

许永久, 唐心悦, 严小军, 等. 基于耳石微化学的东海大黄鱼洄游路线推测[J]. 海洋学报, 2023, 45(9): 128–140. doi:10.12284/hyxb2023126
Xu Yongjiu, Tang Xinyue, Yan Xiaojun, et al. Speculation of migration routes of *Larimichthys crocea* in the East China Sea based on otolith microchemistry[J]. Haiyang Xuebao, 2023, 45(9): 128–140. doi:10.12284/hyxb2023126

基于耳石微化学的东海大黄鱼洄游路线推测

许永久^{1,2}, 唐心悦¹, 严小军^{2*}, 宋伟华², 周永东³, 张洪亮³,
蒋日进³, 杨健⁴, 姜涛⁴

(1. 浙江海洋大学 水产学院, 浙江 舟山 316022; 2. 浙江海洋大学 国家海洋设施养殖工程技术研究中心, 浙江 舟山 316022; 3. 浙江省海洋水产研究所, 浙江 舟山 316021; 4. 中国水产科学研究院淡水渔业研究中心, 江苏 无锡 214128)

摘要:近年来, 东海频现对大黄鱼 (*Larimichthys crocea*) 大网捕获 (吨级规模以上), 引起了对衰退中的野生大黄鱼资源保护的担忧。为查明东海野生大黄鱼洄游规律, 本文根据 2020–2022 年在浙江近海产卵场和外海越冬场采集的不同批次野生大黄鱼样本, 利用激光剥蚀电感耦合等离子体质谱法 (LA-ICP-MS) 测定耳石微化学元素, 结合聚类分析和主成分分析 (PCA), 对不同大黄鱼群体进行了划分, 结合耳石的年轮特征, 研究大黄鱼群体的栖息生境, 推测大黄鱼洄游路线。结果表明, $Ba/Ca \leq 0.0042$ 时可以判定为海洋栖息生境, $Ba/Ca \geq 0.0081$ 时可以判定为河口栖息生境, $0.0042 < Ba/Ca < 0.0081$ 时可以判定为混合栖息生境。根据该阈值范围, 判定本次采样的大黄鱼的 5 种生境类型: (1) 近海产卵, 近海混合水域短暂栖息类型 (占 22.2%); (2) 近海产卵, 阶段性往复混合生境栖息类型 (占 15.6%); (3) 近海产卵, 河口水域育幼索饵, 外海越冬栖息类型 (31.1%); (4) 河口产卵、混合水域育幼, 外海越冬栖息类型 (6.7%); (5) 近海混合水域短暂产卵, 绝大部分时间海洋生境栖息类型 (24.4%)。对所有样本的 Ba/Ca 核心、峰值和边缘值进行 PCA, 5 种栖息类型的样本均匀分布在第一轴的两侧, 大部分时间都在海洋生境中的 G1、G2 和 G5, 以及受陆源影响较大的 G3 和 G4。同时, PCA 结果同时也显示, 5 种类型样本均会近同步地在近海岛礁处出现, 这表明外海、近海和河口的群体由于洄游等因素的影响会出现混合, 说明了舟山岛礁水域对大黄鱼产卵育幼的重要性。本研究为东海大黄鱼近海产卵场、索饵场和外海越冬场之间洄游履历, 以及大黄鱼洄游路线推测提供一定依据。

关键词: 大黄鱼; 洄游路线; 耳石; 微化学; 浙江近海; 外海越冬场

中图分类号: P722.6; S937.3

文献标志码: A

文章编号: 0253-4193(2023)09-0128-13

1 引言

大黄鱼 (*Larimichthys crocea*) 是我国近海最重要经济鱼种之一, 享有“国鱼”之称, 历史上以舟山渔场及其毗邻海域的岱衢族大黄鱼产量最高, 但由于 20 世纪 60–70 年代的过度捕捞 (敲罟作业、捕捞进港

鱼和对越冬场鱼群的捕捞), 最终在 20 世纪 80 年代的中后期, 大黄鱼资源衰退, 至今难以形成鱼汛^[1], 2016 年国际自然保护联盟濒危物种红色名录 (IUCN Red List) 将其列入极危状态 (CR)。近年来, 随着国家对海洋渔业资源环境的保护和大黄鱼增殖放流, 大黄鱼野生资源似乎有恢复迹象。尤其是 2020–2022 年,

收稿日期: 2023-04-08; 修订日期: 2023-07-31。

基金项目: 浙江省重点研发计划 (2020C02004); 浙江省自然科学基金 (LY20C030004)。

作者简介: 许永久 (1981—), 男, 湖北省钟祥市人, 副教授, 从事渔业资源和渔业生态方面研究。E-mail: xuyongjiu@zjou.edu.cn

* 通信作者: 严小军, 研究员, 从事渔业资源和海洋生物方面研究。E-mail: yanxj@zjou.edu.cn

大黄鱼大网捕捞(单网次产量一般达到吨级以上)现象频现传统的越冬场(图 1a), 其市场售价之高引起了广泛关注^[2-3], 同时也引起了专家对大黄鱼资源保护的担忧。同样在舟山岛礁附近, 常年聚集大量海钓渔船钓捕大黄鱼, 引起了行业部门和渔业部门的关注^[2-3]。由于缺少数据, 目前大黄鱼的资源分布与洄游规律, 极少为人所知。而传统的三场一通道及洄游规律, 主要是由捕捞产量推测而来(图 1b), 符合产量较大、渔业资源丰富时鱼群的洄游规律^[4-7]。当前的大黄鱼资源经历了严重的衰退, 种群规模较小, 分布

规律可能已经发生了变化, 根据 20 世纪 90 年代以来出现的大网报道, 可以发现, 大网捕捞基本都发生在毗邻长江口的舟山渔场、长江口渔场、舟外渔场以及江外渔场(图 1a), 而在浙江中南部海域基本没有相关的报道, 这可能说明大黄鱼资源在衰退后, 趋向于选择合适的水域与最佳的洄游路线, 来适应环境变化或人为活动的影响。当前的三场一通道是否已经发生变化? 近几年(2020–2023 年)的集群捕捞群体在时空上有没有关联? 厘清这些问题对于大黄鱼洄游路线及资源保护具有重要意义。

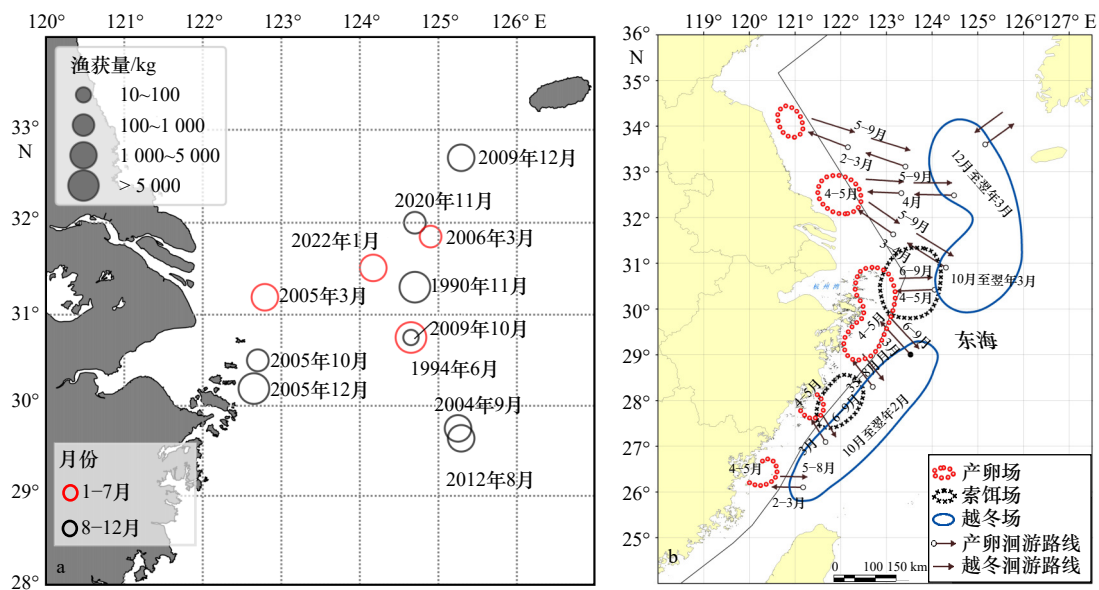


图 1 20 世纪 90 年代至今的大网捕捞大黄鱼(a)和历史上的大黄鱼三场一通道(b)^[5,7]

Fig. 1 Big catch of *Larimichthys crocea* since 1990s (a) and spawning, feeding and wintering ground and the route (b)^[5,7]

