

# 四川裂腹鱼耳石碳、氧稳定同位素特征

何勇凤 吴兴兵 王旭歌 朱永久 杨德国\*

(中国水产科学研究院长江水产研究所, 农业部淡水生物多样性保护重点实验室, 武汉 430223)

**摘要** 为探讨耳石碳( $\delta^{13}\text{C}$ )、氧( $\delta^{18}\text{O}$ )稳定同位素在淡水鱼类群体识别中的作用,本研究以养殖条件下不同年龄组四川裂腹鱼为对象,采用稳定同位素质谱仪进行碳、氧同位素测定,揭示耳石中碳、氧稳定同位素特征,探讨其与环境间的关系.结果表明:1<sup>+</sup>龄四川裂腹鱼 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 值均与耳石质量无显著相关关系,但在微耳石和星耳石之间存在显著差异;不同年龄四川裂腹鱼微耳石 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 平均值分别为 $(-9.58\pm 0.06)\text{‰}$ 、 $(-8.33\pm 0.17)\text{‰}$ ,其在雌雄个体之间均无显著性差异,但在不同年龄组间存在显著差异.耳石 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^{13}\text{C}$ 的关联分析能有效区分四川裂腹鱼不同养殖年龄群体,可作为一种识别淡水鱼类养殖群体的手段.

**关键词** 四川裂腹鱼;耳石;碳同位素;氧同位素

**Otolith carbon and oxygen stable isotopes in laboratory-reared *Schizothorax kozlovi*.** HE Yong-feng, WU Xing-bing, WANG Xu-ge, ZHU Yong-jiu, YANG De-guo\* (Key Laboratory of Freshwater Biodiversity Conservation, Ministry of Agriculture, Yangtze River Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Wuhan 430223, China).

**Abstract:** In order to investigate the role of otolith carbon ( $\delta^{13}\text{C}$ ) and oxygen ( $\delta^{18}\text{O}$ ) stable isotopes in identification of freshwater fish stocks, otolith  $\delta^{13}\text{C}$  and  $\delta^{18}\text{O}$  of cultured *Schizothorax kozlovi* at different ages were measured by stable isotope mass spectrometer. The relationships between otolith  $\delta^{13}\text{C}$  /  $\delta^{18}\text{O}$  and environment were discussed. The results showed that  $\delta^{13}\text{C}$  and  $\delta^{18}\text{O}$  values of *S. kozlovi* at age 1<sup>+</sup> were not significantly correlated with otolith mass, but both were significantly different between lapillus and asteriscus. The average lapillus  $\delta^{13}\text{C}$  and  $\delta^{18}\text{O}$  values of *S. kozlovi* at different ages were  $(-9.58\pm 0.06)\text{‰}$  and  $(-8.33\pm 0.17)\text{‰}$ , respectively. There was no significant difference of lapillus  $\delta^{13}\text{C}$  and  $\delta^{18}\text{O}$  between the sexes, but with significant difference among different ages. The correlation of  $\delta^{13}\text{C}$  with  $\delta^{18}\text{O}$  was an effective method in identification of different culture stocks of *S. kozlovi*, which indicated the isotopic signatures of otolith could be used as a method to identify freshwater fish stocks.

**Key words:** *Schizothorax kozlovi*; otolith; carbon stable isotope; oxygen stable isotope.

四川裂腹鱼(*Schizothorax kozlovi*)隶属于鲤形目(Cypriniformes)鲤科(Cyprinidae)裂腹鱼亚科(Schizothoracinae)裂腹鱼属(*Schizothorax*)<sup>[1]</sup>,是处于原始等级的裂腹鱼类<sup>[2]</sup>,也是长江上游的特有鱼类,仅分布于青藏高原和云贵高原海拔较低的边缘地区<sup>[1,3-4]</sup>.目前由于受水质污染、水利水电工程修

建及全球气候变化等环境变化的影响,作为长期适应高原边缘地区亚高寒环境的冷水性鱼类,四川裂腹鱼资源量下降明显,其生态稳定性已渐脆弱<sup>[5-8]</sup>.这些环境变化如何影响四川裂腹鱼种群发展的稳定性和持续性是目前亟待解决的问题之一.

