



论文

青海湖裸鲤(湟鱼)耳石的矿物组成及其 Sr/Ca
对洄游习性的潜在示踪周玲^{①②}, 金章东^{①*}, 李福春^③, 王佳惠^④, 游镇烽^④

① 中国科学院地球环境研究所, 黄土与第四纪地质国家重点实验室, 西安 710075;

② 中国科学院研究生院, 北京 100049;

③ 南京农业大学资源与环境科学学院, 南京 210095;

④ 台湾成功大学地球动力学研究中心(EDSRC), 台南 70101

* 联系人, E-mail: zhdjin523@hotmail.com

收稿日期: 2011-07-30; 接受日期: 2011-12-20

国家重点基础研究发展计划(编号: 2010CB833400)和国家自然科学基金项目(批准号: 40873082)资助

摘要 鱼耳石是由碳酸钙晶体构成的生物矿物, 其微结构和微化学可以用于鱼类的年龄鉴定、种群鉴别、生活史以及环境示踪等. 选取青海湖优势鱼种——青海湖裸鲤(湟鱼)作为研究对象, 利用 X 射线衍射和红外光谱技术, 获得了青海湖裸鲤三种耳石的矿物类型和晶型特征. 分析谱图发现, 微耳石和矢耳石的主要矿物是文石, 而星耳石则主要由球霏石组成, 微耳石中的文石结晶程度完好. 鉴于微耳石的形状及其文石组分对环境的敏感性, 用电子微探针沿着微耳石的最长生长轴得到了 Sr/Ca 比值的序列变化. 结果表明, 微耳石的长、短半轴上 Sr/Ca 比值主要在 $1.0 \times 10^{-3} \sim 5.0 \times 10^{-3}$ 之间变化, 并且呈同步变化趋势, 可能反映了青海湖裸鲤生长及洄游过程中所经历的水体化学特征. 微耳石上年轮的间歇(暗)带处的 Sr/Ca 比值呈现较低水平, 是鱼体秋冬时期生活在 Sr/Ca 比值较低的湖水中的结果, 而成长带中较高的 Sr/Ca 比值记录了青海湖裸鲤春夏时期洄游到不同河流的行为, 其变化表明青海湖裸鲤的洄游具有随意性. 因此, 通过青海湖裸鲤耳石微化学组成的高分辨率分析可以示踪它的洄游行为, 对认识这一青藏高原珍贵鱼种的洄游习性以及生活史有重要的意义.

关键词青海湖裸鲤
鱼耳石
洄游
文石
Sr/Ca 比值
环境示踪

鱼耳石是硬骨鱼内耳中起听觉和平衡作用的生物矿物, 共有微耳石、矢耳石和星耳石各 1 对, 分别位于鱼内耳前庭器的椭圆囊、球囊和壶囊内. 它通常是硬骨鱼中最先钙化的部分, 主要由碳酸钙、有机质构成^[1]. 鱼耳石的生长伴随着鱼类的整个生命过程, 其年轮或日轮记录着鱼体的自然生长过程和年龄. 尤其在生长速度慢的个体或高龄个体中, 耳石能

够持续成长且不参与代谢, 能更准确地记录个体年龄及环境信息^[2]. 鱼类生活水体中的化学元素通过鳃呼吸或肠道吸收进入鱼体, 经过一系列代谢、循环最终稳定地沉积在耳石上, 所以耳石的组分变化可以揭示鱼体生长中所经历的水化学状况, 同时还受水体温度和盐度以及鱼体内在的生理变化等因素的影响^[3~5]. 其中, 耳石 Sr/Ca 比值是示踪鱼类洄游习性的

英文引用格式: Zhou L, Jin Z D, Li F C. Mineralogy of the otoliths of naked carp *Gymnocypris przewalskii* (Kessler) from Lake Qinghai and its Sr/Ca potential implications for migratory pattern. *Sci China Earth Sci*, 2012, 55: 983–990, doi: 10.1007/s11430-012-4403-6

