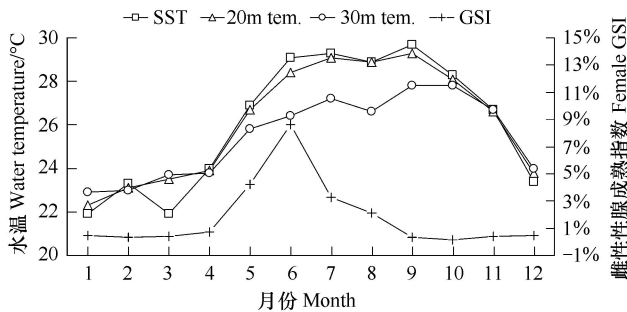


图4 北部湾海域水温与宝刀鱼性腺成熟度指数变化关系图

Fig.4 Monthly variation of different layers water temperature and dorab wolf-herring GSI in the Beibu Gulf

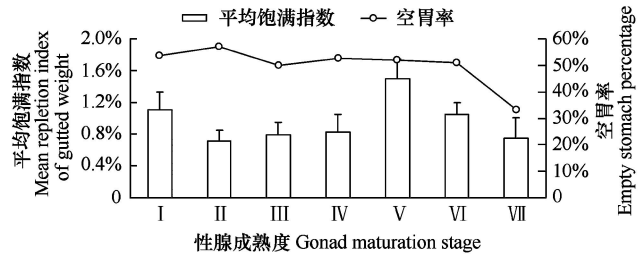


图5 北部湾宝刀鱼摄食强度随性腺成熟度的变化

Fig. 5 Mean repletion index and percentage of empty stomachs of dorab wolf-herring at different maturation stages

北部湾宝刀鱼摄食饵料平均重量和个数随叉长组变化明显,随着叉长增大,摄食饵料个数和重量逐渐增加(图6),12个叉长组间摄食平均饵料重量差异极显著(Kruskal-Wallis 检验 $H_{(11,645)} = 32.05, P < 0.001$),摄食的平均饵料个数差异也很显著(Kruskal-Wallis 检验 $H_{(11,645)} = 26.973, P < 0.001$),但在最大的两个叉长组中平均饵料质量则出现较大波动。

北部湾宝刀鱼样品叉长范围为193—782mm,根据叉长进行分组的标准为290mm以下和590mm以上各合并为一组,其余按30mm为间距等分,共分为12组。基于不同叉长组食物组成中各饵料种类%IRI的聚类分析(图7)表明,各叉长组间食物相似性系数变化较明显,可分为380mm以下、380—530mm以及530mm以上3大组。

北部湾宝刀鱼的分叉长组的稳定同位素特征值如表3所示,其中 $\delta^{13}C$ 各月平均值为15.61‰,以该值作

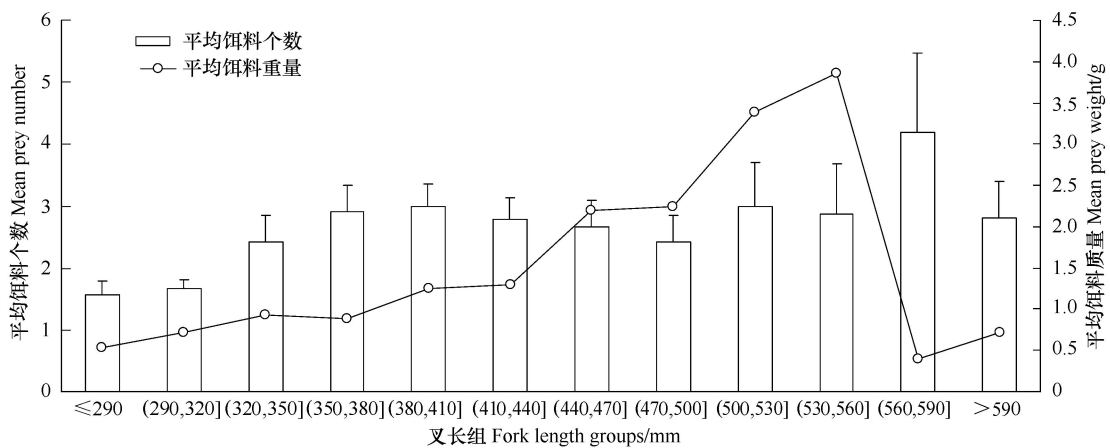


图 6 北部湾宝刀鱼摄食饵料个数及重量随生长发育的变化

Fig. 6 Comparative mean prey numbers and prey weight of dorab wolf-herring of different fork length groups