鱼类耳石是一种钙化物质,主要由碳酸钙( $\text{CaCO}_3$ )组成,其微量元素、稳定同位素等微化学特征与环境息息相关,具有非细胞性和代谢惰性.通过分析耳石全区或特定区域中的微化学特征,可以追溯鱼类整个生活史或特定生活史阶段所经历的环境特征<sup>[9]</sup>.实际上,相对于耳石元素指纹分析方法对水体元素组成差异的依赖性,稳定同位素分析更适

本文由中国水产科学研究院中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金(2016JBF0302)和国家自然科学基金青年基金项目(51609255)资助 This work was supported by the Central Public-interest Scientific Institution Basal Research Fund, Chinese Academy of Fishery Sciences (2016JBF0302) and the National Natural Science Foundation of China (51609255).

2017-02-27 Received, 2017-05-08 Accepted.

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: yangdg@yfi.ac.cn

合小尺度且水体条件复杂的情况<sup>[10]</sup>.其中,耳石稳定同位素分析中以碳、氧稳定同位素的应用最为广泛. 诸多研究表明, 鱼类耳石氧同位素  $\delta^{18}\text{O}$  (即  $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ ) 具有温度计的属性, 耳石氧同位素与水体之间能达到分馏平衡, 这种平衡与水的温度密切相关, 通过测定耳石中的  $\delta^{18}\text{O}$  即可反演计算出耳石形成时的环境水温<sup>[11-15]</sup>. 鱼类耳石碳稳定同位素  $\delta^{13}\text{C}$  (即  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ ) 则普遍认为与鱼类的新陈代谢和食物来源有关<sup>[16-19]</sup>.

本研究测定了不同养殖试验组四川裂腹鱼耳石中碳、氧稳定同位素, 分析了耳石碳、氧稳定同位素特征及其与环境水温、食物来源等的关系, 探索耳石碳、氧稳定同位素在四川裂腹鱼等淡水鱼类中区分不同群体的可行性以及其可能反映出的生态学意义, 以期四川裂腹鱼等淡水鱼类的资源保护提供新的研究思路.

1 材料与方法

1.1 试验材料

四川裂腹鱼人工繁殖初孵仔鱼来自毕节市水产技术推广站, 2012 年 10 月在 12 日龄时运输回中国水产科学研究院长江水产研究所武汉研究中心, 采用小型循环水养殖系统在不同温度 (14、18、22 和 26 ℃) 条件下培育 6 个月, 然后转入大养殖系统中采用自然水温 (武汉) 养殖, 统一投喂相同的人工饲料. 本研究采样时试验鱼的年龄分别为 1<sup>+</sup>、2<sup>+</sup> 和 4<sup>+</sup>, 不同年龄组在 6 月龄的养殖过程中经历了不同的温度史过程, 但后期经历的温度史过程是相同的, 其中 1<sup>+</sup> 龄组包含 18 和 22 ℃ (平均 20 ℃) 两种温度史样本, 2<sup>+</sup> 龄组包含 26 ℃ 温度史样本, 4<sup>+</sup> 龄组包含 14、18 和 22 ℃ (平均 18 ℃) 3 种温度史样本. 所取耳石样品均为微耳石, 其中 1<sup>+</sup> 龄组试验鱼耳石样本包括微耳石 (lapillus) 和星耳石 (asteriscus). 所有耳石样本采用去离子水清洗后, 放入 55 ℃ 烘箱中烘干, 称量. 样本信息如表 1.

表 1 试验所用四川裂腹鱼样本信息表  
Table 1 Sample information of *Schizothorax kozlovi* in this study

日龄 Age (d)	体长 Body length (mean± SE, mm)	体质量 Body mass (mean± SE, g)	微耳石质量 Otolith mass (mean± SE, mg)	样本量 Sample size
595 (1 <sup>+</sup> ) *	200±4	124±7	2.74±0.13	15
1034 (2 <sup>+</sup> )	260±5	236±16	4.80±0.51	10
1520 (4 <sup>+</sup> )	298±4	361±17	6.02±0.24	9

\* 星耳石均质量为 (3.22±0.19) mg Asteriscus mean mass was (3.22±0.19) mg.

