

DOI: 10.19663/j.issn2095-9869.20181029002

http://www.yykxjz.cn/

袁威, 王玉堃, 张廷廷, 金显仕, 孙耀. 基于耳石 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 的黄、渤海秋季小黄鱼补充群体的种群划分. 渔业科学进展, 2019, 40(5): 11-18

Yuan W, Wang YK, Zhang TT, Jin XS, Sun Y. Investigating the population structure of *Larimichthys polyactis* from the Yellow Sea and Bohai Sea using stable isotope mass spectrometry. Progress in Fishery Sciences, 2019, 40(5): 11-18

基于耳石 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 的黄、渤海秋季 小黄鱼补充群体的种群划分*

袁威^{1,3} 王玉堃³ 张廷廷³ 金显仕^{2,3} 孙耀^{2,3①}

(1. 南京农业大学无锡渔业学院 无锡 214081; 2. 青岛海洋科学与技术试点国家实验室海洋渔业科学与食物产出过程功能实验室 青岛 266071; 3. 中国水产科学研究院黄海水产研究所 农业农村部海洋渔业可持续发展重点实验室 山东省渔业资源与生态环境重点实验室 青岛 266071)

摘要 关于小黄鱼的种群划分问题,从20世纪50年代至今一直存在争议。以往研究海洋鱼类种群划分的方法主要有标记重捕法、渔获量分析法、寄生虫标记法、形态表型量度特征法、分子生物学法和钙质结构元素指纹法等,而这些方法在细节的表述方面有各自的局限性。本研究采用稳定同位素质谱分析技术,分析了黄、渤海渔业资源调查中92尾小黄鱼(*Larimichthys polyactis*)的左矢耳石样品中 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 的值,并对每尾小黄鱼耳石 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 的值进行聚类分析。结果显示,我国黄、渤海秋季小黄鱼早期补充群体可划分为4个种群,即渤海黄海北部种群、黄海中部种群、黄海南部离岸种群和黄海南部沿岸种群。其中,黄海南部离岸种群和其他3个种群没有站位交叉现象。对聚类分析的结果进行判别分析,得出渤海黄海北部种群的判别成功率为75.9%,黄海中部种群的判别成功率为80.0%,黄海南部离岸种群判别成功率为81.0%,黄海南部沿岸种群判别成功率为95.5%,总体判别成功率为82.6%。首次将黄海南部种群细分为黄海南部离岸种群和黄海南部沿岸种群,且2种群之间很少有站位的交叉现象。

关键词 耳石; $\delta^{13}\text{C}$; $\delta^{18}\text{O}$; 小黄鱼; 种群划分

中图分类号 S931 **文献标识码** A **文章编号** 2095-9869(2019)05-0011-08

耳石(Otolith)是位于硬骨鱼类内耳膜迷路内的一种碳酸钙结晶体,主要成分为碳酸钙和有机质。鱼类耳石中碳、氧稳定同位素($\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$)成分具有独特的性质,真实记录了鱼类所经历的生态环境的变化(Gao *et al.*, 2003; 高永文等, 2004)。其中, $\delta^{13}\text{C}$ 被证

实与饵料的关系较为密切(Schwarzc *et al.*, 1998),而 $\delta^{18}\text{O}$ 则被证实为与水温关系十分密切(Hoie *et al.*, 2004; 姜涛等, 2015; 高永文等, 2011)。近年来,稳定同位素应用于鱼类研究中颇多,如鱼类的种群鉴别(Gao *et al.*, 2010)和产卵场(Shiao *et al.*, 2010)、索饵场

* 国家重点基础研究发展计划(2015CB453303)、国家自然科学基金项目(31872692; 41606195)、山东省泰山学者专项基金项目和青岛海洋科学与技术试点国家实验室鳌山人才培养计划(2017ASTCP-ES07)共同资助 [This work was supported by the National Basic Research Program of China (2015CB453303), the National Natural Science Fund (31872692; 41606195), the Special Funds for Taishan Scholars Project of Shandong Province, and Aoshan Talents Cultivation Program Supported by Pilot National Laboratory for Marine Science and Technology (Qingdao) (2017ASTCP-ES07)]. 袁威, E-mail: yuanwei03164254@163.com

① 通讯作者: 孙耀, 研究员, E-mail: sunyao@ysfri.ac.cn

收稿日期: 2018-10-29, 收修改稿日期: 2018-12-04

的划分(Rooker *et al.*, 2008),以及深海鱼垂直迁移路径(Longmore *et al.*, 2011; Lin *et al.*, 2012)等。Gao 等(1999)利用大马哈鱼(*Oncorhynchus nerka*)耳石中碳氧稳定同位素特征作为栖息地的指标来辨别鱼类种群。Thorrold 等(2001)通过对不同海域的犬牙石鱼(*Cynoscion regalis*)耳石中稳定性同位素 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 的分析,确定了5个不同海域的犬牙石鱼出生地和资源群单元的差异,判别成功率达60%~81%。研究发现,加勒比海和地中海大西洋黑鲷(*Thunnus thynnus*)全耳石的 $\delta^{18}\text{O}$ 有明显差异,地中海的大西洋黑鲷的耳石 $\delta^{18}\text{O}$ 介于-1.08%与-1.30%之间,而加勒比海的大西洋黑鲷个体的耳石介于-2.09%与-2.39%之间,其判别率高达98%(Rooker *et al.*, 2004)。因此,耳石中 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 可以反映鱼类的环境生活史,可以作为自然标记物探索鱼类种群的连通性和差异性,识别鱼类种群。