一个重要工具. 例如, 国外学者利用电子微探针(EPMA)获得耳石中 Sr/Ca 比值的时序变化, 重建了溯河产卵的鲑鳟类、鲈鱼、美洲西鲱等鱼类的洄游环境史^[6-8]; Wang 等^[9]测定并分析台湾淡水河中乌鱼耳石的 Sr/Ca 和 Ba/Ca 比值, 揭示了乌鱼的生活环境具有多样性, 并且在海水、半咸水和淡水之间洄游; Tsunagawa 等^[10]研究日本河流中淡水虾虎鱼耳石的 Sr/Ca 比值, 证实了该淡水虾虎鱼无海水洄游行为. 国内有关耳石的研究主要集中在形态学、矿物学、微量元素特征等方面. 张国华等^[11]利用耳石的形态特征鉴别六种鲤科鱼类; Li 等^[12]利用透射电镜(TEM)和扫描电镜(SEM)对野生鲤鱼的耳石进行扫描测试, 结果得到星耳石中无机矿物为球霏石, 微耳石和矢耳石中无机矿物为文石; 杨良锋等^[13]发现密云水库和白洋淀水域两个不同水域中鲤鱼耳石的微量元素组成截然不同, 认为鲤鱼耳石的微化学特征是水环境的良好指示剂; 高永华等^[14]选择激光剥蚀电感耦合等离子体质谱分析仪(LA-ICP-MS)在耳石的不同生长环带上打点, 分析不同元素在耳石不同环带的变化特征; 李胜荣等^[15]首次开发的鱼耳石之文石纳米形貌和热发光参数, 可有效地指示相应水体的环境特征, 用于进行不同来源区的判别和鱼类资源管理. 然而, 通过耳石微化学变化示踪鱼类的洄游行为和水环境演化, 在我国鲜有报道.

鱼类的耳石通常由文石或球霏石构成, 还可能存在少量的方解石^[16]. 不同的矿物组成可能影响化学元素的沉积, 如长颌北鲑(*Stenodus leucichthys*)矢耳石中球霏石出现的区域, 伴随着 Sr, Na 和 K 元素的含量显著下降^[17]; 红点鲑(*Salvelinus namaycush*)矢耳石的微化学和晶体结构研究表明, 离子半径较小的 Mg (0.086 nm)和 Mn (0.081 nm)优先沉积在球霏石中, 而半径较大的 Sr (0.132 nm)和 Ba (0.149 nm)却优先沉积在文石中^[18]. 因此, 在利用耳石微量元素组成示踪环境之前, 需要充分认识耳石的矿物组成及其特征.

青海湖是我国最大的内陆高原微咸水湖, 处于半干旱区, 受东亚季风、印度季风和西风带的共同影响, 生态环境十分敏感. 在全球增暖的大环境下, 青海湖环境正经历着巨大的变化, 引起了党和国家领导人及科学工作者的共同关注. 青海湖裸鲤是溯河产卵鱼类, 每年的 4~8 月是裸鲤的洄游季节, 产卵场主要分布在青海湖的布哈河、沙柳河、泉吉河、黑马河和哈尔盖河等主要河流^[19]. 我们已有的研究表明,

青海湖湖水与其流域内主要河流的水化学组成存在明显差异, 表现为湖水中 Na^+ , K^+ 和 Mg^{2+} 的浓度高于河水, 但 Sr^{2+} 和 Ca^{2+} 的浓度却因自生碳酸盐的沉淀而显著低于河水, 从而具有低而均一的 Sr/Ca 比值($(3.92 \pm 0.06) \times 10^{-3}$)^[20]. 同时, 青海湖流域内主要河流的 Sr/Ca 年平均值也显著不同, 特别是布哈河和沙柳河夏季河水的 Sr/Ca 比值相对于湖水和其他几条主要产卵河流要高得多(图 1). 因此, 在青海湖裸鲤溯河洄游过程中, 差异性的水化学组分将被记录在鱼耳石中, 这为利用鱼耳石的微量元素组成反演鱼类生活环境及洄游习性提供了可能. 对于青海湖裸鲤洄游行为的深入认识将为这一珍贵鱼种的管理和保护提供重要的科学参考.