鱼类耳石微化学分析主要通过通过对整体耳石或特定区域的微量元素进行分析, 从而揭示鱼类整个生活史或特定生活阶段所经历的环境特征, 主要包括 Sr/Ca、Ba/Ca 及其他微量元素。Sr/Ca 作为一个重要的指标主要基于耳石中 Sr/Ca 与水中 Sr/Ca 呈正相关这一基础分析鱼类的洄游履历^[8], 该指标对于跨较大盐度梯度的洄游鱼类群体能够有效区分^[9]。Ba 元素相对 Sr 元素更易受到环境的影响, 且 Ba/Ca 与水体中的盐度一般负相关, 可以有效地区分淡水、海水鱼类群体^[10-13]。激光剥蚀电感等离子质谱法(LA-ICP-MS)是一种灵活的耳石成分分析技术, 不但可以进行群体和栖息地的区分、产卵场的确认, 还能帮助了解鱼类整个生活史期间或特定生活阶段外界的环境变化情况、迁移路线等。

为此, 本文根据 2020–2022 年在近海产卵场和外海中央越冬场采集的珍贵大黄鱼样本, 利用 LA-ICP-

MS 方法, 通过测定耳石中各种微量化学元素(Sr、Ba、Ca)含量及其特定比值主成分分析(Principal Component Analysis, PCA), 研究元素比值分布变化与栖息生境的相关关系, 结合鉴定的年龄, 推测大黄鱼的洄游履历和路线。

2 材料与方法

2.1 材料来源

本次调查所用大黄鱼样本取自 2020–2022 年春季、秋季和冬季在舟山近海产卵场、索饵场以及外海越冬场的多个科学调查航次, 越冬场样本来自渔船大网头捕捞后购买所得(样品的具体时空信息见图 2、表 1, 其中红色站位靠近沿岸, 黄色站位靠近外海, 本文根据距离, 将其定义为近岸样品和外海样品)。大黄鱼样本在 -20℃ 冷冻保存在实验室内, 鱼体解冻后解剖取出耳石, 清除耳石表面的其他组织后, 于室

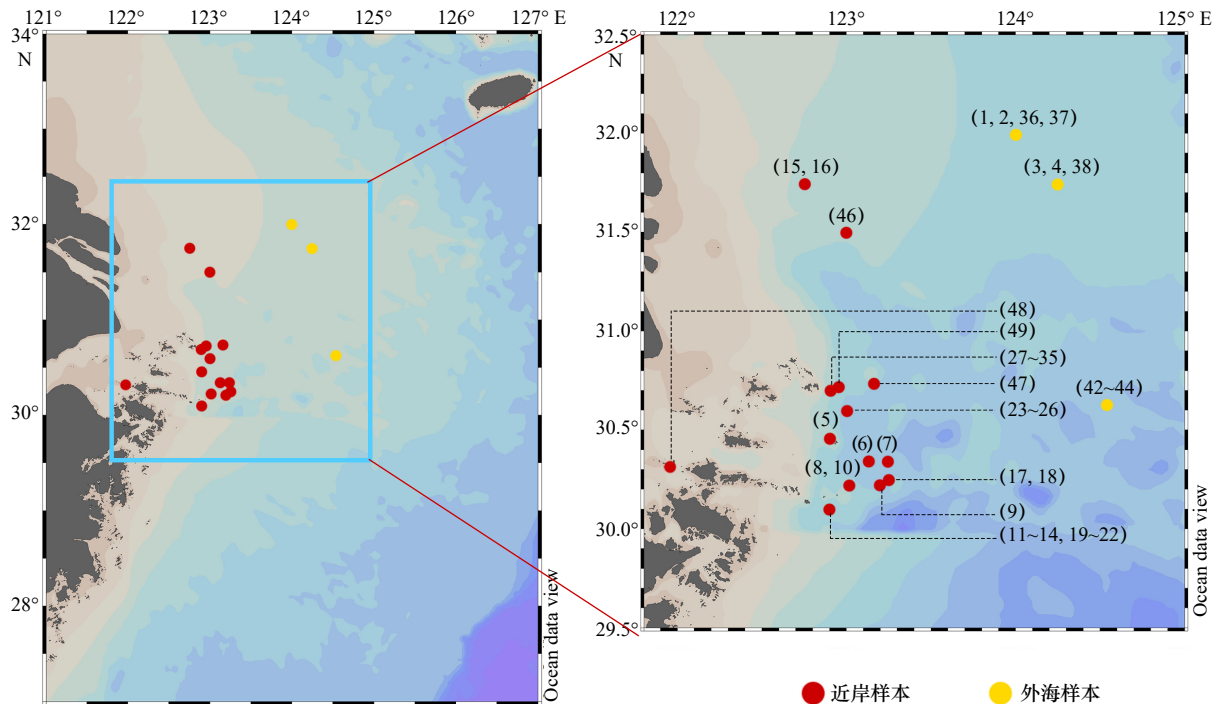


图 2 大黄鱼样品的采集站位

Fig. 2 The sampling stations of *Larimichthys crocea*

近岸和外海样本是指渔获来源地, 右图上的数字指样品编号, 根据测定的批次和时间顺序共同决定

Nearshore and offshore samples indicates sampling place, numbers in right figure indicates the sampling code, decided by the sequence of processing and sampling date

表 1 大黄鱼的样品采样信息

Table 1 Sampling details of *Larimichthys crocea* in the present study

年份	季节	样本数量	样本编号	体长范围/cm	体质量范围/g
2020	秋季	6*	1, 2, 23~26	29.7~33.4	334.7~437.4
2021	春季	1	46	30.5	427
2021	秋季	9	27~35	13.9~16.9	48.1~74.3
2022	春季	8*	19~22, 42~44, 48	13.3~27.0	30.5~109.1
2022	秋季	14	5~18	9.5~41.0	16.3~646.0
2022	冬季	7*	3~4, 36~38, 47, 49	25.0~44.8	234.8~1 144.3

注: *代表部分样本无体长、体质量数据。

温下干燥保存待用。

2.2 样品处理与分析方法

2.2.1 耳石样品处理

将耳石编号, 确定右侧耳石后, 统一用乙醇清洗, 并放入烘箱烘干。用环氧树脂胶将耳石包埋固定后, 放入烘箱 38℃ 过夜凝固。脱模后, 在耳石正上方写上耳石编号并用切割机 (Isomet 1000, 美国标乐公司) 沿横截面切下含有耳石核心的约 2 mm 的薄片并粘到载玻片上。在显微镜下找到大概轮廓, 依次使用 500 目、2 000 目和 4 000 目砂纸 (丹麦 Struers 公司) 进

行打磨并对照找核心和年轮, 重复进行至核心点即将暴露。换用装有机织布抛光盘的磨抛机 (Roto Pol-35, 丹麦 Struers 公司) 配合抛光液抛光至核心完全暴露且表面无明显刮痕。将处理完的耳石切片放入 MQ 水中超声清洗 5 min, 然后 38℃ 过夜烘干^[11]。

2.2.2 耳石年龄分析

大黄鱼耳石通常具有季节性变化的半透明和不透明区域, 同时根据耳石可以估计大黄鱼的年龄和成熟度^[11]。耳石经 4 000 目砂纸精磨后, 使用抛光盘配合抛光液抛光, 然后进行拍照 (Leica M205 A, Olympus

BX-51); 对于部分年轮不清晰的耳石使用 5% EDTA 反复酸蚀, 至年轮可读为止。本研究中大黄鱼年龄读取以年轮为标准, 即根据耳石冬环数量, 再加 1 年即为年龄。

2.2.3 耳石微量元素分析

耳石微量元素含量利用 LA-ICP-MS 在中国水产科学研究院淡水渔业研究中心耳石实验室进行测定, 主要测定元素为 Ca、Sr、Ba。激光剥蚀系统为 NWR213 (美国 New Wave 公司), ICP-MS 为 Agilent 7500ce ICPMS (美国安捷伦公司)。打点方式为从核心至边缘以 10 $\mu\text{m}/\text{s}$ 速率连续扫描, 分析至第 10 个样品重新对标样进行分析。以 NIST610、MACS-3 为标准样品, 并采用多外标和无内标法对元素摩尔浓度进行分析^[4]。图 3 中红色三角所示为耳石核心, 箭头所指为激光剥蚀方向和路径。