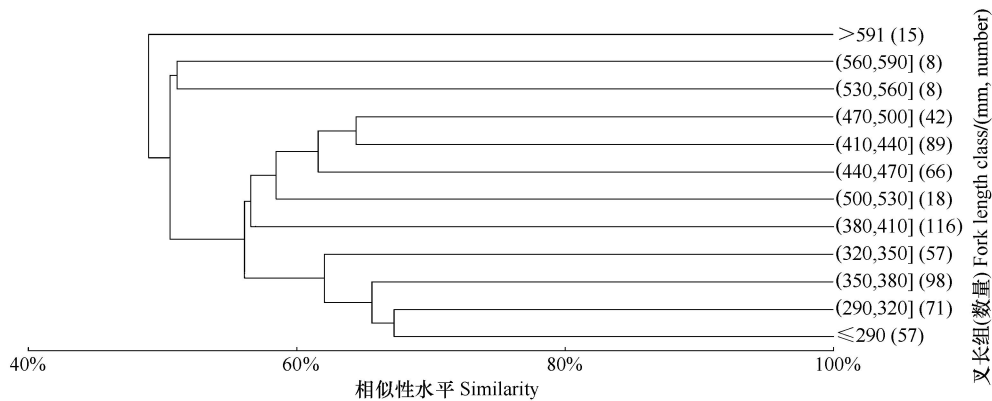


图 7 基于相对重要性指数百分比对北部湾宝刀鱼不同叉长组食物组成的聚类分析图

Fig. 7 Dendrogram based on the %IRI values of dorab wolf-herring diet indicating classification by fork length into main groups

单样本 t -检验,不同叉长组间差异不显著 ($t = -0.013, P = 0.990$),反映大规格宝刀鱼在上下水层均有摄食,食物来源广泛。根据 $\delta^{15}N$ 计算出各叉长组营养级,其平均值为 2.95,以该值作单样本 t -检验,营养级 TL 月份差异不显著 ($t = 0.0061, P = 0.953$)。

表 3 北部湾宝刀鱼 $\delta^{15}N$ 、 $\delta^{13}C$ 和营养级随生长的变化

Table 3 $\delta^{15}N$, $\delta^{13}C$ and trophic level variation of different dorab wolf-herring fork length groups in the Beibu Gulf

叉长组 Fork length groups/mm	$\delta^{13}C/\text{‰}$	$\delta^{15}N/\text{‰}$	营养级 Trophic level	叉长组 Fork length groups/mm	$\delta^{13}C/\text{‰}$	$\delta^{15}N/\text{‰}$	营养级 Trophic level
260—290	15.733	11.724	2.90	290—320	16.001	13.362	3.38
320—350	15.041	12.911	3.25	350—380	16.096	13.955	3.56
380—410	14.974	14.921	3.84	410—440	14.556	14.234	3.64
440—470	14.325	13.906	3.54	470—500	15.531	13.260	3.35
500—530	15.633	14.057	3.59	530—560	16.740	12.029	2.99
560—590	15.815	14.054	3.59	590—620	16.254	12.504	3.13
650—680	16.199	13.761	3.50				

3 讨论

3.1 宝刀鱼的摄食习性

宝刀鱼为热带、亚热带暖水性中上层鱼类,不仅以摄食青带小公鱼、裘氏小沙丁鱼、长颌棱鲷、黄鲫、游鳍

叶鲷、竹荚鱼和蓝圆鲷等小型中上层鱼类为主,同时也捕食少鳞犀鲂、银腰犀鲂、粗纹蝠和鹿斑蝠等小型底层鱼类。胃含物分析与碳稳定同位素结果一致反映该鱼种游泳能力较强,在各水层中广泛摄食,属于广食性动物食性鱼类。本研究表明,北部湾宝刀鱼以鱼类为最主要食物,重量百分比高达 99.71%,按叉长组 $\delta^{15}\text{N}$ 计算所得的平均营养级为 3.4。索罗门群岛潟湖宝刀鱼食性同样以鱼类为主,其中贝拉马棱鲷(*Thryssa baelama*)、天竺鲷科(Apogonidae)、不能辨别鱼类及绣眼银带鲱(*Spratelloides delicatulus*)各占 57.00%、21.80%、15.83% 和 2.67%,其根据胃含物分析所得营养级为 4.5^[16]。对比两海域宝刀鱼食物组成及营养级差异,除海域饵料生物构成区别外,本研究北部湾宝刀鱼食物组成内小型、低营养层次鱼类占据绝对多数,考虑到北部湾内目前的高海洋捕捞强度,在一定程度上反映了 Pauly 等提出的“捕捞导致海洋食物网营养级下降”^[2]。