青海湖裸鲤, 俗称湟鱼, 属鲤形目、鲤科、裂腹鱼亚科、裸鲤属. 它是青海湖的形成发展过程中经过长期演化的鱼种, 具有耐盐碱、耐寒、集群等特点, 处于青海湖整个生态系统的核心地位^[19]. 目前, 有关青海湖裸鲤的研究主要集中于形态特征、生长特征、遗传性状和生活史类型等方面^[21-23]. 除了通过耳石鉴定年龄来讨论青海湖裸鲤的生长特征以及繁殖群体生物学^[24,25]以外, 还未开展有关青海湖裸鲤耳石的矿物组成和微化学的研究. 本文通过 X 射线衍射(XRD)和红外光谱(FTIR)技术, 首次对青海湖裸鲤的耳石开展矿物相分析, 确定了其矿物组成. 然后, 在综合考虑耳石的矿物组成和形状的基础上, 选择微耳石利用电子微探针(EPMA)测定耳石中从核心到边缘的 Sr/Ca 比值, 并初步探讨了微耳石的 Sr/Ca 比值

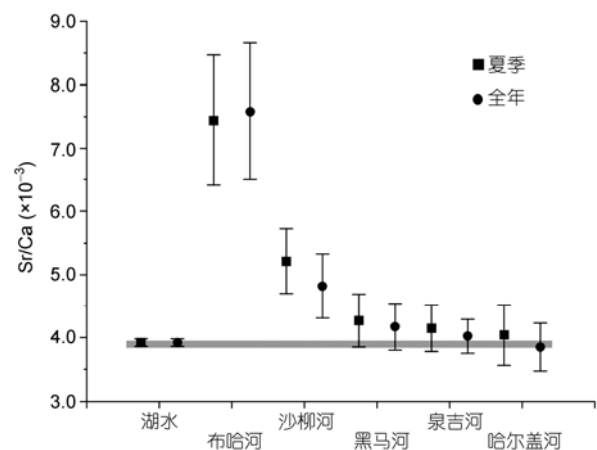


图 1 青海湖及其主要河流的 Sr/Ca(质量浓度)比值的平均值($\pm$ sd)
数据来自于文献[20]

对青海湖裸鲤洄游习性的潜在示踪意义。

1 材料和测试方法

1.1 样品采集

实验样品是 2009 年 7 月采自青海湖的 5 条裸鲤, 在测量体长、体重并拍照后, 用解剖刀和镊子从鱼体内耳中取出三对耳石, 即微耳石、矢耳石和星耳石, 如图 2 所示。将耳石放入离心管中, 加入 10% 的 H_2O_2 溶液, 超声波震荡 2 分钟, 去除耳石上残留的有机组织; 将 H_2O_2 溶液抽出后, 再加入蒸馏水后超声波震荡 2 分钟; 重复 3 次, 以彻底清除耳石上的有机组织和 H_2O_2 溶液。清洗干净的耳石在烘箱中烘干以待用。选用每条鱼体左侧的微耳石、矢耳石和星耳石进行 XRD 分析, 其中 NC-5 的耳石样品粉末回收后, 再进行 FTIR 分析, NC-1 右侧的微耳石则用于 EPMA 的分析(表 1)。

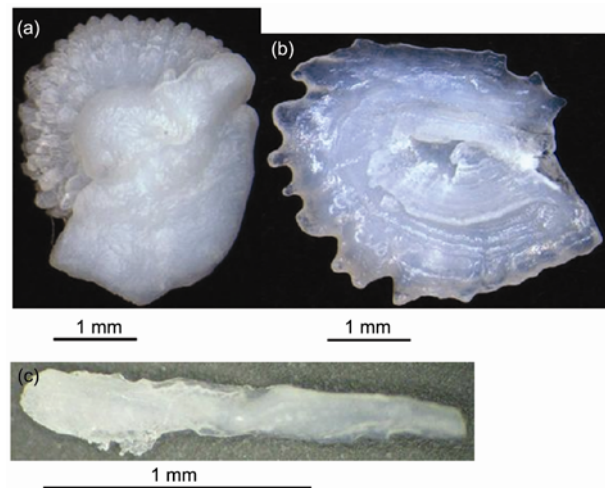


图 2 青海湖裸鲤的三种耳石
(a) 微耳石; (b) 星耳石; (c) 矢耳石

表 1 青海湖裸鲤的采集资料及其耳石所用的测试方法

编号	体长(cm)	体重(g)	年龄(a) ^{a)}	性别	分析方法 ^{b)}
NC-1	24.5	164	4	雄	XRD, EPMA
NC-2	26.7	200	5	雌	XRD
NC-3	28.8	282	6	雄	XRD
NC-4	30.0	302	7	雌	XRD
NC-5	38.0	691	10	雌	XRD, FTIR