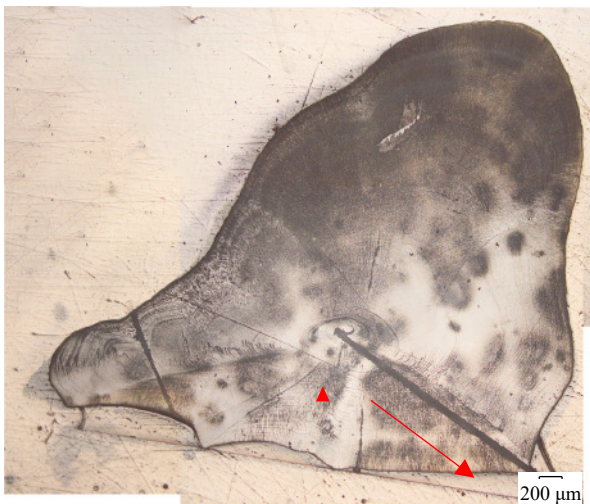


图 3 耳石测定分析示意图
Fig. 3 Schematic diagram for otolith determination and analysis

2.3 数据处理与统计分析

由于耳石中各元素含量远小于 Ca 含量, 按国际惯例将各元素比值标准化, 即统一用“(X 含量/Ca 含量) $\times 10^3$ ”表示 (简称 X/Ca 值, X 为各测定元素, 单位: mmol/mol)^[15]。元素按照每 4.35 μm 1 个点进行间隔分布, 为了消除异常值的影响, 元素比值按照二十检测点平滑后进行后续分析。

2.3.1 基于元素/Ca 的突变点分析的生境选择

根据大黄鱼历史捕捞资料推测^[2], 大黄鱼具有典型的河口-近海岛礁-外海的洄游特征 (图 1), 其在不同生活史阶段的环境特征差异明显, 利用贝叶斯突变点分析 (<https://github.com/zhaokg/Rbeast/tree/master/Matlab>) 检测耳石元素从核心到边缘分布中的突变过程及概率^[16], 从而推测在不同生境的转折点和阈值。

对于洄游性大黄鱼, 元素达到主峰 (最终的河口生境) 前, 需要经历多次突变。突变点分析可能会检测到多个转折点和峰值。检测到突变概率最高, 即可认为其对应的峰值为耳石元素分布的主峰, 主峰前、后依次对应突变概率次高值为突变次峰 (或突变点)。若突变概率相当, 则认为元素分布有两个以上的波峰。一般认为, 主峰前后突变点是进入最终河口生境阈值 (B_0) 的判断依据^[15], 可以依据二者的平均值推算, 进入河口的阈值 B_1 。依次类推主峰前第二个突变点、主峰后第二个突变点的平均值为河口海洋混合型生境的阈值 (B_2)。低于 B_2 即可认为生活在海洋生境中。

对于具有单峰型的洄游性鱼类群体, 以 Ba 元素为例, 耳石核心区到阈值 B_2 , 反映该样本的产卵场生境; 阈值 B_2 点到阈值 B_1 的均值, 反映该样本河口海洋混合履历; B_1 之后到峰值 B_0 , 反映河口洄游生境。对于无峰群体, 选取初始、中间以及最后边缘各 100 个测定点平均值分别代表核心区产卵生境、中间洄游生境以及捕捞地生境。对于两个以上的波峰群体, 按照上述方法取多个峰值的均值作为后面的计算依据。

2.3.2 大黄鱼耳石 Ba/Ca 分类指标及群体分组

根据总体样本的 Ba/Ca 值范围和分布谱的形状, 筛选 4 个特征: 波峰数、峰值位置、峰值强度和变异系数, 进行层次聚类分析。波峰数量分为单峰 (1) 或多峰 (2); 峰值位置位于核心 (1) 或中间 (2) 或边缘 (3); 峰值强度为峰值区间的平均值 μ ; 变异系数为峰值区间的标准偏差 $\text{std}/\text{平均值} \mu$ 。层次聚类分析选择连接函数为 ward 法, 距离为欧氏距离。根据样本聚类的组别, 按照 2.3.1 节的方法探究大黄鱼群体的生态分布模式。

2.3.3 大黄鱼 Ba/Ca 的主成分分析

利用 PCA 对所有样本 (单峰、多峰和无峰样本) 的 Ba/Ca 核心区、中间区和边缘区的平均值进行分析, 主要分析相同组样本, 不同生境栖息阶段的关联性, 研究越冬阶段、产卵阶段、近海滞留阶段之间的关联性。对不同季节、不同地理区位样品的 Ba/Ca 的不同阶段进行 PCA, 结合区位和季节变化进行综合分析, 为洄游履历的推测提供依据。

3 结果

3.1 耳石主要微量元素变化

本次采样共计 45 个大黄鱼耳石样本, 指标计算采用的均为捕捞的成体大黄鱼。根据计算, Sr/Ca 的范围为 0.67~7.28 mmol/mol [均值 \pm 标准差 (后同)]: (2.36 \pm

0.56) mmol/mol]; Ba/Ca 范围为 $1.06 \times 10^{-4} \sim 0.09$ mmol/mol [$(4.76 \times 10^{-3} \pm 0.01)$ mmol/mol]; 而 Mg/Ca 和 Mn/Ca 分别为 $0.01 \sim 3.46$ mmol/mol [(0.08 ± 0.06) mmol/mol] 和 $4.49 \times 10^{-5} \sim 0.15$ mmol/mol [(0.01 ± 0.01) mmol/mol]。耳石的 Ba/Ca 从核心到边缘分布的变异程度最大,

Mg/Ca 和 Mn/Ca 次之, Sr/Ca 的变异程度最小(表 2, 已取近似)。根据大黄鱼洄游的特点, 最终确定以河口—近海梯度变化较大的 Ba/Ca 值作为主要分析指标。

表 2 东海大黄鱼耳石 Mg、Mn、Sr、Ba 4 种元素的变异程度

Table 2 Degree of variations of Mg, Mn, Sr, Ba in the otoliths of *Larimichthys crocea* in the East China Sea

指标	均值/(mmol·mol ⁻¹)	标准差/(mmol·mol ⁻¹)	最小值/(mmol·mol ⁻¹)	中位数/(mmol·mol ⁻¹)	最大值/(mmol·mol ⁻¹)	变异系数/%
Sr/Ca	2.36	0.56	0.67	2.28	7.28	23.50
Ba/Ca	4.76×10^{-3}	0.01	1.06×10^{-4}	3.4×10^{-3}	0.09	112.05
Mg/Ca	0.08	0.06	0.01	0.06	3.46	86.42
Mn/Ca	0.01	0.01	4.49×10^{-5}	0.01	0.15	75.72

3.2 大黄鱼群体 5 个组 Ba/Ca 分布

本次所选择的 45 尾大黄鱼耳石样本中, 根据耳石 Ba/Ca 的分布峰强度、位置等聚类, 分为 5 个组(图 4)。组 1(G1) 占有所有样本数量的 22.2%, 10 个样本的耳石径上 Ba/Ca 平均值分布均呈现低值单峰 (<0.007 mmol/mol), 单峰在耳石中出现的距离为 1 200~1 400 μm , 直方图显示, 样本值以 0.003 mmol/mol 为中心值(图 5a)的近似正态分布, 样品的平均变异程度较小, 为 48.12%(表 3); 组 2(G2) 占 15.6%, 7 个样本的耳石径上平均值分布均无显著突变峰, 仅有数量多的低峰, 峰值低 (<0.005 mmol/mol), Ba/Ca 样本值的直方图表明, 分布较为均匀, 集中出现在 0.003 5 mmol/mol 左右, 正态分布不明显, 且离散程度小(图 5b), 样本平均变异程度为 42.15%(表 3)。组 3(G3) 占 31.1%,

是本次的主要分布形式, 14 个样本的耳石径上 Ba/Ca 分布呈现显著峰值, 出现在距离核心的 600~1 000 μm 处, 且峰值较高 (0.012~0.015 mmol/mol), 其直方图显示, 集中出现在以 0.003 mmol/mol 和 0.014 mmol/mol 为双中心的正态分布(图 5c), 样本的变异程度相对较大, 为 84.88%(表 3)。组 4(G4) 仅 3 个样本, 占比 6.7%, 元素 Ba/Ca 的峰值出现在耳石的核心处, 且从耳石核心到边缘呈下降趋势。直方图显示, Ba/Ca 值集中出现在低值区, 呈现以 0.003 为中心的近似正态分布(图 5d)。

3.3 Ba/Ca 突变点及对应阈值

利用贝叶斯突变点分析, 对典型代表 G3 进行 Ba/Ca 从核心到边缘的突变分析, 得到概率最高的为 870 μm 前的突变点, 突变概率 50% 左右(图 6), 其