1.2 同位素测定

以酒精清洗铝箔纸表面, 包裹烘干后的耳石样品, 使用研钵轻击、磨碎耳石成粉末样, 混匀后待分析.

采用国家海洋局第三海洋研究所稳定同位素质谱实验室配备的 GasBench II -IRMS Delta V Advantage 同位素质谱仪 (美国 Thermo Fisher 公司), 进行耳石粉末样的碳、氧同位素分析以及水样的氧同位素分析. 采用以下公式计算  $\delta^{18}\text{O}$  和  $\delta^{13}\text{C}$ :

$$\delta^{18}\text{O}_o = [ (^{18}\text{O}/^{16}\text{O})_o / (^{18}\text{O}/^{16}\text{O})_s - 1 ] \times 1000\text{‰}$$
$$\delta^{13}\text{C}_o = [ (^{13}\text{C}/^{12}\text{C})_o / (^{13}\text{C}/^{12}\text{C})_s - 1 ] \times 1000\text{‰}$$
$$\delta^{18}\text{O}_w = [ (^{18}\text{O}/^{16}\text{O})_w / (^{18}\text{O}/^{16}\text{O})_s - 1 ] \times 1000\text{‰}$$

式中:  $\delta^{18}\text{O}_o$ 、 $\delta^{13}\text{C}_o$  和  $\delta^{18}\text{O}_w$  分别表示耳石中的  $\delta^{18}\text{O}$ 、 $\delta^{13}\text{C}$  值和水中的  $\delta^{18}\text{O}$  值; 下标 o、s、w 分别表示耳石样品、国际标准物质和水样, 其中耳石中的国际标准物质为 VPDB (Vienna Peedee Belemnite), 水样中的国际标准物质为 VSMOW (Vienna-Standard Mean Ocean Water), 测试精度±0.2‰.

1.3 数据处理

采用 Excel 2016 和 STATISTICA 软件进行数据分析, 采用非参数检验方法和单因素方差分析 (ANOVA) 的 LSD 法进行差异显著性检验 ( $\alpha = 0.05$ ), 采用 GraphPad Prism 软件作图.

2 结果与分析

2.1 不同类型耳石稳定同位素特征

养殖条件下, 1<sup>+</sup> 龄四川裂腹鱼微耳石  $\delta^{13}\text{C}$  和  $\delta^{18}\text{O}$  平均值分别为  $(-9.48 \pm 0.08)\text{‰}$  和  $(-8.11 \pm 0.04)\text{‰}$ , 其星耳石  $\delta^{13}\text{C}$  和  $\delta^{18}\text{O}$  则分别为  $(-9.85 \pm 0.07)\text{‰}$  和  $(-7.48 \pm 0.05)\text{‰}$ . 从图 1 可以看出, 与  $\delta^{13}\text{C}$  相比, 四川裂腹鱼耳石  $\delta^{18}\text{O}$  波动较小. 方差分析结果显示, 四川裂腹鱼  $\delta^{13}\text{C}$  和  $\delta^{18}\text{O}$  在微耳石和星耳石之间均有显著性差异 ( $P < 0.01$ ). 相关性分析结果显示, 不论是微耳石还是星耳石, 四川裂腹鱼  $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$  值均与耳石质量无显著相关关系.