a) 年龄通过读取微耳石上的年轮获得; b) 分析方法分别是: XRD-X 射线衍射仪, FTIR-傅氏转换红外光谱分析仪, EPMA-电子微探针分析仪

1.2 测试方法

(1) 样品的 XRD 前处理和测定: 将耳石放在玛瑙研钵中进行研磨, 以乙醇为溶剂将样品涂抹在 Si 无反射样品架上, 自然晾干。在南京地质矿产研究所利用 Rigaku D/Max 2500 型转靶 X 射线衍射仪测定矿物成分。测定条件为: Cu 靶, 石墨单色器, 工作电压 40 kV, 工作电流 200 mA, 步长 0.02° , 扫描速度 $4^\circ/\text{min}$, 2θ 扫描范围为 $5^\circ\sim70^\circ$ 。

(2) 样品的 FTIR 前处理和测定。用光谱纯的 KBr 粉末稀释回收的样品粉末(NC-5)并压片。在南京地质矿产研究所利用 Thermo Nicolet-5700 型傅立叶红外光谱仪测试。测定条件为: 分辨率 8 cm^{-1} , 扫描范围 $400\sim4000\text{ cm}^{-1}$, 扫描次数 64 次。矢耳石因回收样品量不够而无法得到正确谱图。

(3) 样品的 WDS-EPMA 前处理和测定。将烘干后的微耳石放入包埋板封埋于环氧树脂(Epofix, Struers)后, 放入烘箱以温度 40°C , 经过 50~60 分钟的烘干, 树脂硬化后取出; 用慢速切割机切割成适当大小, 利用平置转盘式研磨机研磨至耳石核心出现, 再将研磨面抛光、拍照、清洗、烘干, 并涂碳层(厚度 25~35 nm)后, 以待测试。Sr 和 Ca 定量分析在台湾 Iizuka 博士的实验室利用配有 X 射线波谱仪(4-channel WDS)的 JEOL JXA-8900R 型电子微探针分析仪进行, 遵循 Iizuka 博士^[26]发展的 WDS-EPMA 优化技术完成, 以获得高精度的原位 Sr/Ca 比值。考虑到待测试的微耳石是纯文石, 选用合成的文石(CaCO_3 , 斜方晶系)和菱锶矿($[\text{Sr}_{0.95}\text{Ca}_{0.05}]\text{CO}_3$, 斜方晶系, NMNH-R10065, Smithsonian Institution, Washington DC)作为标准物质, 以最小化基体效应。首先, 利用二次电子像与背散射电子像对比, 确定微耳石最长生长轴由核心到边缘的探针打点位置, 探针打点间隔为 $10\text{ }\mu\text{m}$ 。然后, 沿着 NC-1 微耳石最长生长轴进行电子打点, 测试条件为: 加速电压 15 kV, 电流强度 3 nA, 束斑大小是 $5\text{ }\mu\text{m}\times4\text{ }\mu\text{m}(\times20000)$, 每个点的曝光时间为 250 S。其中, Ca $K\alpha$ 峰处测量 20 S, 上下基线各 10 S, 用季戊四醇(PET)为衍射晶体; Sr $L\alpha$ 峰处测量 80 S, 上下基线各 20 S, 用 PET 和邻苯二甲酸氢铈(TAP)为衍射晶体。最后, 应用 PRZ(phi-rho-z)法通过标准物质对所获得的样品的 X 射线强度进行校正, 分别获得 Ca 和 Sr 的含量, 其中 Sr 的检测极限低于 0.04%(3 σ)。相对于传统的原子序数(Z)、X 射线吸收(A)和次生荧光(F)的 ZAF 校正方法, 改进后的 PRZ(phi-

rho-z)法增加了深度分布函数(ρx), 代表了单位质量深度的 X 射线强度(ρz), 同时考虑了背散射因子、电子减速和有效电离截面, 以更好表达 Z 效应, 更适合轻元素的校正^[26,27]. 本研究中, NC-1 微耳石中 Sr 计数率(count per second)的相对标准偏差(RSD)平均值为 8.6%, 其 Sr 含量的误差范围为 0.04 wt%~0.05 wt%. Ca 的 RSD<1.0%, 以其最大分析误差来计算, 所获得的 Sr/Ca 比值的 RSD 均低于 Sr 的测量误差.