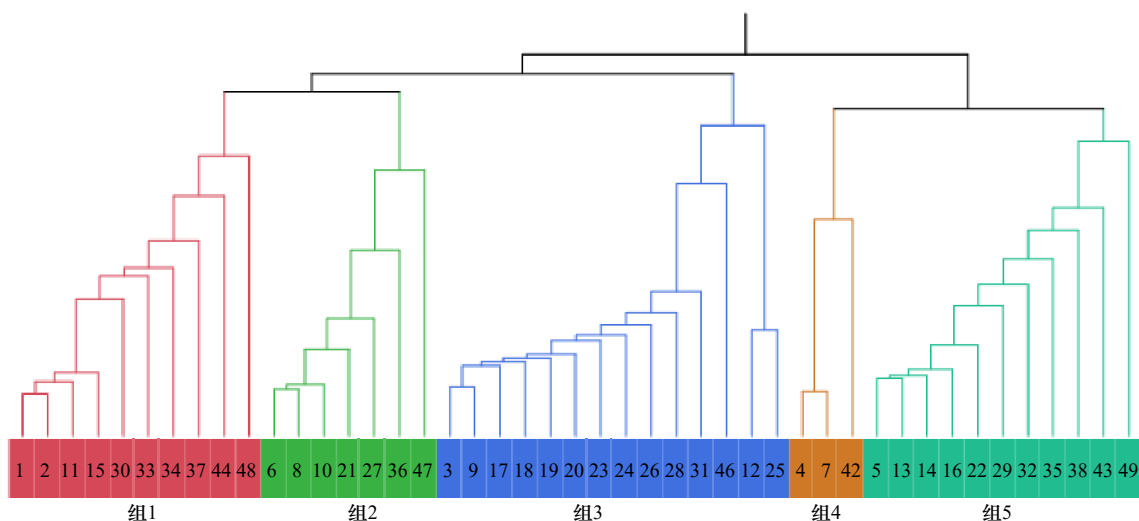


图 4 样本聚类图(数字表示样品编号)

Fig. 4 Hierarchical clustering of samples (numbers indicate sample code)

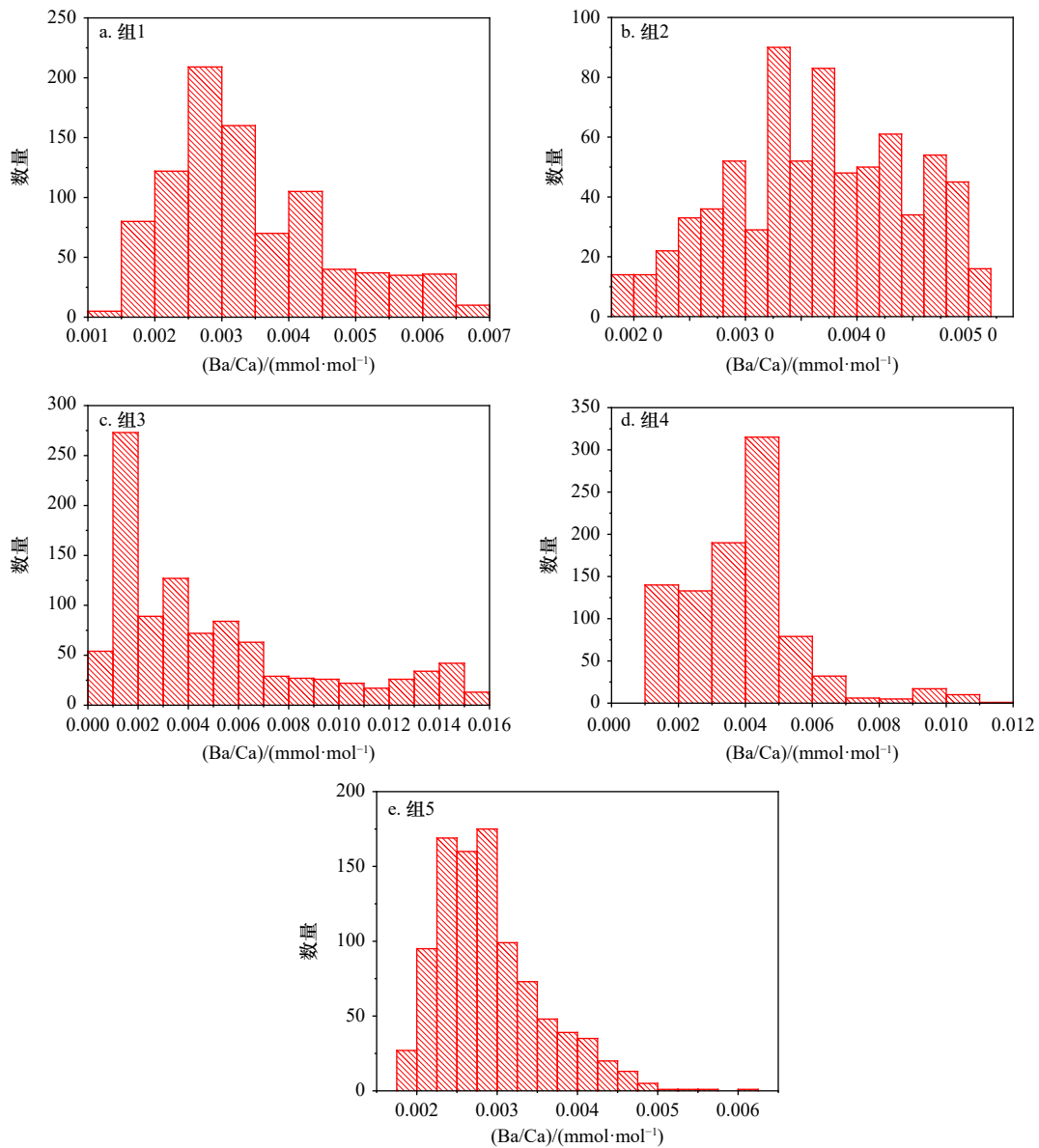


图5 耳石中 Ba/Ca 值的分布直方图

Fig. 5 Groups histogram distribution of Ba/Ca value in otolith

表3 4个组群 Ba/Ca 的变异程度

Table 3 Variation degree of Ba/Ca in four groups

分组	均值/(mmol mol ⁻¹)	标准差/(mmol mol ⁻¹)	变异系数/%
G1	3.85×10^{-3}	1.88×10^{-3}	48.12
G2	3.83×10^{-3}	1.6×10^{-3}	42.15
G3	7.4×10^{-3}	6.38×10^{-3}	84.88
G4	3.2×10^{-3}	2.25×10^{-3}	55.31
G5	3.36×10^{-3}	1.21×10^{-3}	38.33

对应的峰值强度为 0.015 mmol/mol。该峰值前突变点所对应的峰强度为 0.013 mmol/mol 左右, 且突变概率为 10%, 小于在此之前的突变概率, 因此此类的

主峰前后突变概率不大 (< 20%), 峰值强度接近判定为同一阶段。据此认为, 主峰值区前后变化的 3 个阶段 (图 6): 峰值段 (0 阶段, 红色区间), 前后第一突变阶段 (1 阶段, 蓝色区间), 前后第二突变阶段 (2 阶段, 绿色区间)。根据每个阶段的平均值, 可以得到 B_1 的阈值。 B_1 前 = 0.0085 mmol/mol; B_1 后 = 0.0076 mmol/mol 和 0.0082 mmol/mol。最终的 B_1 计算为

$$B_1 = \frac{(0.0085 + 0.0076 + 0.0082)}{3} = 0.0081. \quad (1)$$

B_2 前 = 0.0035 和 0.0046; B_2 后 = 0.0048 和 0.004, 最终的 B_2 计算为

$$B_2 = \frac{(0.0035 + 0.0046 + 0.0048 + 0.004)}{4} = 0.0042. \quad (2)$$

因此, 根据上述的两个阈值 B_1 和 B_2 。当 $Ba/Ca \geq$

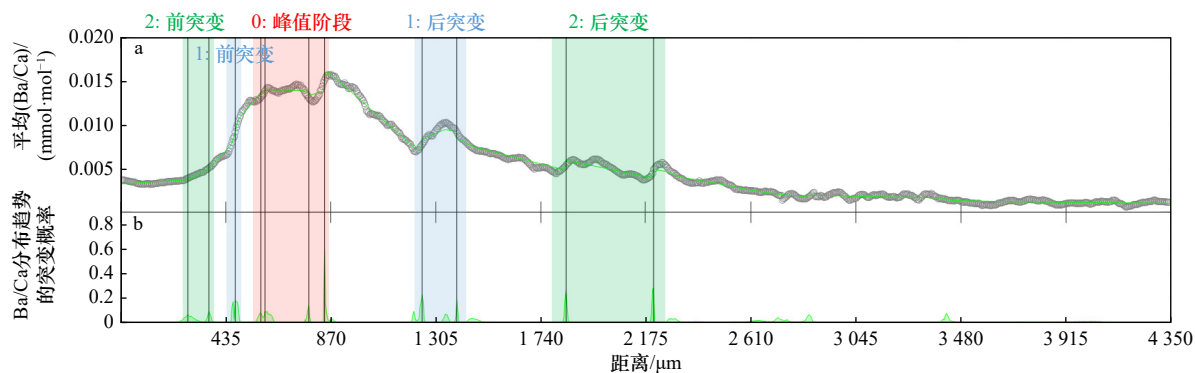


图 6 G3 所有样本耳石平均 Ba/Ca(a) 及突变概率(b)