2.2 不同年龄微耳石稳定同位素特征

养殖条件下, 1<sup>+</sup>、2<sup>+</sup> 和 4<sup>+</sup> 龄四川裂腹鱼微耳石  $\delta^{13}\text{C}$  和  $\delta^{18}\text{O}$  在雌雄个体之间均无显著性差异, 因此, 后续将雌雄样本混合一起进行分析. 1<sup>+</sup>、2<sup>+</sup> 和 4<sup>+</sup> 龄四川裂腹鱼微耳石  $\delta^{13}\text{C}$  平均值为  $(-9.71 \pm 0.08)\text{‰}$ , 变动范围为  $-10.69\text{‰} \sim -8.86\text{‰}$ ,  $\delta^{18}\text{O}$  平均值为  $(-8.46 \pm 0.15)\text{‰}$ , 变动范围为  $-10.22\text{‰} \sim -6.99\text{‰}$  (图 2). 相比于  $\delta^{13}\text{C}$ , 微耳石  $\delta^{18}\text{O}$  在不同年龄之间变动较大, 且 4<sup>+</sup> 龄鱼的微耳石  $\delta^{18}\text{O}$  值比 1<sup>+</sup>

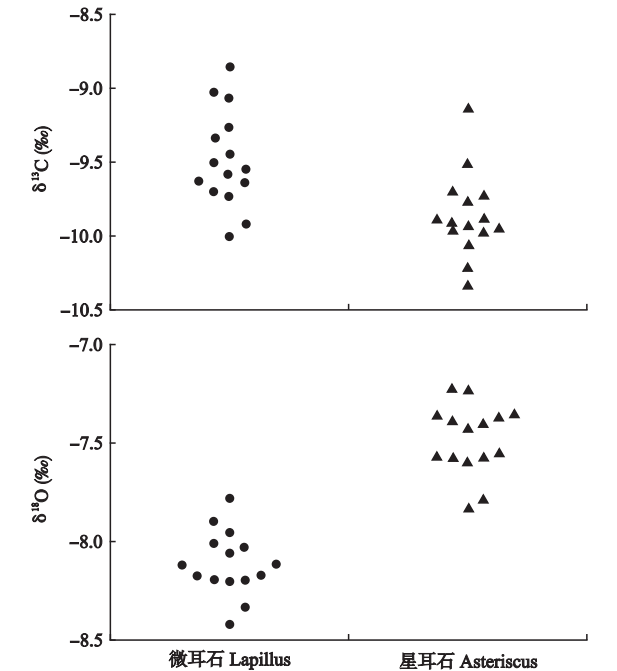


图 1 养殖条件下四川裂腹鱼(1<sup>+</sup>龄)微耳石和星耳石碳、氧稳定同位素值

Fig.1 Carbon ( $\delta^{13}\text{C}$ ) and oxygen ( $\delta^{18}\text{O}$ ) stable isotopes in the lapillus and asteriscus of laboratory-reared *Schizothorax kozlovi* (age 1<sup>+</sup>).

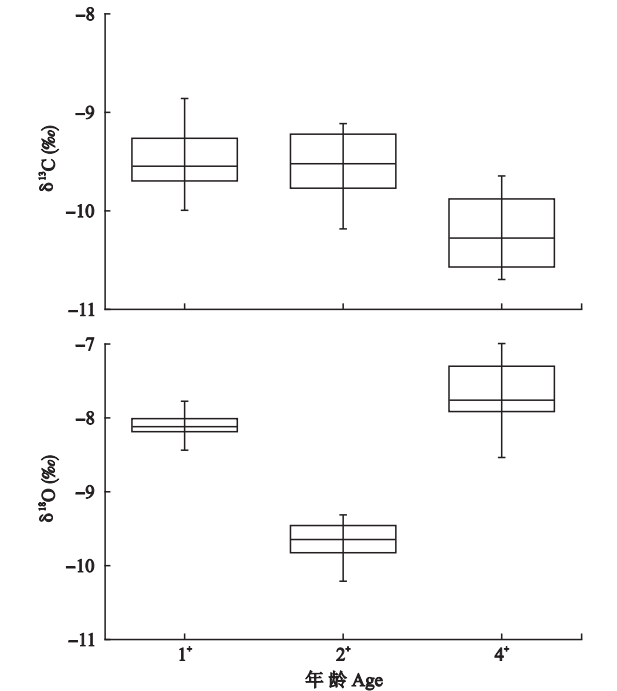


图 2 养殖条件下不同年龄四川裂腹鱼微耳石碳、氧同位素值

Fig.2 Carbon ( $\delta^{13}\text{C}$ ) and oxygen ( $\delta^{18}\text{O}$ ) stable isotopes in the lapillus of laboratory-reared *Schizothorax kozlovi* with different ages.