基于胃含物分析结果利用% IRI 所做聚类分析发现(图 7),北部湾宝刀鱼在 350—380mm 叉长附近出现食性转换现象(相似性指数 > 60%),而 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$ 以及营养级(表 3)在该叉长组附近并没有出现明显的变化。由于稳定同位素值反映较长时间中吸收同化食物的比例^[42],同位素的富集度与生物体的组织更新率有关^[44],本研究所选取的宝刀鱼及其饵料鱼类同位素测定部位为肌肉,其组织更新时间长,能够反映较长时间甚至一生对食物中稳定同位素的同化率^[45],有别于胃含物分析所反映摄食种类的即时快照,因此,稳定同位素法与传统胃含物法在研究鱼类食性转换现象的差异上还需要作进一步的探索。

3.2 宝刀鱼摄食习性的月份变化及与环境因素的关系

采用合并样方法计算营养多样性指数,并根据 $H_z \pm 0.05H_z$ 范围内的个数判断营养多样性曲线的渐近程度,从而评估研究期限内胃样品个数是否足够。表 1 中,北部湾宝刀鱼各月份营养多样性指数 H_z 除 2009 年 6 月外波动不大,说明该海域饵料生物基础较为稳定,而 2009 年 6 月饵料中仅出现不可辨认鱼类,该月份 H_z 为 0,分析其原因主要是该段时间为休渔期,样品全部来自单片刺网渔获,而由于北部湾单片刺网船每航次作业时间较长(通常为 1 周左右),船上无制冷设备仅依靠碎冰保鲜,在夏季炎热天气中宝刀鱼的胃内食物易腐烂变质而无法辨别,因此在该阶段应采取随船出海现场采样,并对胃含物采取 70% 乙醇或 10% 福尔马林浸泡的方式加以保存。

北部湾宝刀鱼全年摄食,摄食强度月份间波动明显,月空胃率变化范围为 16.67%—88.24%,周年平均摄食率为 53.33%;而月平均饱满指数变化范围为 0.29%—2.31%,周年平均饱满指数为 0.97%,此波动与该海域的带鱼^[12]、多齿蛇鲻^[13]等鱼种变动情况相似。由于各月份的饵料生物组成区别,因此,根据实胃的宝刀鱼各饵料重量百分比及其 $\delta^{15}\text{N}$ 值计算所得的月营养级也有不同,但月营养级总体差异不显著。

3.3 宝刀鱼摄食与个体发育的关系

图 4 周年 GSI 指数显示北部湾宝刀鱼 1a 中呈现 1 个产卵高峰期(5—8 月),且与该海域中上层水温峰值密切相关,反映作为中上层鱼类的宝刀鱼产卵高峰受水温影响强烈。由图 5 判断产卵期间摄食强度没有降低,仍然强烈索饵,其 V 期的饱满指数最高,反映宝刀鱼由于体型较长,腹腔除容纳饱满的性腺外,仍可以保持足够的肠胃空间进行摄食。但该结果与图 2 所示 6—7 月期间空胃率较高而月平均饱满指数较低不太吻合,估计是由于休渔期间样品来自刺网所造成。多数文献^[46]中研究鱼类食性随性腺发育的变化将其划分 I 至 VI 期,本研究中单独分出 VI—II 以与 II 期作区分,结果表明,宝刀鱼在 VI—II 期的摄食率为最高,推断原因是产卵繁殖后补充能量从而加强摄食所导致,该现象与同海域的多齿蛇鲻^[13]一致。

随着叉长的增加,北部湾宝刀鱼饵料生物个数变化较小,虽然宝刀鱼的个体变大,但小型饵料生物如少鳞犀鲂、青带小公鱼、中国毛虾等个数较多且比例较大,产生这一结果的原因可能是该海域可供选择的饵料生物种类较少且小型化明显。平均单个饵料生物重量随着宝刀鱼叉长变大而明显增加,尤其在(500:530)、(530:560)两个叉长组间最为显著,伴随生长发育,宝刀鱼的摄食和消化器官都在不断增强与其肉食性的适应性,游泳能力也不断提高,增强对较大个体饵料生物的捕食能力,该结果与同海域的多齿蛇鲻^[13]一致。但在(560:590)及 590mm 以上叉长组平均饵料重量突然下降至最低,推断是由于该叉长组样品所摄食的饵料生物个数较多以及该长度组样品相对较少产生一定的差异,其原因尚待进一步分析。

北部湾宝刀鱼食物种类较少,除少鳞犀鲂、青带小公鱼、尖吻小公鱼和带鱼等出现较频繁外,其它种类波动较大,其中金色小沙丁鱼、康氏小公鱼、鰺和赤鼻棱鯨等 10 多种饵料鱼类仅在单月份偶然出现,说明宝刀鱼摄食具有较强的随机选择性。宝刀鱼各叉长组食物组成的聚类分析表明,不同叉长组间食物相似性系数较高;380mm 以下叉长组以少鳞犀鲂和小公鱼属为主要食物,相似性系数大于 60%,而 530mm 以上叉长组食物组成与其它组差别较大,相似性系数小于 50%。在本研究中,由于宝刀鱼胃含物中的较大部分鱼类、虾类和头足类消化后仅余残体,不能鉴定到种,影响对各叉长组食性的准确分析,所收集的样品中缺少 193mm 以下叉长的个体,对于宝刀鱼仔稚鱼食性研究有待深入。