Fig. 6 Average of Ba/Ca (a) and its trend change probability (b) in G3 otolith samples

黑圈状折线为 G3 从耳石核心至边缘的 Ba/Ca 分布, 绿色线为概率, 红色、蓝色和绿色阴影区分别表示 0 峰值阶段, 前后第一次突变, 前后第二次突变对应的折线

Black circle line indicate Ba/Ca curve from otolith core to edge in G3, green line indicate probability, red, blue and green shade indicates peak, first trend change point lines, and second change point lines

0.008 1 时, 即认为大黄鱼进入河口生境; $0.004 2 < \text{Ba/Ca} < 0.008 1$ 为进入河口海洋混合区生境, $\text{Ba/Ca} \leq 0.004 2$ 为进入海洋生境。

3.4 大黄鱼栖息生境分区

根据 Ba/Ca 突变点分析判定的生境阈值, 绘制 5 个组的分布图, 得到各组在不同耳石生长阶段的生境履历。(1) 近海产卵, 近海混合水域短暂栖息类型 (占 22.2%, 图 7a); (2) 近海产卵, 阶段性往复混合生境栖息类型 (占 15.6%, 图 7b); (3) 近海产卵, 河口水域育幼索饵, 外海越冬栖息类型 (31.1%, 图 7c); (4) 河口产卵、混合水域育幼, 外海越冬栖息类型 (6.7%, 图 7d); (5) 近海混合水域短暂产卵, 绝大部分时间海洋生境栖息类型 (24.4%, 图 7e)。5 个组中, G1、G2 和 G3 3 个组均需要经历近海中产卵, 并且产卵后, 大都需要经历河口或岛礁混合水域育幼的经历 (图 5a, 图 5c)。产卵后, G1 和 G2 样本在岛礁混合水域等生境栖息时间较短, 而 G3 需要到河口生境育幼, 在河口等混合水域生境栖息时间较长。G4 有 3 个样本 (4、7 和 42 号样本), 在河口产卵, 岛礁混合水域育幼, 之后洄游到外海, 在岛礁混合水域栖息时间较长。G5 岛礁混合水域产卵后, 大部分时间在近海生境中栖息。

上述结果表明, 尽管大黄鱼群体具有多种栖息生境特征, 但都需要洄游至近海岛礁混合水域, 仅表现在洄游后在近海或河口生境所经历时间不同。

3.5 大黄鱼的耳石生长与年龄

Ba/Ca 分布匹配相应的年龄得到, 耳石年龄呈现明显的疏密相间的冬轮 (阴影区间) 和夏轮 (非阴影区) (图 8a 至图 8e), 夏轮明显要比冬轮宽, 表明大黄

鱼在春夏季生长较秋冬季快。G2、G3 和 G5 3 个组在海洋生境中产卵, 在 1 龄 (冬龄) 前, 耳石生长缓慢, 达到 400~500 μm 左右到 1 冬龄 (图 8b, 图 8c 和图 8e), 而产卵在河口或岛礁的 G1 和 G4 样本耳石生长较快, 到 1 龄时, 耳石生长到 1 600 μm 以上 (图 8a, 图 8d)。

G1 群体在近海岛礁生境产卵后, 即进入到河口岛礁等混合水域生长育幼, 成体后立即洄游至海洋生境中 (图 8a)。G2 群体产卵后, 在海洋生境中育幼到 1 龄后, 进入河口岛礁混合水域, 在海洋生境与岛礁生境中往复洄游, 直到 2 冬龄后洄游至近海海洋生境中越冬 (图 8b)。G3 群体, 产卵育幼在海洋生境中, 1 龄后, 快速进入河口岛礁水域继续生长发育。2 冬龄后, 进入近海海洋生境中越冬 (图 8c)。G4 群体, 在河口中产卵, 河口岛礁混合水域育幼, 生长较快, 1 冬龄后, 从岛礁混合水域洄游至近海生境越冬 (图 8d)。G5 在岛礁混合水域产卵, 但快速进入近海海洋生境, 生长较慢, 1 冬龄后, 该群体即在海洋生境中靠近岛礁的水域栖息较长时间, 生长较为迅速 (图 8e)。

3.6 大黄鱼耳石元素 PCA

对所有群体样本的 Ba/Ca 核心、中间和边缘区进行 PCA 表明, 5 组样本均匀分布在第一轴 (PC1) 的左右两侧: 大部分时间都在海洋生境中的 G1、G2 和 G5, 以及受陆源影响较大的 G3 和 G4 (图 9), PC1 解释了总变异的 48.18%。PC1 反映大黄鱼在河口生境的栖息时间和捕捞地生境, 即 G3 因为存在较高的 Ba/Ca 峰值, 在河口和混合生境中滞留时间较长, 大部分样本在轴的右侧 (大部分蓝色区域)。G1、G2 和 G5 由于没有峰值或峰值很小, 分布在 PC1 的左侧 (绿色、红色和黑色区域)。G4 在河口生境产卵, 稍后进

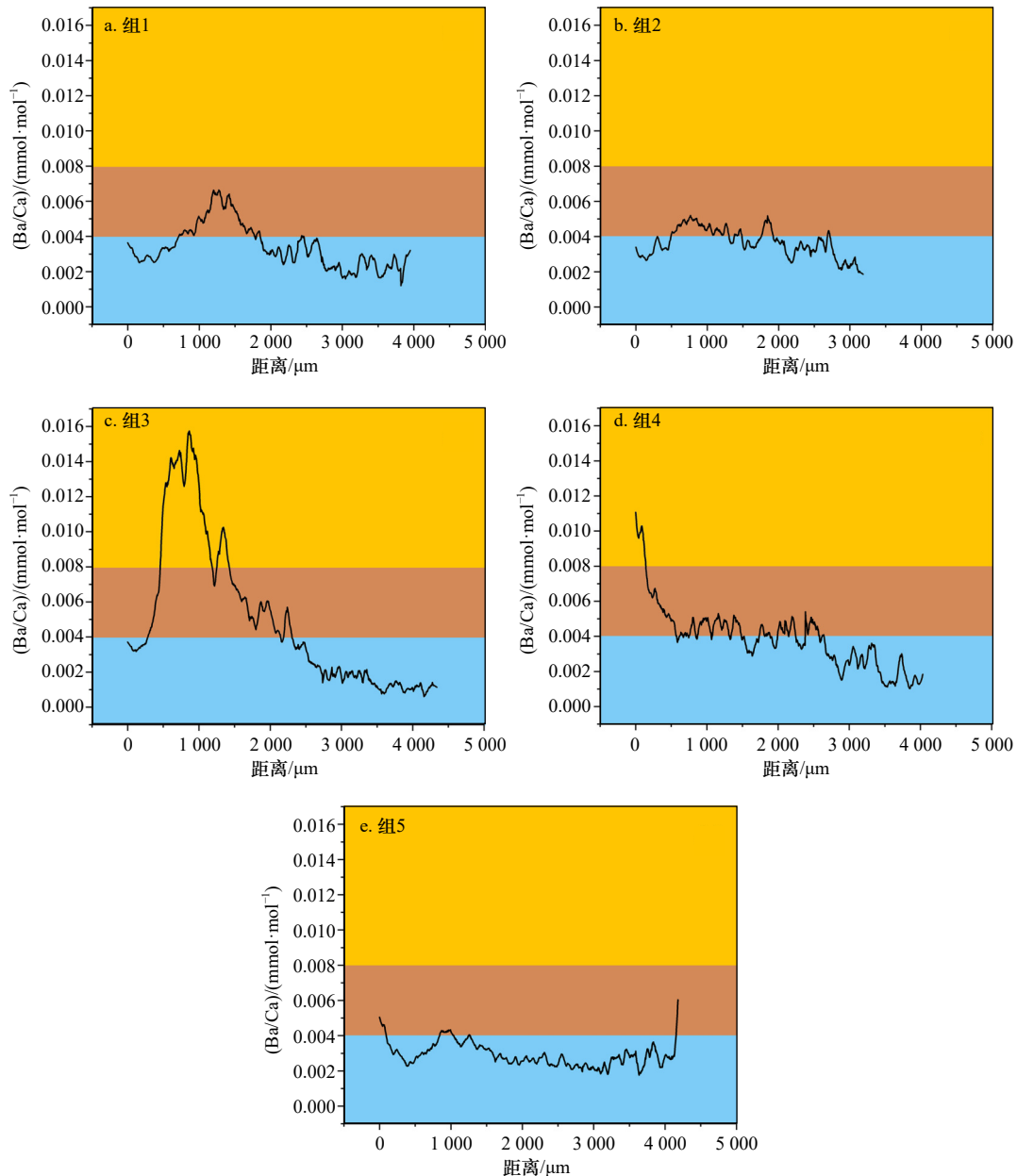


图7 大黄鱼5个群体的Ba/Ca值变化

Fig. 7 Changes of Ba/Ca values in five groups of *Larimichthys crocea*

蓝色、棕色和黄色分别表示海洋、混合和河口生境

Blue, brown and yellow indicates oceanic, mixed water and estuary conditions

入海洋生境中育幼, 滞留时间处于中间(青蓝色区域)。5个组属于不同的生境类型, 且以在河口生境栖息的G3为主。但G3部分样本出现PC1的左侧, 并与其他组的部分样本交叉, 提示5个组的部分样本洄游至近海岛礁混合水域, 发生群体混合时被捕捞。PC2反映了产卵场的生境, 解释了总变异的34.95%, G4在河口生境产卵, 核心区Ba/Ca高, 分布在第二轴(PC2)的上侧, 而G1、G2和G5在海洋生境中产卵, 分布在下侧, G3处于中间, 产卵生境中也存在混合水域, 处于5个组的上下交汇区域(图9a)。