小黄鱼(*Larimichthys polyactis*)属硬骨鱼纲(Osteichthyes)、鲈形目(Perciformes)、石首鱼科(Sciaenidae)、黄鱼属(*Larimichthys*),广泛分布于中国渤海、黄海和东海以及朝鲜半岛西岸海域,通常栖息于水域近底层,水深不超过100 m,具有明显的垂直移动现象(李建生等, 2009),对温度和盐度适应范围较广(谢立峰等, 2006)。关于小黄鱼种群划分问题,从20世纪50年代至今一直存在争议,熊瑛等(2018)总结了鱼类种群划分方法在小黄鱼种群研究上的应用,并探讨了这些方法各自的可靠性和局限性。以往的研究中,一些学者将我国近海小黄鱼划分为3个种群,即黄渤海种群、南黄海种群和东海种群(林新濯等, 1965; 张秋华等, 2007; 毛锡林等, 1987; 叶昌臣, 1991; 俞连福等, 2003; 严利平等, 2014);而另一些学者则认为东、黄、渤海小黄鱼还存在第4个种群,即黄海中部种群(刘效舜, 1990; 赵传纲, 1990; 金显仕等, 2005; 唐启升, 2012)。徐兆礼等(2010)在前人研究的基础上,重新审视了我国近海小黄鱼种群的划分问题,提出中国近海小黄鱼仅存在2个种群,即黄海南部和东海小黄鱼种群及渤海和黄海北部小黄鱼种群;此外,王玉堃等(2016)对不同采样站点小黄鱼耳石元素含量进行分析,将黄、渤海小黄鱼早期补充群体划分为渤海种群、黄海中部种群和南黄海种群。

本研究对黄、渤海秋季小黄鱼补充群体耳石中 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 的值进行分析,探讨了我国黄、渤海小黄鱼的种群划分问题,以及其可能的生态学意义,以期小黄鱼资源的保护和科学管理提供基础。

1 材料与方法

1.1 实验材料

本研究的样品来自2006年9~10月中国水产科学研究院黄海水产研究所进行的秋季连续航次黄、渤海渔业资源底拖网调查,调查范围为119.39°~124.22°E、31.30°~39.06°N。本研究采用的小黄鱼样品共92尾,体长平均值为(120.14±18.02) mm,耳石重平均值为(73.45±24.92) mg,结合张国政等(2010)研究中当年生幼鱼体长体重关系,可以确定本研究所用小黄鱼样品均为当年生个体。样品共19个站位,如图1所示。由于耳石保存时间较久,用30%双氧水浸泡2遍,再用刷子将耳石附着的有机组织清洗干净,最后用蒸馏水冲洗数遍,烘干称重,研磨成粉末,保存于离心管待后续测定。

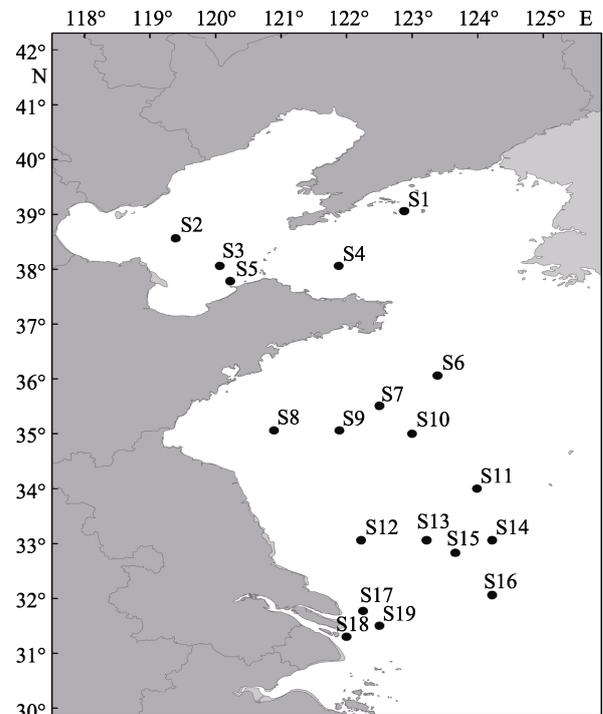


图1 小黄鱼样本采集站位
Fig.1 Sampling sites of *L. polyactis*

1.2 稳定同位素测定

每个耳石称取2 mg样品于顶空瓶中,用带硅胶隔垫的盖子密封,通过离线吹扫用氦气排空反应瓶中的空气,消除其对 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ 分析结果的影响。经吹扫处理后,通过向反应瓶中加入7滴浓磷酸,在72℃条件下反应1 h,磷酸与碳酸盐反应释放出的 CO_2 在高纯氮气的带动下在线除水,通过30 m的Poraplot Q色谱柱与其他杂质气体分离,分离后的