3.4 碳、氮稳定同位素在鱼类摄食生态中的应用

Miyake 和 Wade 首次发现 $\delta^{15}\text{N}$ 在食物链中逐层富集^[47], DeNiro 和 Epstein 证明动物体内 $\delta^{13}\text{C}$ 值与其食物 $\delta^{13}\text{C}$ 值十分接近,并预测稳定同位素方法在动物食性研究的应用前景^[34]。目前,碳、氮稳定同位素技术在鱼类摄食生态的研究已日趋成熟,广泛应用于鱼类食物来源判断、营养级计算和连续营养谱的建立。

本研究应用碳、氮稳定同位素结合传统胃含物分析方法研究北部湾宝刀鱼的食物组成、摄食强度、食性转换和营养级等,有效解决由于缺乏少鳞犀鲂、青带小公鱼和裘氏小沙丁鱼等小型鱼类营养级从而导致无法计算捕食者营养级的难题,初步建立了各叉长组及周年连续营养级,但也出现两种方法在生长阶段食性转换不同的判断标准、周年月平均营养级(2.95)与各叉长组平均营养级(3.4)相差较大、营养级并未随叉长呈线性增加趋势等问题,如何利用稳定同位素对仔稚宝刀鱼进行食性研究以及基线生物的选定等等,有待进一步探索。

致谢: 广东海洋大学海洋渔业科学与技术专业王田田、殷其群、陈骏岚、李永东、张武科、赖金养和韦国严等同学参加了部分实验工作,计算机编程得到了广东海洋大学郭晓云博士和王锋博士的协助,广东海洋大学 Barbara Kieser 女士润色英文摘要,在此一并致谢。

References:

- [1] Yin M C. Fish Ecology. Beijing: China Agriculture Press, 1995.
- [2] Pauly D, Christensen V, Dalsgaard J, Froese R, Torres J F. Fishing down marine food webs. *Science*, 1998, 279(5352): 860-863.
- [3] Shreeve R S, Collins M A, Tarling G A, Main C E, Ward P, Johnston N M. Feeding ecology of myctophid fishes in the northern Scotia Sea. *Marine Ecology Progress Series*, 2009, 386: 221-236.
- [4] Kolasinski J, Frouin P, Sallon A, Rogers K, Bruggemann, H J, Potier M. Feeding ecology and ontogenetic dietary shift of yellowstripe goatfish *Mulloidichthys flavolineatus* (Mullidae) at Reunion Island, SW Indian Ocean. *Marine Ecology Progress Series*, 2009, 386: 181-195.
- [5] Wells R J D, Cowan J H Jr., Fry B. Feeding ecology of red snapper *Lutjanus campechanus* in the northern Gulf of Mexico. *Marine Ecology Progress Series*, 2008, 361: 213-225.
- [6] Watanabe H, Kubodera T, Yokawa K. Feeding ecology of the swordfish *Xiphias gladius* in the subtropical region and transition zone of the western North Pacific. *Marine Ecology Progress Series*, 2009, 396: 111-122.
- [7] Wells R J D, Rooker J R. Feeding ecology of pelagic fish larvae and juveniles in slope waters of the Gulf of Mexico. *Journal of Fish Biology*, 2009, 75(7): 1719-1732.
- [8] Wilson M T, Jump C M, Duffy-Anderson J T. Comparative analysis of the feeding ecology of two pelagic forage fishes: Capelin *Mallotus villosus* and walleye pollock *Theragra chalcogramma*. *Marine Ecology Progress Series*, 2006, 317: 245-258.
- [9] Wei S. Food and feeding habits of hairtail (*Trichiurus haumela* Forskal) from the Yellow Sea. *Marine Fisheries Research*, 1980, 1(1): 49-57
- [10] Chen Y Q, Zhu Q Q. A study on the feeding habits of hairtail fish and the relationship between its food basis and fishing grounds in the Dong Hai (East China Sea). *Journal of Fisheries of China*, 1984, 8(2): 135-145.
- [11] Zhang B. Feeding habits and ontogenetic diet shift of hairtail fish (*Trichiurus lepturus*) in East China Sea and Yellow Sea. *Marine Fisheries Research*, 2004, 25(2): 6-12.
- [12] Yan Y R, Chen J L, Hou G, Lu H S, Jin X S. Feeding habits of *Trichiurus lepturus* in Beibu Gulf of South China Sea. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2010, 21(3): 749-755.
- [13] Yan Y R, Wang T T, Hou G, Lu H S, Jin X S. Feeding habits and monthly and ontogenetic diet shifts of the greater lizardfish, *Saurida tumbil* in Beibu Gulf of South China Sea. *Journal of Fisheries of China*, 2010, 21(3): 749-755.