对代表性样本的PCA及其季节、地理区位变化表明, 耳石Ba/Ca的核心、峰值和边缘分布并不能很好地区分样品的地理区位和季节变化, 说明尽管捕捞地不同, 其核心Ba/Ca的来源地及时间可能相同, 反之亦然。PC1反映了产卵生境, 解释了总方差变异的39%。PC1说明, 东北方向外海区和岛礁近海部分样品的产卵场存在差异, 部分样本的产卵生境混合在一起(图9b)。PC2反映了河口生境滞留时间和捕捞生境, 解释了总变异的34.7%。如图9b所示, 无论是上下的南北区(第一、第二和第三、第四象限)

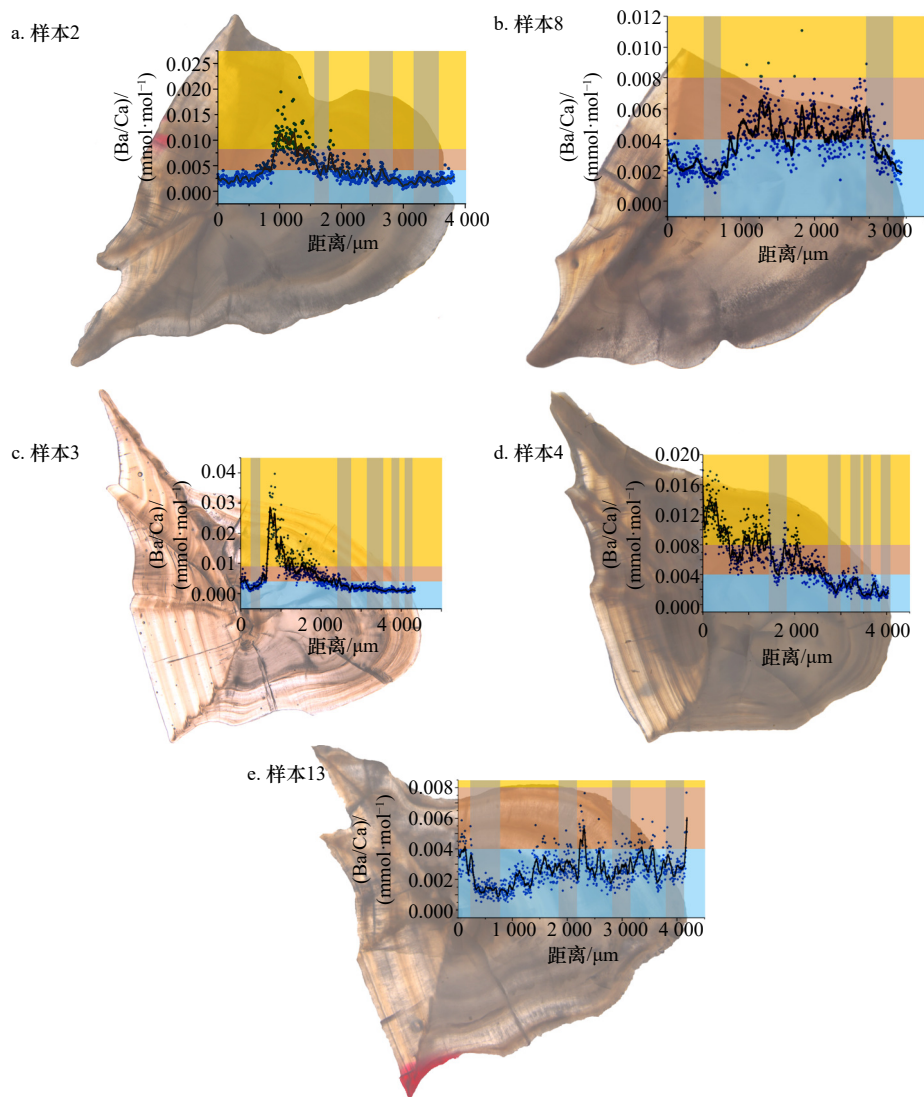


图 8 G1-G5 5 个代表性大黄鱼耳石的 Ba/Ca 轨迹

Fig. 8 Ba/Ca trajectories corresponding to the otoliths of Group 1 to Group 5 of *Larimichthys crocea*

灰色竖状阴影区为冬轮, 非阴影区为夏轮

Vertical grey shaded area indicates winter growth ring, non-shaded indicates summer growth ring

样本或是秋、冬季样本, 都没有显著的差异, 说明与东西相比, 南北的混合可能更加频繁。综合上述分析可知, 大黄鱼不同群体以偏向东北方向为主路径进行洄游。

4 讨论

4.1 大黄鱼群体生境类型划分

常见用于判定群体洄游履历的除了 Ba 还有 Sr, 熊瑛等^[10]根据 Sr/Ca 结果重建了吕四近岸小黄鱼的生境履历。Menezes 等^[17]、Zhang 等^[18]和 Tabouret 等^[19]根据 Sr/Ca 对中国近海的棘头梅童鱼 (*Collichthys lucidus*) 进行了群体分类。然而, 在本文所有样本中 Sr/Ca 值分布均不具有显著差异, 变异程度非常小, 不

能起到群体的区分作用, 且 Mg 和 Mn 很少用来识别和研究洄游履历。本文根据耳石中 Ba/Ca 元素特征, 将大黄鱼群体分为 5 个组, 其中主要的依据是耳石样本 Ba/Ca 峰的次数、峰值强度、峰值出现位置及变异程度。耳石核心的微化学组成能够指示其孵化产卵场的环境, 按照耳石核心即为产卵场的推断, 本文除了 3 个样本 (G4: 4、7 和 42 号样本) 在河口产卵外, 仍有部分样本 (G5 的 11 个样本) 在岛礁混合水域产卵, 除此之外, 大部分样本均在近海毗邻海域产卵 (占总样本的 69%), 大部分样本 (除 G5 部分样本) 需要洄游到河口育幼, 一般而言, 河口附近饵料丰富, 大部分仔鱼和幼鱼在河口索饵会加速生长, 同时河口具有较高的浑浊度, 仔幼鱼可以躲避敌害。本文有少部分样本

(40%)除短暂到近海岛礁洄游外,大部分时间在海洋生境栖息,这部分样本可能位于近海岛礁外侧海域,受台湾暖流的影响,所在生境呈现外海特点。

如上所述,图9a中PCA第一轴反映样本在河口或者海洋生境中滞留的时间,据此划分了5种不同的群体和洄游类型,说明了耳石微量元素(如Ba)是评

价大黄鱼群体对生境适应性的敏感指标。尽管各群体的洄游履历不同,但各组均在舟山近海岛礁区有交汇,说明各群体可能为同一个种群即岱衢大黄鱼(*Larimichthys crocea*),这一结果得到了本项目团队另一个重基因组结果(未发表)的支持。除了大部分大黄鱼群体具有近海产卵河口洄游履历外,也有其他洄