龄鱼、2<sup>+</sup>龄鱼变动范围更大。非参数检验和方差分析结果显示,微耳石 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 在不同年龄组之

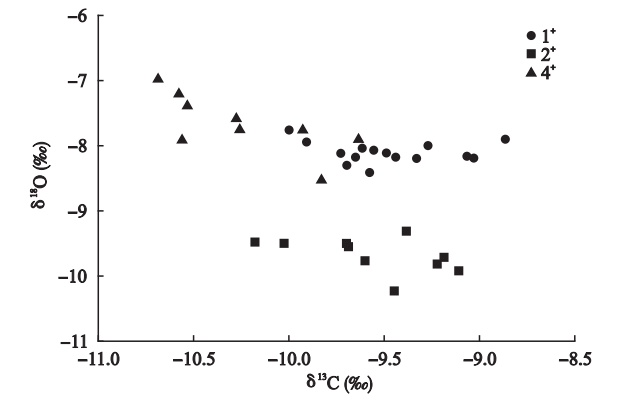


图 3 养殖条件下四川裂腹鱼微耳石稳定同位素成分关联分析

Fig.3  $\delta^{18}\text{O}$  and  $\delta^{13}\text{C}$  variation and separations in the lapillus of laboratory-reared *Schizothorax kozlovi*.

间均表现出显著性差异( $P<0.05$ ),主要表现为 $\delta^{13}\text{C}$ 在1<sup>+</sup>龄鱼与4<sup>+</sup>龄鱼之间( $P<0.001$ )、2<sup>+</sup>龄鱼与4<sup>+</sup>龄鱼之间( $P<0.001$ ), $\delta^{18}\text{O}$ 在1<sup>+</sup>龄鱼与2<sup>+</sup>龄鱼之间( $P<0.01$ )、2<sup>+</sup>龄鱼与4<sup>+</sup>龄鱼之间( $P<0.001$ ).相关性分析结果显示,四川裂腹鱼 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ 值均与耳石质量无显著相关关系。

2.3 微耳石稳定同位素成分的关联分析

从图 3 可以看出,四川裂腹鱼 2<sup>+</sup>龄组与 4<sup>+</sup>龄组在 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^{13}\text{C}$ 稳定同位素成分上均能完全分开,而 1<sup>+</sup>龄组与 4<sup>+</sup>龄组仅在 $\delta^{13}\text{C}$ 稳定同位素成分上能有效分开,在 $\delta^{18}\text{O}$ 稳定同位素成分上则有部分重叠现象,说明 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^{13}\text{C}$ 的关联分析能有效用于区分不同养殖年龄群体。

3 讨 论

鱼类耳石的碳、氧稳定同位素成分研究是目前国际上的热点之一,以海水鱼类和洄游型鱼类研究最多,多应用于鱼类种群和出生源判定、迁移规律、温度史重建、海洋环境域变、性成熟年龄估计、发育和代谢过程等方面<sup>[11-12,16,20-22]</sup>,甚少在淡水鱼类中应用,仅 Shen 等<sup>[23]</sup>对中国淡水鱼类鲢(*Hypophthalmichthys molitrix*)不同水域群体耳石的 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 进行了分析研究。本研究将此方法引入,以养殖条件下四川裂腹鱼为对象,揭示出其微耳石 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 在雌雄个体之间均无显著性差异,但在不同年龄组间存在差异,其中 $\delta^{13}\text{C}$ 主要与其新陈代谢活动降低有关,而 $\delta^{18}\text{O}$ 主要与其养殖温度条件有关,两者的关联分析能有效区分四川裂腹鱼不同养殖年龄群体,表明碳、氧稳定同位素技术在淡水鱼类养殖和资源保护中具有很好的应用前景。