2 结果和讨论

2.1 青海湖裸鲤耳石的矿物组成和特征

XRD 谱图表明, 青海湖裸鲤的三类耳石的各自谱图基本相同, 其中微耳石和矢耳石的主要矿物是文石, 星耳石则主要是球霏石(图 3). 微耳石的 XRD 谱图与标准文石(PDF#41~1475)对比发现, 无论是在谱线位置还是相对强度上, 两者都完全一致, 说明微耳石中不含有任何其他结晶矿物相, 由纯文石组成. 而星耳石的 XRD 谱图与标准球霏石(PDF#33~0268)不完全吻合, 其中衍射峰 A($d = 0.304$ nm, $2\theta = 29.38^\circ$)是方解石的特征峰, 说明星耳石中可能存在方解石. 矢耳石的 XRD 谱图与标准文石也不完全相同, 存在明显的两个峰(B 和 D, 图 3(c)). 衍射峰 B 和峰 D 的 d 值分别为 0.359 和 0.206 nm, 2θ 分别为 24.81° 和 43.82° , 对应着球霏石的两个特征峰, 说明矢耳石中可能存在少量的球霏石. 青海湖裸鲤耳石的 XRD 谱图中各峰均较尖锐, 对称性较好, 特别是微耳石中的文石. 这说明青海湖裸鲤耳石的结晶程度均较好, 而星耳石中方解石的发现对于研究耳石碳酸钙晶型及成因将是十分重要的, 因为耳石中方解石区是很少见的.

青海湖裸鲤不同耳石的碳酸钙多型体的结构还可以通过红外振动光谱的差异进行进一步指认^[28]. 在微耳石和星耳石的红外谱图中, 位于 1481 和 1533 cm^{-1} 处的 ν_3 带均为强而宽缓的吸收带, 它是碳酸盐矿物的特征吸收带, 但是两者的谱图还存在着明显的区别(图 4). 其中, 微耳石在 1083 cm^{-1} 的 ν_1 带为尖锐的单带, ν_4 带在 712 和 699 cm^{-1} 处是尖锐的双带. 一般来说, 856 cm^{-1} 处的强吸收带是文石的特征吸收带^[29], 而青海湖裸鲤微耳石的强吸收带 ν_2 带位于 859 cm^{-1} , 这是生物成因文石的 ν_2 带相对于无机成因文石向高频方向频移的常见表现^[30]. 在星耳石的红外