- [14] Zhang B, Jin X S, Dai F Q. Feeding habits of the two sciaenid fishes near the Changjiang estuary. *Acta Zoologica Sinica*, 2008, 54(2): 209-217.
- [15] Zhu G P, Zhou Y Q, Xu L X, Jiang W X. Feeding ecology of *Thunnus obesus* in the western Atlantic Ocean. *Journal of Fisheries of China*, 2007, 31(1): 23-30.
- [161] Blaber S J M, Milton D A, Rawlinson N J F, Tiroba G, Nichols P V. Diets of lagoon fishes of the Solomon Islands: Predators of tuna baitfish and trophic effects of baitfishing on the subsistence fishery. *Fisheries Research*, 1990, 8(3): 263-286.
- [17] National Technology Supervision Bureau. Marine Survey Standard-Marine Biology Survey. Beijing: China Standard Press, 1991.
- [18] Chen D G. Fisheries Biology. Beijing: China Agriculture Publishing House, 1997.
- [19] Davis T. Seasonal changes in gonad maturity, and abundance of larvae and early juveniles of barramundi, *Lates calcarifer* (Bloch), in Van Diemen Gulf and the Gulf of Carpentaria. *Marine and Freshwater Research*, 1985, 36(2): 177-190.
- [20] Shanghai Fisheries College, Institute of Zoology Chinese Academic of Sciences, Institute of Oceanology Chinese Academic of Sciences. The Fishes of the South China Sea. Beijing: Science Press, 1962.
- [21] Cheng Q T, Zheng B S. Systematic Synopsis of Chinese Fishes. Beijing: Science Press, 1987.
- [22] Song H T, Yu C G, Xue L J, Yao G Z. Economic Shrimps and Crabs in the East China Sea. Beijing: Ocena Press, 2006.
- [23] Adams C F, Pinchuk A I, Coyle K O. Seasonal changes in the diet composition and prey selection of walleye pollock (*Theragra chalcogramma*) in the northern Gulf of Alaska. *Fisheries Research*, 2007, 84(3): 378-389.
- [24] Figueiredo M, Morato T, Barreiros J P, Afonso P, Santos R S. Feeding ecology of the white seabream, *Diplodus sargus*, and the ballan wrasse, *Labrus bergylta*, in the Azores. *Fisheries Research*, 2005, 75(1/3): 107-119.
- [25] Hurtubia J. Trophic Diversity measurement in sympatric predatory species. *Ecology*, 1973, 54(4): 885-890.
- [26] Pielou E C. The measurement of diversity in different types of biological collections. *Journal of Theoretical Biology*, 1966, 13: 131-144.
- [27] Pielou E C. An Introduction to Mathematical Ecology. New York: Wiley-Interscience, 1969: 286.
- [28] Koen Alonso M, Alberto Crespo E, Anbal Garcia N, Noem P S, Ariel M P, Judith M N. Fishery and ontogenetic driven changes in the diet of the spiny dogfish, *Squalus acanthias*, in Patagonian Waters, Argentina. *Environmental Biology of Fishes*, 2002, 63(2): 193-202.
- [29] Hyslop E J. Stomach contents analysis — a review of methods and their application. *Journal of Fish Biology*, 1980, 17(4): 411-429.
- [30] Morato T, Santos R S, Andrade J P. Feeding habits, seasonal and ontogenetic diet shift of blacktail comber, *Serranus atricauda* (Pisces: Serranidae), from the Azores, north-eastern Atlantic. *Fisheries Research*, 2000, 49(1): 51-59.
- [31] Htun-Han M. The reproductive biology of the dab *Limanda limanda* (L.) in the North Sea; Seasonal changes in the ovary. *Journal of Fish Biology*, 1978, 13(3): 351-359.
- [32] Wan W, Hu J Y, An L H, An W, Yang M, Ito A, Hattori T, Tao S. Main species trophic level of Bohai Sea food web based on stable isotope analysis. *Chinese Science Bulletin*, 2005, 50(7): 708-712.
- [33] Minagawa M, Wada E. Stepwise enrichment of ^{15}N along food chains; Further evidence and the relation between $[\delta^{15}\text{N}]$ and animal age. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1984, 48(5): 1135-1140.
- [34] Deniro M J, Epstein S. Influence of diet on the distribution of carbon isotopes in animals. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1978, 42(5): 495-506.
- [35] Post D M. Using stable isotopes to estimate trophic position; models, methods, and assumptions. *Ecology*, 2002, 83(3): 703-718.
- [36] Mariotti A. Atmospheric nitrogen is a reliable standard for natural ^{15}N abundance measurements. *Nature*, 1983, 303(5919): 685-687.
- [37] Vander Zanden J M, Joseph B R. Variation in $\delta^{15}\text{N}$ and $\delta^{13}\text{C}$ Trophic Fractionation; Implications for Aquatic Food Web Studies. *Limnology and Oceanography*, 2001, 46(8): 2061-2066.
- [38] Guo X P, Li Z Y, Jin X S, Dai F Q. Feeding habit study of Anchovy (*Engraulis japonicus*) in the central and southern part of the Huanghai Sea with stable isotope techniques. *Acta Oceanologica Sinica*, 2007, 29(2): 98-104.
- [39] Fan J C, Mei C L. Data Analysis. Beijing: Science Press, 2002.
- [40] Field J G, Clarke K R, Warwick R M. A practical strategy for analysis of multispecies distribution patterns. *Marine Ecology Progress Series*, 1982, 8: 37-52.
- [41] Clarke K R, Gorley R N. PRIMER 5 for Windows, version 5.2.9. Plymouth, UK: PRIMER-E, Ltd., 2002.
- [42] Sherwood G D, Rose A G. Stable isotope analysis of some representative fish and invertebrates of the Newfoundland and Labrador continental shelf food web. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2005, 63(4): 537-549.
- [43] Tieszen L L, Boutton T W, Tesdahl K G. Fractionation and turnover of stable carbon isotopes in animal tissues; Implications for $\delta^{13}\text{C}$ analysis of diet. *Oecologia*, 1983, 57(1): 32-37.
- [44] Lorrain A, Paulet Y, Chauvaud L. Differential $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ signatures among scallop tissues; implications for ecology and physiology. *Journal of*