鱼类耳石中碳的来源主要分为两类:直接吸收水中的无机碳和鱼体通过摄食进行新陈代谢吸收的代谢碳,一般认为耳石中稳定碳同位素的组成除了与鱼类的新陈代谢和食物来源有关外,还与水中的无机碳来源有关<sup>[16-19, 24-25]</sup>. 与长江口刀鲚(*Coilia nasus*)幼鱼、秘鲁外海茎柔鱼(*Dosidicus gigas*)以及长江水系鲢(*H. molitrix*)等相比,四川裂腹鱼微耳石  $\delta^{13}\text{C}$  均相对较高<sup>[23, 26-27]</sup>,这可能与其生活环境和食物来源不同有关. Schwarcz 等<sup>[24]</sup>研究表明,大西洋鳕鱼(*Gadus morhua*)耳石早期  $\delta^{13}\text{C}$  逐渐增加可能与其食物或营养水平的转化有关,而接近最大值的  $\delta^{13}\text{C}$  可能对应于鳕鱼的性成熟,之后保持稳定或逐渐降低. 本研究中四川裂腹鱼微耳石  $\delta^{13}\text{C}$  随着年龄的增长先保持稳定而后有所下降,而其成熟度是逐渐增加的,新陈代谢活动后期有所下降,实际上各年龄组拥有相同的食物来源,但由于本研究中所取不同年龄组之间采样相隔时间较长(约 450 日龄),其耳石  $\delta^{13}\text{C}$  与性成熟度的关系并不明显. 因此,四川裂腹鱼耳石碳稳定同位素与其新陈代谢、性成熟度之间的关系还有待进一步研究.

实际上,鱼类耳石形成时稳定氧同位素在耳石和水体之间会达到或接近分馏平衡,这种平衡是与温度密切相关的,已被广泛应用于古气候和古生态方面的重建中<sup>[20, 28]</sup>. 本研究养殖水体中四川裂腹鱼微耳石氧同位素平均值为  $(-9.40 \pm 0.50)\text{‰}$ ,而在 0~6 月龄养殖过程中 1<sup>+</sup>、2<sup>+</sup> 和 4<sup>+</sup> 龄组试验鱼的平均温度( $T$ )分别为 20、26 和 18  $^{\circ}\text{C}$ ,氧稳定同位素与温度间的线性回归方程为: $\delta^{18}\text{O}_{\text{otolith}} - \delta^{18}\text{O}_{\text{water}} = -0.25T + 6.31$  ( $R^2 = 0.89, P < 0.001$ ). 可见,四川裂腹鱼微耳石氧同位素与养殖温度息息相关,这与诸多海水鱼类研究结果相似<sup>[11, 14, 29]</sup>,例如,在正常盐度条件下,1‰的  $\delta^{18}\text{O}$  变化对应于约 5  $^{\circ}\text{C}$  的海水温度变化<sup>[11]</sup>. 由于本文所取样本的养殖温度并不十分明确,是采取平均值进行模拟,而且仅有 3 个温度组,所构建方程的准确性还有待进一步明确.

作为鱼类的天然标记,耳石  $\delta^{13}\text{C}$  反映了鱼类的食物状况,而  $\delta^{18}\text{O}$  反映的是鱼类生活环境中水的状况,两者的结合可以揭示鱼类生态系统方面的变化,其关联分析已被应用于种群识别、迁移路径追踪、仔稚鱼出生地、摄食场判定、深海鱼深度回推等诸多研究中<sup>[16-17, 30-32]</sup>,本研究也再次证实耳石碳、氧稳定同位素技术在四川裂腹鱼群体识别中有效.

本研究所用四川裂腹鱼的耳石整体都被均一化成粉末样品进行碳、氧同位素测定,因此所有数据均

反映的是试验鱼的整个生活史过程. 事实上,随着耳石高分辨率微量样品采集和分析技术的不断成熟,研究鱼类耳石不同生长轮的稳定同位素变化,对于反映鱼类某个特定生长阶段的生活史特征有重要意义,也为追溯鱼类生态系统中的环境演变历史提供了重要支撑.对于野生四川裂腹鱼来说,结合高分辨率微量样品采集和分析的稳定同位素技术,无疑是今后研究的重点方向.