CO_2 直接进入 Delta Plus 稳定同位素质谱仪(Finnigan 公司生产)进行 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ 测定。碳氧稳定同位素比值用国际通用的 δ 值表示, 按以下公式计算:

$$\delta X(\text{‰}) = (R_{\text{样品}} - R_{\text{标准}}) / R_{\text{标准}} \times 1000$$

式中, X 为 ^{13}C 或者 ^{18}O , R (以国际标准的 V-PDB 为基准) 为 $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ 或 $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ 者的比值。为保证实验结果的精度和准确度, 将 CO_2 标准气体作为参考气。标准物质采用 NBS19 ($\delta^{13}\text{C}$: 1.95‰; $\delta^{18}\text{O}$: -2.20‰) 和 IAEA-CO-8 ($\delta^{13}\text{C}$: -5.80‰; $\delta^{18}\text{O}$: -22.70‰)。其中, 碳氧的精确度分别为 0.10‰ 和 0.20‰。

1.3 数据分析

以耳石中 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 为指标, 对各站位每尾小黄鱼进行聚类分析。聚类方法为系统聚类法 (Hierarchical Cluster), 以聚类分析的结果对其进行判别分析, 得出其判别成功率。对各种群之间小黄鱼耳石中 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 比值进行单因素方差分析 (One-way ANOVA), 采用 SNK (Student-Newman-Keuls) 检验, 分析种群之间是否存在显著性差异 ($P < 0.05$)。所有数据分析均采用 SPSS 21.0 完成。

2 结果

2.1 不同站位小黄鱼耳石 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 的聚类结果和判别分析

以各站位每尾小黄鱼左耳石中 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 的值作为变量, 对全部 92 尾小黄鱼进行系统聚类, 得出树状图 (图 2)。92 尾小黄鱼被分成 4 类, 树状图从左到右的 4 类记为 1、2、3 和 4 类。其中, 聚类结果显示, 92 尾小黄鱼先单独聚类出第 4 类, 且显示与其他类没有站位交叉现象, 接着又聚类出第 3 类, 最后聚类出第 1 类和第 2 类, 总体聚类结果明显。

根据该聚类结果, 基于 92 尾小黄鱼耳石 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 指标绘制散点分布图。由图 3 可知, 92 尾小黄鱼被分成明显的 4 类。其中, 第 1 类包含主要站位为 S1、S2、S3、S4 和 S5; 第 2 类包含主要站位为 S6、S7、S8、S9 和 S10; 第 3 类包含主要站位为 S11、S13、S14、S15 和 S16; 第 4 类只包含站位 S12、S17、S18 和 S19。结果显示, 第 4 类与其他 3 类没有显著的站位交叉现象。

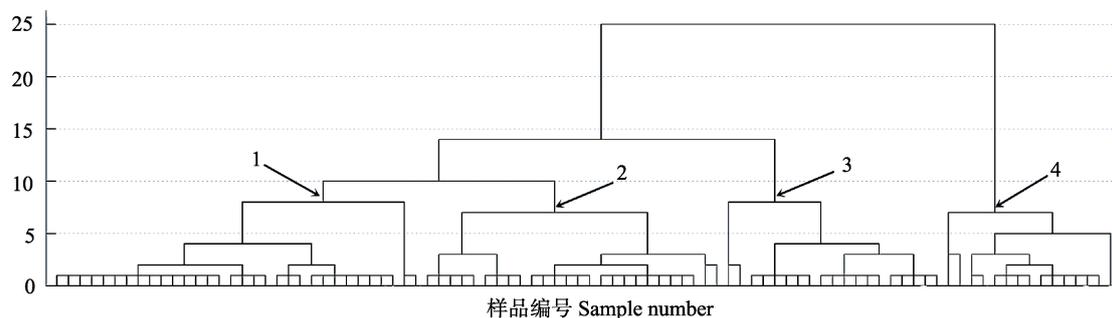


图 2 小黄鱼耳石 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 的聚类分析

Fig.2 Cluster analysis tree diagram of $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{18}\text{O}$ in otolith of *L. polyactis*

对聚类结果进行判别分析, 结果如表 1 所示。由表 1 可知, 种群 1 共 29 尾小黄鱼, 其中 22 尾进行正确聚类, 其判别成功率为 75.9%; 种群 2 共 20 尾小黄鱼, 其中 16 尾进行正确聚类, 其判别成功率为 80.0%; 种群 3 共 21 尾小黄鱼, 其中 17 尾进行正确聚类, 其判别成功率为 81.0%; 种群 4 共 22 尾小黄鱼, 其中 21 尾进行正确聚类, 其判别成功率为 95.5%。总体的判别成功率为 82.6%。

2.2 小黄鱼种群 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 的差异分析

根据聚类结果, 对小黄鱼耳石中 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 的值采用 SNK (Student-Newman-Keuls) 方法进行单因素方差分析 (表 2 和表 3)。结果显示, 第 1 类和第 4 类的 $\delta^{13}\text{C}$ 没有显著性差异 ($P > 0.05$), 第 3 类与第 2 类的