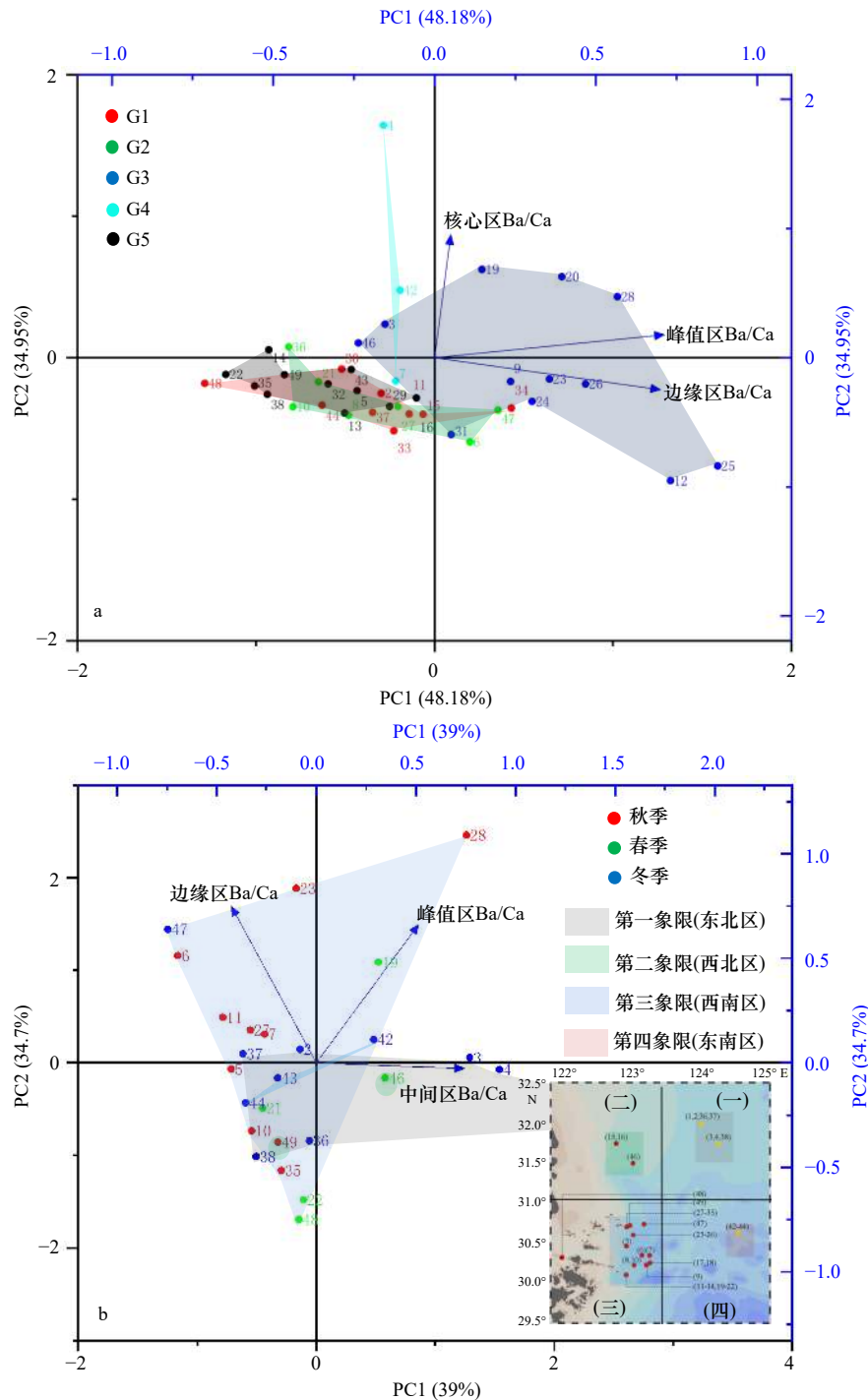


图9 45个样本的Ba/Ca核心区、中间区和边缘区的PCA(a)和代表性样本Ba/Ca的PCA与季节、地理变化(b)

Fig. 9 PCA of Ba/Ca core, intermediate and edge value (a) and PCA of the selected samples and its seasonal/geographical variation (b)

游履历,这可能有多种因素的影响。首先,近海岛礁环境复杂,锋面、潮汐均是影响仔鱼成功进入河口的关键因素,不排除少部分群体,受到海洋锋、洋流的不利方面影响,未能进入河口。这部分群体利用岛礁区丰富的饵料条件进行育幼,一旦条件合适,可能也会再次进入河口。与之对应,进入河口的群体,如果条件不合适也会被洋流等因素带出河口岛礁海域。此外,与绝大部分样本的产卵方式不同,本文中海外越冬场 G4(4 和 42 号)与近海的样本(7 号)在河口产卵,说明外海的群体中有部分来自于近海的增殖放流样本,该群体来自近岸孵化养殖群体。总之,大黄鱼群体存在 5 种栖息生境类型,既可能与岛礁栖息环境改变、洋流变化有关,亦可能受到增殖放流等人为条件的影响,是鱼类群体对生态环境的一种适应。

4.2 大黄鱼主要洄游路线推测

传统大黄鱼洄游路线主要根据不同月份的大黄鱼渔业捕捞产量重心进行推测,目前大黄鱼资源稀缺,上述方法基本不可能,本文根据耳石微量元素推测了大黄鱼的主要洄游路线。图 9b 的 PCA 结果显示了第三象限的岛礁区域是各群体的主要集聚区,大部分群体(包括放流群体)在近海(岛礁外侧)产卵孵化后,在岛礁附近逐渐育幼,长成具备游泳行为的仔鱼后,逐渐游到河口生境进一步育幼,成体后,再向海外洄游。少部分群体在近海产卵,不进入河口或者在岛礁附近短暂滞留育幼后,进入外海。这部分群体可以间断性往返于近海外海之间,而由于受暖流控制,微量元素不发生大的变化。

根据耳石微化学元素 PCA 分析结果及 3.1 节的论述,可以推测主要洄游路线(图 10)。主要洄游模

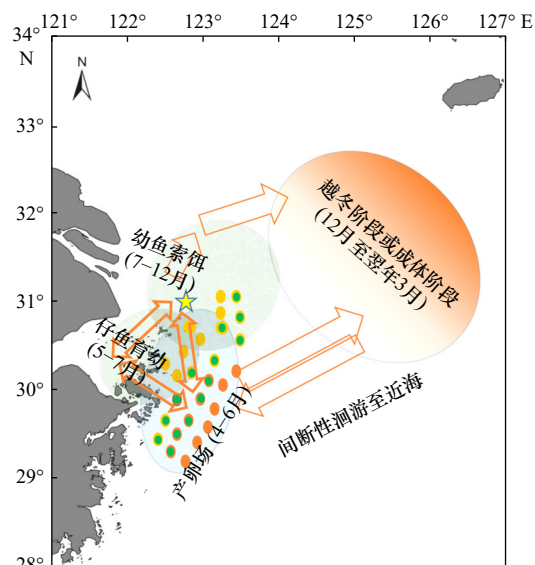


图 10 大黄鱼洄游路线推测

Fig. 10 The speculative migratory route of *Larimichthys crocea*

橘色点表示岛礁外侧产卵群体;黄色点表示岛礁区内近河口群体;绿色点表示混合群体

Orange dots indicate offshore spawning groups; yellow dots indicate nearshore-estuary groups; green dots indicate mixed groups

式(G1、G2、G3): 大黄鱼在岛礁附近产卵,稍高盐度刺激之后发育的仔稚鱼借助海洋锋或潮汐等物理因素,进入河口海湾,在此摄食丰富的饵料,以加速生长,完成育幼。待到幼鱼阶段时,可以在临近河口海域进行分散索饵或捕食索饵,待到长成后,随即进入海洋生境中。待到冬季,这部分群体洄游到外海越冬场,直到翌年春季再次洄游到近海产卵,完成整个生活史。

参考文献:

- [1] 李立华, 严小军, 王健鑫, 等. 浙江近海大黄鱼和带鱼产量的长期变化及资源评估: 基于历史统计数据[J]. 浙江海洋大学学报(自然科学版), 2022, 41(1): 63-69.
Li Lihua, Yan Xiaojun, Wang Jianxin, et al. Long-term change of yield and stock assessment of *Larimichthys crocea* and *Trichiurus lepturus* in Zhejiang coastal waters based on historical data[J]. Journal of Zhejiang Ocean University (Natural Science), 2022, 41(1): 63-69.
- [2] 王俊禄, 许舜达, 黄筱. 刚有所恢复的东海野生大黄鱼, 别又被捕“黄”了[EB/OL]. [2023-06-18]. <https://finance.sina.com.cn/jjxw/2022-01-28/doc-ikyakumy3063440.shtml?cref=cj>.
Wang Junlu, Xu Shunda, Huang Xiao. Do not let the shortly recovered wild yellow croakers in the East China Sea starting to get down[EB/OL]. [2023-06-18]. <https://finance.sina.com.cn/jjxw/2022-01-28/doc-ikyakumy3063440.shtml?cref=cj>.
- [3] 林上军, 王菲. 浙江舟山为保护区海钓管理立法[EB/OL]. [2023-06-18]. https://www.mnr.gov.cn/dt/hy/202303/t20230308_2777730.html.
Lin Shangjun, Wang Fei. Zhejiang Zhoushan make laws for sea fishing management in protected areas[EB/OL]. [2023-06-18]. https://www.mnr.gov.cn/dt/hy/202303/t20230308_2777730.html.
- [4] 杨德康, 林飞. 浙江北部近海大黄鱼生殖群体现状[J]. 浙江水产学院学报, 1988, 6(1): 73-77.
Yang Dekang, Lin Fei. On present conditions of the spawning population of *Pseudosciaena crocea* (Richardson) in the coastal waters of northern Zhejiang and suggestions about its fisheries management[J]. Journal of Zhejiang College of Fisheries, 1988, 6(1): 73-77.
- [5] 徐兆礼, 陈佳杰. 东黄海大黄鱼洄游路线的研究[J]. 水产学报, 2011, 35(3): 429-437.
Xu Zhaoli, Chen Jiajie. Analysis of migratory route of *Larimichthys crocea* in the East China Sea and Yellow Sea[J]. Journal of Fisheries