参考文献

[1] Yue P-Q (乐佩奇). Fauna Sinica: Osteichthyes-Cypriniformes III. Beijing: Science Press, 2000 (in Chinese)

[2] Cao W-X (曹文宣), Chen Y-Y (陈宜瑜), Wu Y-F (武云飞), et al. Origin and evolution of Schizothoracine fishes in relation to the upheaval of the Qinghai-Xizang Plateau// The Qinghai-Xizang Plateau Comprehensive Scientific Expedition of Chinese Academy of Sciences, eds. Studies on the Period, Amplitude and Type of the Upheaval of the Qinghai-Xizang Plateau. Beijing: Science Press, 1981: 118-130 (in Chinese)

[3] Wu J-M (吴金明), Zhao H-T (赵海涛), Miao Z-G (苗志国), et al. Status and conservation of fish resources in the Chishui River. Biodiversity Science (生物多样性), 2010, 18(2): 162-168 (in Chinese)

[4] Wu L (伍 律). The Fishes of Guizhou. Guiyang: Guizhou People's Press, 1989 (in Chinese)

[5] Zou X-J (邹习俊). Study on Karyotype and Genetic Diversity in the Population of Schizothorax (*Racoma*) *kozlovi*. Master Thesis. Guiyang: Guizhou University, 2009 (in Chinese)

[6] Chen Y-X (陈永祥). The Genetic Characterization and Population Genetic Diversity of *Schizothorax kozlovi* (Nikolsky). PhD Thesis. Ya'an: Sichuan Agricultural University, 2013 (in Chinese)

[7] He YF, Wu XB, Zhu YJ, et al. Cloning of gonadal aromatase gene *Cyp19a* in an endemic fish (*Schizothorax kozlovi*) of the Upper Yangtze River, and temperature effects on its expression. Genes & Genomics, 2016, 38: 841-848

[8] He Y-F (何勇凤), Zhu Y-J (朱永久), Guo W (郭威), et al. Tissue distribution of brain aromatase gene *Cyp19b* in *Schizothorax kozlovi* and temperature effects on its expression. Chinese Journal of Zoology (动物学杂志), 2016, 51(2): 281-290 (in Chinese)

[9] Dou S-Z (窦硕增). An introduction to fish otolith research: Techniques and applications. Studia Marina Sinica (海洋科学集刊), 2007, 48: 93-113 (in Chinese)

[10] Campana S. Otolith science entering the 21st century. Marine and Freshwater Research, 2005, 56: 485-495

[11] Gao Y-W (高永文). Stable oxygen and carbon isotope analyses in otoliths of fish. Progress in Natural Science (自然科学进展), 2004, 14(3): 268-272 (in Chinese)