$\delta^{13}\text{C}$ 也没有显著性差异 ($P > 0.05$), 但前 2 类的 $\delta^{13}\text{C}$ 与后 2 类之间存在显著性差异 ($P < 0.05$); 而 4 个类别的 $\delta^{18}\text{O}$ 相互之间存在显著性差异 ($P < 0.05$)。由此可见, 耳石中 $\delta^{18}\text{O}$ 比 $\delta^{13}\text{C}$ 具有更高的辨识度。

2.3 小黄鱼种群划分

根据聚类结果, 对 19 个站位划分出来的 4 个种群绘制种群划分区图 (图 4)。由图 4 可知, S1、S2、S3、S4 和 S5 站位聚为一类, 该类位于渤海与黄海北部, 将其定义为渤海黄海北部种群; S6、S7、S8、S9 和 S10 站位聚为一类, 该类位于黄海中部, 将其定义为黄海中部种群; S11、S13、S14、S15 和 S16 站位聚为一类, 该类位于黄海南部深海区, 且离陆地较远, 将其定义为黄海南部离岸种群; S12、S17、S18

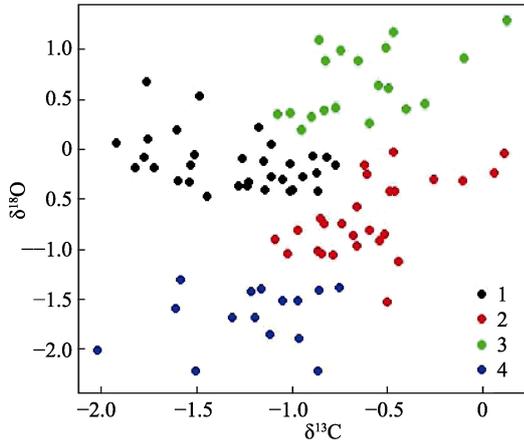


图3 基于 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 指标对所有小黄鱼的聚类分析
Fig.3 Cluster analysis of all *L. polyactis* based on $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{18}\text{O}$

1: 主要站位 S1、S2、S3、S4 和 S5; 2: 主要站位 S6、S7、S8、S9 和 S10; 3: 主要站位 S11、S13、S14、S15 和 S16; 4: 站位 S12、S17、S18 和 S19
1: Main sites: S1, S2, S3 and S4, S5; 2: Main sites: S6, S7, S8 and S9, S10; 3: Main sites: S11, S13, S14, S15 and S16; 4: Sites: S12, S17, S18 and S19

表1 不同种群小黄鱼的判别结果

Tab.1 The classification results of different populations of *L. polyactis*

实际种群 Actual population	预测种群 Forecast population				合计 Total	正确率 Accuracy (%)
	1	2	3	4		
1	22	6	1	0	29	75.9
2	3	16	1	0	20	80.0
3	2	2	17	0	21	81.0
4	0	1	0	21	22	95.5

注: 已对所有小黄鱼样品中的 82.6%进行了正确分类

Note: 82.6% of all *L. polyactis* samples have been correctly classified

表2 不同种群小黄鱼 $\delta^{13}\text{C}$ 的差异

Tab.2 The $\delta^{13}\text{C}$ difference of different populations of *L. polyactis*

类别 Classification	数量 Number	子集 Subset	
		1	2
1	32	-1.295 ^a	
4	15	-1.212 ^a	
3	19		-0.628 ^b
2	26		-0.594 ^b

注: 子集中数字上字母相同, 表示组间差异不显著 ($P>0.05$), 下同

Note: The number with the same letters in the subgroup do not show significant difference between the groups. ($P>0.05$). The same as below

表3 不同种群小黄鱼 $\delta^{18}\text{O}$ 的差异
Tab.3 The $\delta^{18}\text{O}$ difference of different populations of *L. polyactis*

类别 Classification	数量 Number	子集 Subset			
		1	2	3	4
4	15	-1.675 ^a			
2	26		-0.685 ^b		
1	32			-0.135 ^c	
3	19				0.670 ^d

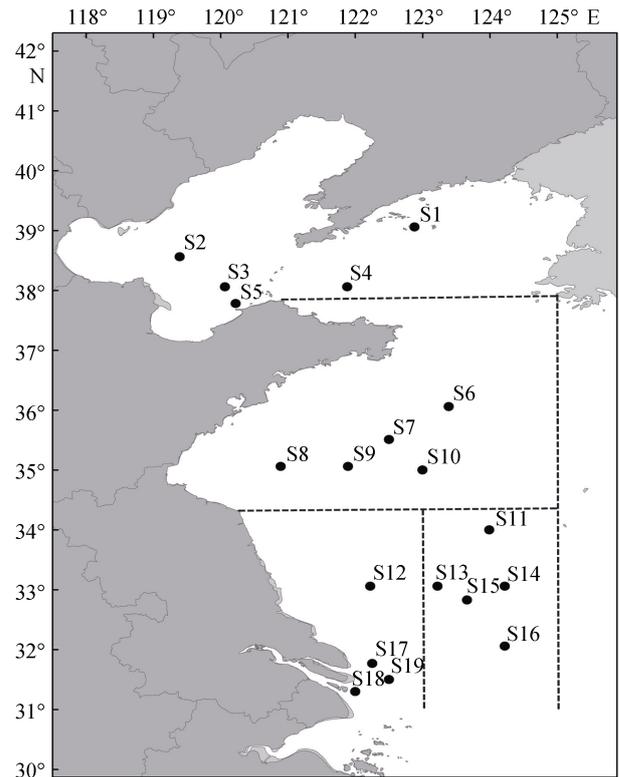


图4 不同站位小黄鱼种群划分区域
Fig.4 The population division of *L. polyactis* at different sites