- of China, 2011, 35(3): 429–437.
- [6] 俞存根, 严小军, 蒋巧丽, 等. 东海岱衢族大黄鱼资源变动的的原因探析及重建策略[J]. 水产学报, 2022, 46(4): 616–625.
Yu Cungen, Yan Xiaojun, Jiang Qiaoli, et al. Cause analysis of resources change and reconstruction strategy of *Larimichthys crocea* Daiqu group in the East China Sea[J]. Journal of Fisheries of China, 2022, 46(4): 616–625.
- [7] 周永东, 李圣法. 东海区主要经济种类三场一通道及保护区图集[M]. 北京: 海洋出版社, 2018: 1–116.
Zhou Yongdong, Li Shengfa. Atlas of Three Fisheries Ground, One Migration Route and Protected Areas in the East China Sea[M]. Beijing: China Ocean Press, 2018: 1–116.
- [8] Secor D H, Rooker J R. Is otolith strontium a useful scalar of life cycles in estuarine fishes?[J]. Fisheries Research, 2000, 46(1/3): 359–371.
- [9] Walther B D, Thorrold S R. Water, not food, contributes the majority of strontium and barium deposited in the otoliths of a marine fish[J]. *Marine Ecology Progress Series*, 2006, 311: 125–130.
- [10] 熊瑛, 刘洪波, 汤建华, 等. 耳石微化学在海洋鱼类洄游类型和种群识别研究中的应用[J]. 生命科学, 2015, 27(7): 953–959.
Xiong Ying, Liu Hongbo, Tang Jianhua, et al. Application of otolith microchemistry on reconstruction of migratory patterns and stock discrimination in marine fishes[J]. *Chinese Bulletin of Life Sciences*, 2015, 27(7): 953–959.
- [11] 罗军燕, 李胜荣, 申俊峰. 鱼耳石中锶和钡富集的影响因素及其环境响应[J]. 地学前缘, 2008, 15(6): 18–24.
Luo Junyan, Li Shengrong, Shen Junfeng. The influential factors of strontium and barium enrichment in otolith and their response to the environment[J]. *Earth Science Frontiers*, 2008, 15(6): 18–24.
- [12] 黎雨轩, 徐浩, 张翼, 等. 环境因子对大黄鱼耳石钡元素富集的影响[J]. 海洋渔业, 2014, 36(5): 409–417.
Li Yuxuan, Xu Hao, Zhang Yi, et al. Effects of environmental factors on otolith Ba element incorporation in juvenile *Larimichthys crocea*[J]. *Marine Fisheries*, 2014, 36(5): 409–417.
- [13] 刘志远. 基于耳石形态及微结构特征的大黄鱼和小黄鱼早期生长发育研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2012.
Liu Zhiyuan. Early growth and development of big yellow croaker (*Larimichthys crocea*) and small yellow croaker (*Larimichthys polyactis*) based on morphological development and microstructure of otolith[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2012.
- [14] 林静远, 刘必林, 陈新军. 头足类角质颚微化学及其在渔业生态学中的应用研究进展[J]. 大连海洋大学学报, 2019, 34(2): 280–287.
Lin Jingyuan, Liu Bilin, Chen Xinjun. Advances on cephalopod beak microchemistry and its application in fishery ecology: a review[J]. *Journal of Dalian Ocean University*, 2019, 34(2): 280–287.
- [15] 熊瑛, 刘洪波, 刘培廷, 等. 基于耳石元素微化学的江苏吕泗近岸小黄鱼生境履历重建[J]. 应用生态学报, 2014, 25(3): 836–842.
Xiong Ying, Liu Hongbo, Liu Peiting, et al. Reconstructing habitat history of *Larimichthys polyactis* in Lüsi coastal waters of Jiangsu Province, China based on otolith microchemistry[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2014, 25(3): 836–842.
- [16] Zhao Kaiguang, Wulder M A, Hu Tongxi, et al. Detecting change-point, trend, and seasonality in satellite time series data to track abrupt changes and nonlinear dynamics: a Bayesian ensemble algorithm[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2019, 232: 111181.
- [17] Menezes R, Moura P E S, Santos A C A, et al. Habitat use plasticity by the dog snapper (*Lutjanus jocu*) across the Abrolhos Bank shelf, eastern Brazil, inferred from otolith chemistry[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2021, 263: 107637.
- [18] Zhang Shuai, Jiang Yan'e, Li Min, et al. Life history of spinyhead croaker *Collichthys lucidus* (Sciaenidae) differentiated among populations from Chinese coastal waters[J]. *Aquatic Biology*, 2022, 31: 65–76.
- [19] Tabouret H, Bareille G, Claverie F, et al. Simultaneous use of strontium: calcium and barium: calcium ratios in otoliths as markers of habitat: application to the European eel (*Anguilla anguilla*) in the Adour basin, south West France[J]. *Marine Environmental Research*, 2010, 70(1): 35–45.

Speculation of migration routes of *Larimichthys crocea* in the East China Sea based on otolith microchemistry

Xu Yongjiu^{1,2}, Tang Xinyue¹, Yan Xiaojun², Song Weihua², Zhou Yongdong³, Zhang Hongliang³,
Jiang Rijin³, Yang Jian⁴, Jiang Tao⁴

(1. School of Fisheries, Zhejiang Ocean University, Zhoushan 316022, China; 2. National Engineering Research Center For Marine Aquaculture, Zhejiang Ocean University, Zhoushan 316022, China; 3. Marine Fisheries Research Institute of Zhejiang, Zhoushan 316021, China; 4. Fresh Water Fisheries Research Center, Chinese Academy of Fishery Sciences, Wuxi 214128, China)

Abstract: In recent years, large yellow croaker (LYC) has been caught with high abundance in the East China Sea (ECS), which raises concerns about the conservation of LYC resources. We collected LYC samples from spawning grounds and wintering grounds in the offshore Zhejiang from 2020 to 2022. In order to find out the migration route

of LYC in the ECS, we made use of otolith microchemical elements by LA-ICP-MS analysis, combined with the clustering analysis and PCA of trace elements such as Ba/Ca, to classify different LYC groups. With the age characteristics of otolith, the habitat patterns of LYC group was studied, and the updated migration route of LYC was speculated. The results showed that groups with $Ba/Ca \leq 0.0042$ was inhabited in the marine region. That with $Ba/Ca \geq 0.0081$ was inhabited in the estuary region, and that with $0.0042 < Ba/Ca < 0.0081$ was inhabited in the mixed (estuary and oceanic) habitat. The five group types of LYC were: (1) offshore spawning, short-term mixed waters inhabited (accounting for 22.2%); (2) offshore spawning, periodically back and forth with mixed water inhabited (accounting for 15.6%); (3) offshore spawning, feeding and nursering in estuary waters, and wintering inhabited in the open sea (31.1%); (4) estuary spawning, nursering in the mixed waters, overwintering inhabited in the open sea (6.7%); (5) shortly spawning in the mixed waters, most of the time inhabited in the open ocean (24.4%). PCA was performed with Ba/Ca core, peak and edge values of all samples, and the results showed that samples from five groups were evenly distributed on both sides of the first axis: G1, G2 and G5 groups, which spent most of their time in the ocean, and G3 and G4 groups, which were heavily influenced by terrestrial sources. At the same time, the PCA results also showed that all the samples appeared nearly synchronously near the island or reefs, indicating that populations in the open sea, offshore and estuary waters may mix due to factors such as migration, indicating the importance of Zhoushan offshore waters for LYC nursering and spawning. This study provides a certain basis for the migration history of the LYC in the ECS between its coastal spawning, feeding grounds and its overwintering grounds in the open sea, as well as for the speculation of its migration routes.

Key words: large yellow croaker (*Larimichthys crocea*); migration history; otolith; microchemistry; Zhejiang offshore waters; open waters of wintering ground