- [12] Devereux I. Temperature measurements from oxygen isotope ratio of fish otoliths. *Science*, 1967, **155**: 1684–1685
- [13] Dufour E, Höök TO, Patterson WP, *et al.* High-resolution isotope analysis of young alewife *Alosa pseudoharengus* otoliths: Assessment of temporal resolution and reconstruction of habitat occupancy and thermal history. *Journal of Fish Biology*, 2008, **73**: 2434–2451
- [14] Kitagawa T, Ishimura T, Uozato R, *et al.* Otolith  $\delta^{18}\text{O}$  of Pacific Bluefin tuna *Thunnus orientalis* as an indicator of ambient water temperature. *Marine Ecology Progress Series*, 2013, **481**: 199–209
- [15] Romo-Curiel AE, Herzka SZ, Sepulveda CA, *et al.* Rearing conditions and habitat use of white seabass (*Atractoscion nobilis*) in the northeastern Pacific based on otolith isotopic composition. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2016, **170**: 134–144
- [16] Gao YW, Joner SH, Bargmann GG. Stable isotopic composition of otoliths in identification of spawning stocks of Pacific herring (*Clupea pallasii*) in Puget Sound. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 2011, **58**: 2113–2120
- [17] Gao YW, Dettman DL, Piner KR, *et al.* Isotopic correlation ( $\delta^{18}\text{O}$  versus  $\delta^{13}\text{C}$ ) of otoliths in identification of groundfish stocks. *Transactions of the American Fisheries Society*, 2010, **139**: 491–501
- [18] Grønkjær P, Pedersen JB, Ankjærø TT, *et al.* Stable N and C isotopes in the organic matrix of fish otoliths: Validation of a new approach for studying spatial and temporal changes in the trophic structure of aquatic ecosystems. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 2013, **70**: 143–146
- [19] Hidalgo M, Tomás J, Høie H, *et al.* Environmental influences on the recruitment process inferred from otolith stable isotopes in *Merluccius merluccius* off the Balearic Islands. *Aquatic Biology*, 2008, **3**: 195–207
- [20] Thorrold SR, Campana SE, Jones CM, *et al.* Factors determining  $\delta^{13}\text{C}$  and  $\delta^{18}\text{O}$  fractionation in aragonitic otoliths of marine fish. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1997, **61**: 2909–2919
- [21] Gao Y-W (高永文), Lu A-H (鲁安怀), Wang Q-Y (王清印), *et al.* Stable oxygen and carbon isotope methods in identification of fish stocks. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry* (矿物岩石地球化学通报), 2011, **30**(3): 270–276 (in Chinese)
- [22] Currey LM, Heupel MR, Simpfendorfer CA, *et al.* Inferring movement patterns of a coral reef fish using oxygen and carbon isotopes in otolith carbonate. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 2014, **456**: 18–25
- [23] Shen JZ, Gao YW. Stable isotope analyses in otoliths of silver carp: A pilot study in identification of natal sources and stock differences. *Environmental Biology of Fishes*, 2012, **95**: 445–453
- [24] Schwarzc HP, Gao Y, Campana S, *et al.* Stable carbon isotope variations in otoliths of Atlantic cod (*Gadus morhua*). *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 1998, **55**: 1798–1806
- [25] Tohse H, Mugiya Y. Sources of otolith carbonate: Experimental determination of carbon incorporation rates from water and metabolic  $\text{CO}_2$ , and their diel variations. *Aquatic Biology*, 2008, **1**: 259–268
- [26] Jiang T (姜涛), Liu H-B (刘洪波), Yang J (杨健). Characteristics of C and O stable isotope in otolith of juvenile *Coilia nasus* from the Changjiang River Estuary. *Marine Sciences* (海洋科学), 2015, **39**(6): 48–53 (in Chinese)
- [27] Gong Y (贡艺), Chen X-J (陈新军), Li Y-K (李云凯), *et al.* A study on feeding ecology and migration patterns of *Dosidicus gigas* off Peru using stable isotope analysis. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2015, **26**(9): 2874–2880 (in Chinese)
- [28] Zhou L (周玲), Jin Z-D (金章东), Williams IS, *et al.* Oxygen and strontium isotope markers of Lake Qinghai naked carp otoliths and their implication for fish migratory pattern. *Chinese Science Bulletin* (科学通报), 2016, **61**(6): 668–675 (in Chinese)
- [29] Geffen AJ. Otolith oxygen and carbon stable isotopes in wild and laboratory-reared plaice (*Pleuronectes platessa*). *Environmental Biology of Fishes*, 2012, **95**: 419–430
- [30] Correia AT, Barros F, Sial AN. Stock discrimination of European conger eel (*Conger conger* L.) using otolith stable isotope ratios. *Fisheries Research*, 2011, **108**: 88–94
- [31] Longmore C, Trueman CN, Neat F, *et al.* Otolith geochemistry indicates life-long spatial population structuring in a deep-sea fish, *Coryphaenoides rupestris*. *Marine Ecology Progress Series*, 2011, **435**: 209–224
- [32] Zhu G-P (朱国平). Otolith microchemistry of tuna species: Research progress. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2011, **22**(8): 2211–2218 (in Chinese)

作者简介 何勇凤,女,1983年生,助理研究员.主要从事鱼类保护生物学研究. E-mail: heyf@yfi.ac.cn

责任编辑 张凤丽