和 S19 站位聚为一类, 该类位于黄海南部沿岸海域, 将其定义为黄海南部沿岸种群。黄海南部 2 个种群进行聚类分析时, 2 个种群间没有站位交叉现象。

3 分析与讨论

3.1 应用耳石中 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 划分鱼类种群的可行性

鱼类耳石中 $\delta^{13}\text{C}$ 受多种因素的影响, 如食物来源、新陈代谢速率和溶解的无机碳(DIC)等。食物中 $\delta^{13}\text{C}$ 主要与捕获物中 $\delta^{13}\text{C}$ 有关, 随着捕获物的年龄不同, 不同生长阶段的代谢速率和温度不同, 其 $\delta^{13}\text{C}$ 也相对变化(Jamieson *et al*, 2004; Sherwood *et al*, 2003)。研究表明, 盐度和 $\delta^{13}\text{C}$ 之间存在显著的正相

关关系(Bastow *et al.*, 2002; Richard *et al.*, 2012)。Gao 等(1999)研究发现, 随着大马哈鱼从淡水迁移到海水中, 从耳石核心到边缘处, $\delta^{13}\text{C}$ 逐渐增加。本研究结果中, $\delta^{13}\text{C}$ 比值黄海南部离岸种群最高, 渤海黄海北部种群最低。渤海黄海北部种群的站位多数位于沿岸和捕捞区, 由于人类活动对沿岸海域鱼类的过度捕捞和环境污染, 导致沿岸小黄鱼食物链破坏和物种丰富度降低, 故渤海与黄海北部的 $\delta^{13}\text{C}$ 低; 黄海南部离岸种群的站位位于外海, 受人类活动干扰小, 可能富含 DIC 或者食物种类丰富, 故其 $\delta^{13}\text{C}$ 高。而 S17、S18 和 S19 站位位于长江口附近, 由于长江口冲淡水的作用, 内陆淡水汇入外海海区, 造成低盐环境, 因此, 位于长江口附近的黄海南部沿岸种群 $\delta^{13}\text{C}$ 比值不高, 与前人研究结果相一致(Bastow *et al.*, 2002)。因此, 随着不同地理区域的水文特征和食物来源的不同, 根据 $\delta^{13}\text{C}$ 进行种群划分的方法是可行的。鱼类耳石中 $\delta^{18}\text{O}$ 与周围水体环境相平衡, 可以反映水体环境的温度变化(Hoie *et al.*, 2004; 姜涛等, 2015; 高永文等, 2011)。本研究采用的是全耳石, 反映的是鱼类整个生命周期的生境信息, 而鱼类整个生命周期的温度变化则可以通过耳石核心到边缘处的 $\delta^{18}\text{O}$ 分布情况来反映。本研究将黄、渤海 19 个站位的小黄鱼划分为 4 个种群, 倘若邻近站位的 $\delta^{18}\text{O}$ 相似, 并不能直接证明这些站位之间鱼类存在混合, 也有可能这些站位本身就具有相似的理化环境; 相反, 倘若不同站位的 $\delta^{18}\text{O}$ 不同, 则可认为这些站位的鱼类经历了不同的生活环境, 不存在充分的混合现象。如图 3 所示, 不同地理种群的小黄鱼 $\delta^{18}\text{O}$ 不同且存在显著性 ($P < 0.05$) 差异, 说明 $\delta^{18}\text{O}$ 指示其特定的生活环境没有混合现象。

研究发现, 耳石中 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 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(何勇凤等, 2017); 高永文等(2011)以海鱼和洄游鱼的具体研究为例, 也说明了 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 的关联分析在鱼群识别方面发挥着独特的作用; Wang 等(2016)应用不同站位小黄鱼耳石中 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 比值差异, 将黄、渤海小黄鱼种群划分为渤海种群、黄海中部种群和黄海南部种群。故本研究基于耳石 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 划分黄、渤海秋季小黄鱼补充群体的方法是可行的, 而且本研究中对每尾小黄鱼样品进行了分类, 实验操作简洁有效, 所得结果也更详细说明了种群划分的问题, 对海洋鱼类种群划分方法加以完善。