Experimental Marine Biology and Ecology, 2002, 275(1): 47-61.

- [45] Liu Y, Cheng J, Chen Y. A spatial analysis of trophic composition: a case study of hairtail (*Trichiurus japonicus*) in the East China Sea. *Hydrobiologia*, 2009, 632(1): 79-90.
- [46] Miyake Y, Wade E. The abundance ratio of $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$ in marine environments. *Records of Oceanographic Works in Japan*, 1967, 9: 32-59.

参考文献:

- [1] 殷名称. 鱼类生态学. 北京: 农业出版社, 1995.
- [9] 韦晟. 黄海带鱼(*Trichiurus haumela* Forskal)的摄食习性. *海洋水产研究*, 1980, 1(1): 49-57.
- [10] 陈亚翟, 朱启琴. 东海带鱼摄食习性、饵料基础及与渔场的关系. *水产学报*, 1984, 8(2): 135-145.
- [11] 张波. 东、黄海带鱼的摄食习性及其随发育的变化. *海洋水产研究*, 2004, 25(2): 6-12.
- [12] 颜云榕, 陈骏岚, 侯刚, 卢伙胜, 金显仕. 北部湾带鱼的摄食习性. *应用生态学报*, 2010, 21(3): 749-755.
- [13] 颜云榕, 王田田, 侯刚, 卢伙胜, 金显仕. 北部湾多齿蛇鲭摄食习性及其随生长发育的变化. *水产学报*, 2010, 4(7): 55-64.
- [14] 张波, 金显仕, 戴芳群. 长江口两种重要石首鱼类的摄食习性. *动物学报*, 2008, 54(2): 209-217.
- [15] 朱国平, 周应祺, 许柳雄, 姜文新. 大西洋西部大眼金枪鱼摄食生态的初步研究. *水产学报*, 2007, 31(1): 23-30.
- [16] 国家技术监督局. 海洋调查标准——海洋生物调查. 北京: 标准出版社, 1991.
- [17] 陈大刚. 渔业资源生物学. 北京: 农业出版社, 1997.
- [19] 上海水产学院, 中国科学院动物研究所, 中国科学院海洋研究所. 南海鱼类志. 北京: 科学出版社, 1962.
- [20] 成庆泰, 郑葆珊. 中国鱼类系统检索. 北京: 科学出版社, 1987.
- [21] 宋海棠, 俞存根, 薛利建, 姚光展. 东海经济虾蟹类. 北京: 海洋出版社, 2006.
- [31] 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.
- [37] 郭旭鹏, 李忠义, 金显仕, 戴芳群. 采用碳氮稳定同位素技术对黄海中南部鳀鱼食性的研究. *海洋学报*, 2007, 29(2): 98-104.
- [38] 范金城, 梅长林. 数据分析. 北京: 科学出版社, 2002.