3.2 小黄鱼早期补充群体的划分

关于我国近海小黄鱼种群的划分一直存在较大

分歧, 然而, 不同种群之间由于生物遗传、进化和种间关系彼此分离, 形成生殖隔离和地理隔离, 只有了解种群结构才有利于鱼类资源的合理利用和渔业的可持续发展。对于海洋鱼类而言, 其并非均匀地分布在物种分布区, 而是形成一些被隔离的、相对独立的群体, 这种群体是鱼类生存和活动的单位, 即种群(Shen *et al.*, 2002)。叶昌臣(1991)研究发现, 小黄鱼产卵后分散在渤海、黄海及东海北部各个索饵场进行索饵, 且 8~11 月渤海与黄海小黄鱼饵料组成丰富, 摄食强度较高。本研究所取用的 19 个站位小黄鱼样品处于索饵阶段, 且均为当年生个体, 分析了各站位每尾小黄鱼左耳石中 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 的值, 根据其差异性将黄、渤海秋季小黄鱼早期补充群体划分为 4 个种群, 即渤海黄海北部种群、黄海中部种群、黄海南部离岸种群和黄海南部沿岸种群, 此结果与以往研究有所差异。王玉堃等(2016)对不同采样站位小黄鱼耳石元素含量的平均值进行聚类分析, 将黄、渤海小黄鱼早期补充群体划分为渤海种群、黄海中部种群和南黄海种群。可以看出, 本研究通过对每个站位每尾小黄鱼耳石样品中 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 的值进行聚类分析, 结果显示, 王玉堃等(2016)研究中的南黄海种群在本研究中被进一步细分为黄海南部离岸种群和黄海南部沿岸种群, 这也进一步证明了本研究方法更加详细、精确。本研究中由图 2 聚类的先后顺序, 把黄、渤海 19 个站位的小黄鱼划分为黄海南部沿岸种群、黄海南部离岸种群、黄海中部种群和渤海黄海北部种群, 且 4 个种群聚类结果明显, 黄海南部 2 个种群之间没有站位交叉现象。根据种群划分结果, 绘制了如图 4 的种群划分区域图。除了图 4 中划分的 4 个区域外, 其他海域也可能有小黄鱼出现的情况。由于在出海资源调查时, 可能因为某些因素没有捕到或者记录在案, 导致后面数据统计时, 以为这部分海域没有小黄鱼, 例如: S11、S13、S14、S15、S16 站位所属的黄海南部离岸种群, 该海域北部一些海域显示没有小黄鱼, 但实际情况可能该海域有小黄鱼出现的站位, 只是调查时没有捕到, 所以在图 4 中没有对该海域进行特定划分。

综上所述, 本研究将黄、渤海秋季小黄鱼早期补充群体划分为渤海黄海北部种群、黄海中部种群、黄海南部离岸种群和黄海南部沿岸种群, 首次把黄海南部小黄鱼群体细分为黄海南部离岸种群和黄海南部沿岸种群, 且 2 种群之间很少有站位交叉现象。