CONTENTS

Applying landscape ecological concepts in urban land use classification LI Weifeng, OUYANG Zhiyun, XIAO Yi (593)

Mating system of *Sinocalycanthus chinensis* (Cheng et S. Y. Chang) Cheng et S. Y. Chang, an endangered, indigenous species in China ZHAO Hongbo, ZHOU Lihua, HAO Riming, et al (602)

Photosynthetically and ecophysiological characteristics of *Calligonum roborowasikii* in different altitudes on the northern slope of Kunlun Mountain ZHU Juntao, LI Xiangyi, ZHANG Ximing, et al (611)

Spatial distribution pattern of different strata and spatial associations of different strata in the Schrenk Spruce Forest, northwest China LI Minghui, HE Fenghua, PAN Cunde (620)

Effect of elevated CO₂ on the body size, enzyme activity and host selection behavior of *Bemisia tabaci* biotype B WANG Xuexia, WANG Guohong, GE Feng (629)

The dynamics of super-cooling ability and biochemical substances in the overwintering *Carposina niponensi* Walsingham (Lepidoptera: Carposinidae) larvae WANG Peng, LING Fei, YU Yi, et al (638)

A comparative study of macrobenthic community under different mariculture types in Xiangshan Bay, China LIAO Yibo, SHOU Lu, ZENG Jiangning, et al (646)

Feeding ecology of dorab wolf-herring, *Chirocentrus dorab* from the Beibu Gulf YAN Yunrong, YANG Houchao, LU Huosheng, et al (654)

Make use of nest-site of oriental white stork in the Yellow River Estuary Nature Reserve DUAN Yubao, TIAN Xiuhua, ZHU Shuyu, et al (666)

Winter and spring diet composition of feral yak in Helan Mountains, China YAO Zhicheng, LIU Zhensheng, WANG Zhaoding, et al (673)

Effects of tree growth and soil properties on soil respiration rate in Chinese fir plantations WANG Dan, WANG Bing, DAI Wei, et al (680)

Succession of potential vegetation in arid and semi-arid area of China LI Fei, ZHAO Jun, ZHAO Chuanyan, ZHANG Xiaoqiang (689)

Responses on rhizosphere effect of two subalpine coniferous species to night-time warming and nitrogen fertilization in western Sichuan, China WEI Yunyan, YIN Hua jun, LIU Qing, et al (698)

Nitrogen and phosphorus contents in 44 wetland species from the Lake Erhai Basin LU Jing, ZHOU Hongxia, TIAN Guangyu, et al (709)

Growth and physiological responses of the *Periploca sepium* Bunge seedlings to drought stress AN Yuyan, LIANG Zongsuo, HAO Wenfang (716)

The spatial distribution and seasonal dynamics of fine roots in a mature *Caragana korshinskii* plantation SHI Jianwei, WANG Mengben, CHEN Jianwen, et al (726)

The ultrastructure of chloroplast in mesophyll cell on two robinias under NaCl and Na₂SO₄ stress MENG Fanjuan, PANG Hongying, WANG Jianzhong, et al (734)

Relationship between tomato fruit growth and environmental factors under protected facility cultivation CHENG Zhihui, CHEN Xuejin, LAI Linling, et al (742)

Effect of grafting eggplant on root exudates and disease resistance under *Verticillium dahliae* stress ZHOU Baoli, LIU Na, YE Xueling, et al (749)

The drought risk zoning of winter wheat in North China WU Dongli, WANG Chunyi, XUE Hongxi, et al (760)

Heat balance of cold type wheat field at grain-filling stage under drought stress condition YAN Jufang, ZHANG Songwu, LIU Dangxiao (770)

Effects of different straw returning treatments on soil water, maize growth and photosynthetic characteristics in the semi-arid area of Southern Ningxia GAO Fei, JIA Zhikuan, LU Wentao, et al (777)

Osmotic and ionic stress effects of high NaCl concentration on seedlings of four wheat (*Triticum aestivum* L.) genotypes XU Meng, MA Qiaorong, ZHANG Jitao, et al (784)

Effects of ferulic acid, p-hydroxybenzoic acid and their mixture on mineral nitrogen and relative microbial function groups in forest soils MU Rong, PAN Kaiwen, WANG Jinchuang, et al (793)

Soil microbial biomass and the influencing factors under *Pinus tabulaeformis* and *Picea asperata* plantations in the upper Minjiang River JIANG Yuanming, PANG Xueyong, BAO Weikai (801)

Spatial distribution of arbuscular mycorrhizal fungi and dark septate endophytes in the rhizosphere of *Artemisia sphaerocephala* from Inner Mongolia desert HE Xueli, WANG Yinyin, ZHAO Lili, et al (812)