参 考 文 献

Bastow TP, Jackson G, Edmonds JS. Elevated salinity and

- isotopic composition of fish otolith carbonate: Stock delineation of pink snapper, *Pagrus auratus*, in Shark Bay, Western Australia. *Marine Biology*, 2002, 141(5): 801–806
- Gao YW, Beamish RJ. Isotopic composition of otoliths as a chemical tracer in population identification of sockeye salmon (*Oncorhynchus nerka*). *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 1999, 56(11): 2062–2068
- Gao YW, Beamish RJ. Stable isotopic composition of otoliths from tagged pacific halibut, *Hippoglossus stenolepis*. *Environmental Biology of Fishes*, 2003, 67(3): 253–261
- 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(2): 491–501
- Gao YW, Lu AH, Song YG. Study on the stable isotope composition of carbon and oxygen in fish otoliths. *Progress in Natural Science*, 2004(3): 268–272 [高永文, 鲁安怀, 宋玉国. 鱼耳石的碳、氧稳定同位素成分研究. *自然科学进展*, 2004(3): 268–272]
- Gao YW, Lu AH, Wang QY, *et al.* Oxygen and carbon stable isotope methods for fish population identification. *Bulletin of Mineralogy Petrology*, 2011, 30(3): 270–276 [高永文, 鲁安怀, 王清印, 等. 鱼群识别的氧、碳稳定同位素方法. *矿物岩石地球化学通报*, 2011, 30(3): 270–276]
- He YF, Wu XB, Wang XG, *et al.* Study on the carbon and oxygen stable isotope characteristics of the otoliths from the scutellariae of Sichuan. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2017, 28(7): 2339–2343 [何勇凤, 吴兴兵, 王旭歌, 等. 四川裂腹鱼耳石碳、氧稳定同位素特征. *应用生态学报*, 2017, 28(7): 2339–2343]
- Hoie H, Otterlei E, Folkvord A. Temperature-dependent fractionation of stable oxygen isotopes in otoliths of juvenile cod (*Gadus morhua* L.). *ICES Journal of Marine Science*, 2004, 61(2): 243–251
- Jamieson RE, Schwartz HP, Bratley J. Carbon isotopic records from the otoliths of Atlantic cod (*Gadus morhua*) from eastern Newfoundland, Canada. *Fisheries Research*, 2004, 68(1–3): 83–97
- Jiang T, Liu HB, Yang J. Preliminary report on carbon and oxygen isotope characteristics of otoliths in juveniles of the Yangtze River Estuary. *Marine Sciences*, 2015, 39(6): 48–53 [姜涛, 刘洪波, 杨健. 长江口刀鲚幼鱼耳石碳、氧同位素特征初报. *海洋科学*, 2015, 39(6): 48–53]
- Jin XS, Zhao XY, Meng TX, *et al.* Small yellow croaker biological resource and habitation environment of the Bohai and Yellow Sea. Beijing: Science Press, 2005: 308–321 [金显仕, 赵宪勇, 孟田湘, 等. 黄渤海生物资源与栖息环境. 北京: 科学出版社, 2005: 308–321]
- Li JS, Lin LS, Cheng JH. Distribution characteristics of small yellow croaker in autumn in northern East China Sea and its relationship with bottom temperature and salinity. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2009, 16(3): 348–356 [李建生, 林龙山, 程家骅. 东海北部秋季小黄鱼分布特征及其与底层温度和盐度的关系. *中国水产科学*, 2009, 16(3): 348–356]
- Lin HY, Shiao JC, Chen YG, Iizuka Y. Ontogenetic vertical migration of grenadiers revealed by otolith microstructures and stable isotopic composition. *Deep Sea Research, Part I: Oceanographic Research Papers*, 2012(61): 123–130
- Lin XZ, Deng SM, Huang ZY. Study of population on biometrics of small yellow croaker (*Pseudosciaena ployactis* Bleeker). *Collections of marine fishery resource*. Beijing: China Agriculture Press, 1965, 84–108 [林新濯, 邓思明, 黄正一. 小黄鱼种族生物测定学的研究. 见: *海洋渔业资源论文选集*. 北京: 农业出版社, 1965: 84–108]
- Liu XS. Small yellow croaker. *Fishery Bureau of Ministry of Agriculture, ed. Investigation and division of fisheries resource of the Bohai and Yellow Sea*. Beijing: Ocean Press, 1990: 191–200 [刘效舜. 小黄鱼. 农牧渔业部水产局, 农业部黄海区渔业指挥部. *黄渤海渔业资源调查与区划*. 北京: 海洋出版社, 1990: 191–200]
- 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*, 2011, 435(8): 209–224
- Richard J, Pruell, Bryan K, *et al.* Spatial and temporal trends in stable carbon and oxygen isotope ratios of juvenile winter flounder otoliths. *Environmental Biology of Fishes*, 2012, 93(1): 61–71
- Rooker JR, Secor DH. Stock structure and mixing of Atlantic Bluefin tuna: Evidence from stable $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{18}\text{O}$ isotopes in otolith. *Collective Volume of Scientific Papers*, 2004, 56(3): 1115–1120
- Rooker JR, Secor DH, De MG, *et al.* Natal homing and connectivity in Atlantic bluefin tuna populations. *Science*, 2008, 322(5902): 742–744
- Schwarz 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(8): 1798–1806
- Shen GY, Shi BZ. *Marine ecology*. Beijing: Science Press, 2002 [沈国英, 施并章. *海洋生态学*. 北京: 科学出版社, 2002]
- Sherwood GD, Rose GA. Influence of swimming form on otolith delta C-13 in marine fish. *Marine Ecology Progress Series*, 2003(258): 283–289
- Shiao JC, Wang SW, Yokawa K, *et al.* Natal origin of Pacific bluefin tuna *Thunnus orientalis* inferred from otolith oxygen isotope composition. *Marine Ecology Progress Series*, 2010, 420(6): 207–219
- Tang QS. *Regional Oceanography of China Seas-Fisheries Oceanography*. Beijing: Ocean Press, 2012: 176–182 [唐启升. *中国区域海洋学—渔业海洋学*. 北京: 海洋出版社, 2012: 176–182]

- Thorrold SR, Latkoczy C, Swart PK, *et al.* Natal homing in a marine fish metapopulation. *Science*, 2001, 291(5502): 297–299
- Wang YK, Huang JS, Dai FQ, *et al.* Insights into population structure of juvenile small yellow croaker (*Larimichthys polyactis*) in the Yellow Sea and the Bohai Sea from otolith elemental fingerprints. *Acta Oceanologica Sinica*, 2016, 38(6): 32–40 [王玉堃, 黄建生, 戴芳群, 等. 黄、渤海小黄鱼耳石元素指纹分析及其在种群补充群体识别中的应用. *海洋学报*, 2016, 38(6): 32–40]
- Wang YK, Huang JS, Tang XX, *et al.* Stable isotopic composition of otoliths in identification of stock structure of small yellow croaker (*Larimichthys polyactis*) in China. *Acta Oceanologica Sinica*, 2016, 35(6): 29–33
- Xie LF, Fu XK. Parent breeding technology of small yellow croaker. *China Fisheries*, 2006(1): 50–51 [谢立峰, 付贤康. 小黄鱼亲体培育技术. *中国水产*, 2006(1): 50–51]
- Xiong Y, Zheng YJ, Tang JH, *et al.* Advances in survey methods for population identification in marine fishes and their application to small yellow croaker (*Larimichthys polyactis*). *Marine Fisheries*, 2018(1): 117–128 [熊瑛, 郑元甲, 汤建华, 等. 海洋鱼类种群划分的研究方法及其在小黄鱼上的应用进展. *海洋渔业*, 2018(1): 117–128]
- Xu ZL, Chen JJ. Discuss the problem of population division of small yellow croaker off the coast of China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2010, 21(11): 2856–2864 [徐兆礼, 陈佳杰. 再议中国近海小黄鱼种群的划分问题. *应用生态学报*, 2010, 21(11): 2856–2864]
- Yan LP, Liu ZL, Zhang H, *et al.* On the evolution of biological characteristics and resources of small yellow croaker. *Marine Fisheries*, 2014, 36(6): 481–488 [严利平, 刘尊雷, 张辉, 等. 小黄鱼生物学特征与资源数量的演变. *海洋渔业*, 2014, 36(6): 481–488]
- Ye CC. Small yellow croaker. *Marine fishery biology*. Beijing: China Agricultural Press, 1991: 164–200 [叶昌臣. *海洋渔业生物学*. 北京: 农业出版社, 1991: 164–200]
- Yu LF, Cheng JH. Small yellow croaker. The biological resources and environment in continental shelf of the East China Sea. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 2003: 472–488 [俞连福, 程家骅. 小黄鱼. 东海大陆架生物资源与环境. 上海: 上海科学技术出版社, 2003: 472–488]
- Zheng YJ, Chen XZ, Cheng JH, *et al.* The biological resources and environment in continental shelf of the East China Sea. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 2003: 472–488 [郑元甲, 陈雪忠, 程家骅, 等. 东海大陆架生物资源与环境. 上海: 上海科学技术出版社, 2003: 472–488]
- Zhang GZ, Li XS, Zhu JC, *et al.* study on the growth characteristics of juvenile yellow croakers in the Middle and southern Yellow Sea. *Progress in Fishery Sciences*, 2010, 31(3): 15–22 [张国政, 李显森, 朱建成, 等. 黄海中南部小黄鱼当年幼鱼生长特征的研究. *渔业科学进展*, 2010, 31(3): 15–22]
- Zhang QH, Cheng JH, Xu HX, *et al.* Sustainable utilization of fishery resource in the East China Sea. Shanghai: Fudan University Press, 2007: 170–182 [张秋华, 程家骅, 徐汉祥, 等. 东海区渔业资源及其可持续利用. 上海: 复旦大学出版社, 2007, 170–182]
- Zhao CY. Marine fishery resource in China. Hangzhou: Zhejiang Science and Technology Press, 1990, 45–48 [赵传纲. 中国海洋渔业资源. 杭州: 浙江科学技术出版社, 1990, 45–48]

(编辑 江润林)

Investigating the Population Structure of *Larimichthys polyactis* from the Yellow Sea and Bohai Sea Using Stable Isotope Mass Spectrometry

YUAN Wei^{1,3}, WANG Yukun³, ZHANG Tingting³, JIN Xianshi^{2,3}, SUN Yao^{2,3}①

(1. Wuxi Fisheries College, Nanjing Agricultural University, Wuxi 214081; 2. Laboratory for Marine Fisheries Science and Food Production Processes, Pilot National Laboratory for Marine Science and Technology (Qingdao), Qingdao 266071; 3. Yellow Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Key Laboratory of Sustainable Development of Marine Fisheries, Ministry of Agriculture and Rural Affairs; Shandong Provincial Key Laboratory of Fishery Resources and Eco-Environment, Qingdao 266071)

Abstract The issue of population division of the small yellow croaker (*Larimichthys polyactis*) has been controversial since the 1950s. Previously used methods for studying the population classification of these marine fish populations include the mark-recapture method, catch yield statistics method, parasite labeling method, morphometric/meristic characters method, molecular biology method, and chemical fingerprints of the calcified structures method. Each of these techniques has its own reliability as well as limitations. In this study, the content of delta ^{13}C ($\delta^{13}\text{C}$) and delta ^{18}O ($\delta^{18}\text{O}$) in the left sagittal otolith samples of 92 *Larimichthys polyactis* obtained from the investigation of fishery resources in Bohai Sea and Yellow Sea, was determined using stable isotope mass spectrometry. A cluster analysis was carried out based on differences in the content of delta ^{13}C and delta ^{18}O among samples. The results showed that the early supplement population of *Larimichthys polyactis*, predominant during the autumn season, in the Yellow Sea and Bohai Sea can be divided into four major groups, which are listed as Bohai and the northern Yellow Sea population, the central Yellow Sea population, the offshore population of southern Yellow Sea, and the coastal population of southern Yellow Sea. However, there was no station between the offshore population of the southern Yellow Sea and the three other populations in the Yellow and Bohai Sea. The discriminant and cluster analysis revealed that the successful rate of discrimination was 75.9%, 80.0%, 81.0%, and 95.6% in the Bohai and northern Yellow Sea population, the central Yellow Sea population, the offshore population of southern Yellow Sea, and the coastal population of southern Yellow Sea, respectively. The overall successful rate of discrimination was recorded to be 82.6%. The population of southern Yellow Sea was subdivided into offshore and coastal populations for the first time, and no station crossing between the two populations was recorded. With this study, we propose to establish the basis for population classification of *Larimichthys polyactis*.

Key words Otolith; $\delta^{13}\text{C}$; $\delta^{18}\text{O}$; *Larimichthys polyactis*; Population classification

① Corresponding author: SUN Yao, E-mail: sunyao@ysfri.ac.cn