Effect of chlorothalonil on soil microbial communities of *Larix* artificial shelter-forest SHAO Yuanyuan, WANG Zhiying, ZOU Li, et al (819)

Research of the vegetation's cooling effect in city's residential quarter LI Yinghan, WANG Junjian, LI Guicai, et al (830)

Landscape dynamics of Baiyangdian Lake from 1974 to 2007 ZHUANG Changwei, OUYANG Zhiyun, XU Weihua, et al (839)

Evaluation of tourism transport ecological footprint in Zhoushan islands XIAO Jianhong, YU Qingdong, LIU Kang, et al (849)

Nitrogen transformation and its residue in pot experiments amended with organic and inorganic ¹⁵N cross labeled fertilizers PENG Peiqin, QIU Shaojun, HOU Hongbo, et al (858)

Effects of dissolve organic carbon (DOC) contents on sorption and desorption of phenanthrene on sediments during ageing JIAO Lixin, MENG Wei, ZHENG Binghui, et al (866)

Heavy metal concentrations and bioaccumulation of ramie (*Boehmeria nivea*) growing on 3 mining areas in Shimen, Lengshuijiang and Liuyang of Hunan Province SHE Wei, JIE Yucheng, XING Hucheng, et al (874)

Discussion

Climate characteristic of seasonal variation and its influence on annual growth period of *populus euphratica Oliv* in Hexi Corridor in recent 55 years LIU Puxing, ZHANG Kexin (882)

Forward trajectory analysis of wheat aphids during long-distance migration using HYSPLIT model YU Zhenxing, WU Yuqing, JIANG Yueli, et al (889)

2009 年度生物学科总被引频次和影响因子前 10 名期刊*

(源于 2010 年版 CSTPCD 数据库)

排序 Order	期刊 Journal	总被引频次 Total citation	排序 Order	期刊 Journal	影响因子 Impact factor
1	生态学报	11764	1	生态学报	1.812
2	应用生态学报	9430	2	植物生态学报	1.771
3	植物生态学报	4384	3	应用生态学报	1.733
4	西北植物学报	4177	4	生物多样性	1.553
5	生态学杂志	4048	5	生态学杂志	1.396
6	植物生理学通讯	3362	6	西北植物学报	0.986
7	JOURNAL OF INTEGRATIVE PLANT BIOLOGY	3327	7	兽类学报	0.894
8	MOLECULAR PLANT	1788	8	CELL RESEARCH	0.873
9	水生生物学报	1773	9	植物学报	0.841
10	遗传学报	1667	10	植物研究	0.809

★《生态学报》2009 年在核心版的 1964 种科技期刊排序中总被引频次 11764 次,全国排名第 1;影响因子 1.812,全国排名第 14;第 1—9 届连续 9 年入围中国百种杰出学术期刊;中国精品科技期刊

编辑部主任:孔红梅

执行编辑:刘天星 段 靖

生态学报
(SHENGTAI XUEBAO)
(半月刊 1981 年 3 月创刊)
第 31 卷 第 3 期 (2011 年 2 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA
(Semimonthly, Started in 1981)
Vol. 31 No. 3 2011

编 辑 《生态学报》编辑部
地址:北京海淀区双清路 18 号
邮政编码:100085
电话:(010)62941099
www.ecologica.cn
shengtaixuebao@rcees.ac.cn

主 编 冯宗炜
主 管 中国科学技术协会
主 办 中国生态学会
中国科学院生态环境研究中心
地址:北京海淀区双清路 18 号
邮政编码:100085

出 版 科 学 出 版 社
地址:北京东黄城根北街 16 号
邮政编码:100717

印 刷 北京北林印刷厂
发 行 科 学 出 版 社
地址:东黄城根北街 16 号
邮政编码:100717
电话:(010)64034563
E-mail:journal@cspg.net

订 购 全国各地邮局
国外发行 中国国际图书贸易总公司
地址:北京 399 信箱
邮政编码:100044

广告经营 京海工商广字第 8013 号
许 可 证

Edited by Editorial board of
ACTA ECOLOGICA SINICA
Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China
Tel:(010)62941099
www.ecologica.cn
Shengtaixuebao@rcees.ac.cn

Editor-in-chief FENG Zong-Wei
Supervised by China Association for Science and Technology
Sponsored by Ecological Society of China
Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS
Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China

Published by Science Press
Add:16 Donghuangchenggen North Street,
Beijing 100717, China

Printed by Beijing Bei Lin Printing House,
Beijing 100083, China

Distributed by Science Press
Add:16 Donghuangchenggen North
Street, Beijing 100717, China
Tel:(010)64034563
E-mail:journal@cspg.net

Domestic All Local Post Offices in China
Foreign China International Book Trading
Corporation
Add:P. O. Box 399 Beijing 100044, China



ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

国内外公开发行

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 70.00 元