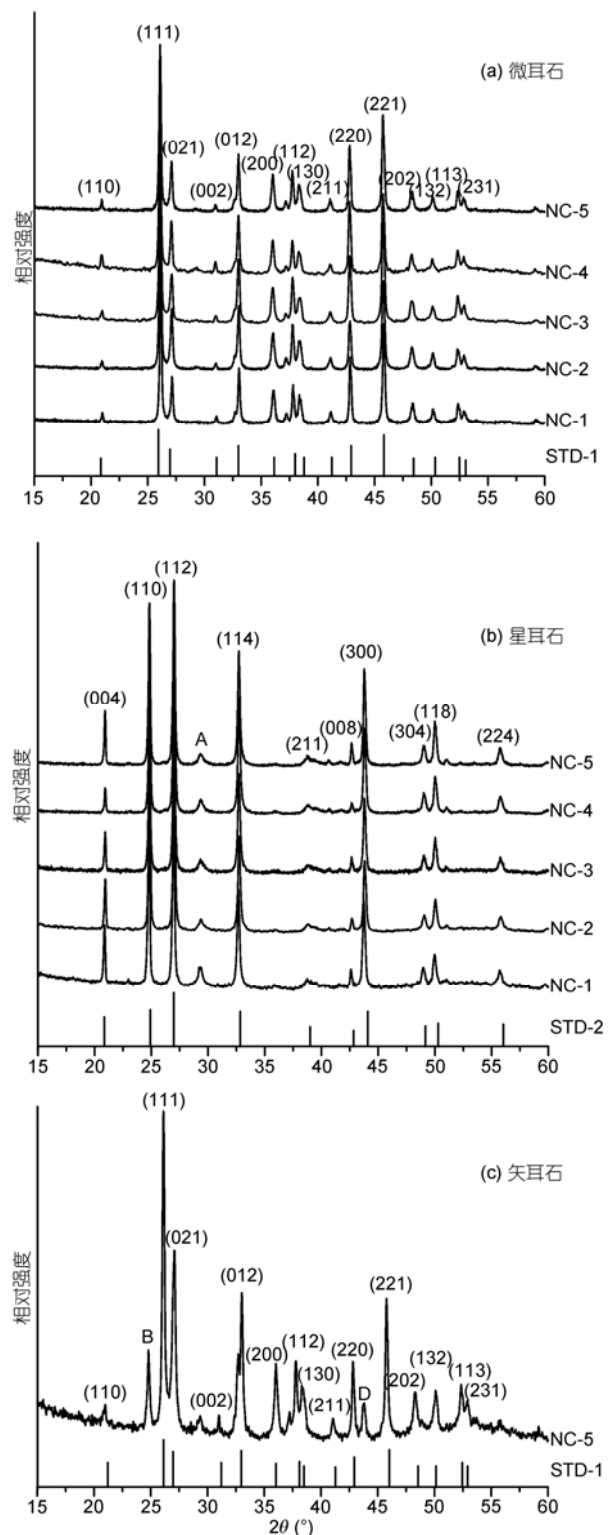


图 3 青海湖裸鲤耳石的 XRD 谱图
STD-1 是文石的标准谱图, STD-2 是球霏石的标准谱图. 谱图中特征峰上方数值是矿物的晶面指数

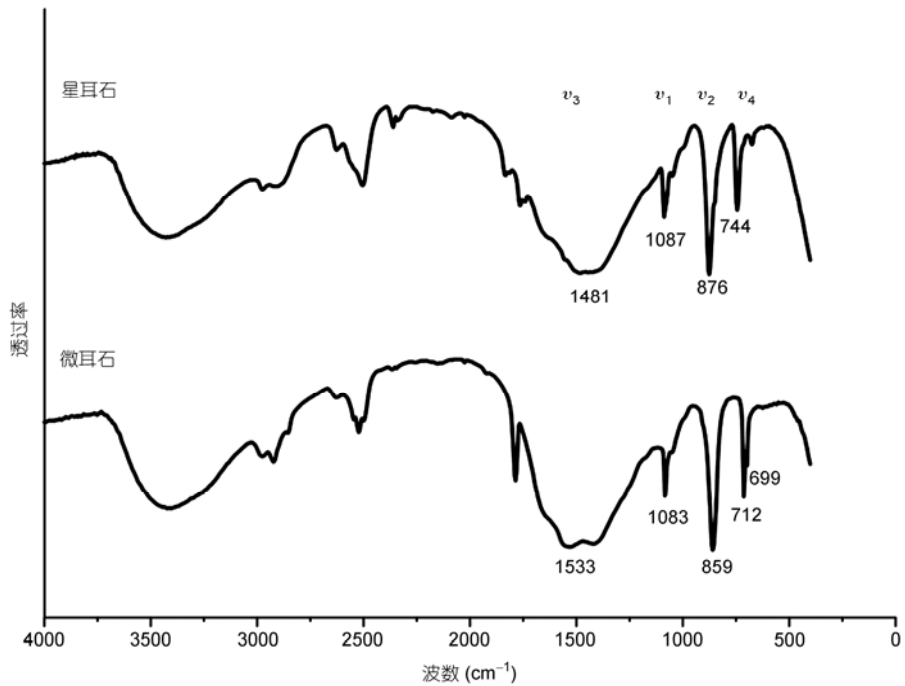


图 4 青海湖裸鲤(NC-5)的星耳石和微耳石的红外谱图
 ν_1 - ν_4 分别表示 CO_3^{2-} 的四种内振动模式所对应的红外吸收峰的位置, 吸收峰下方的数值表示出峰位置

谱图中, ν_4 带在 744 cm^{-1} 处为尖锐的单带, ν_2 带为一强而尖锐的吸收带, 位置在 876 cm^{-1} , ν_2 和 ν_4 带均是球霏石的特征吸收带. 因此, 根据对红外光谱图中各谱带的指认, 进一步确定了青海湖裸鲤微耳石的矿物组成是纯文石, 星耳石的主要组成是球霏石.

2.2 青海湖裸鲤微耳石的年轮特征和 Sr/Ca 比值对洄游习性的潜在示踪意义

从形状上来说, 青海湖裸鲤的微耳石近似马蹄形, 星耳石为中凹的薄片, 近圆形, 而矢耳石呈长棒状, 极易碎裂, 因此微耳石和星耳石适合做微结构和微化学分析. 考虑到文石中富含 Sr 和 Ba 等环境敏感元素, 因此本文选取由纯文石组成的微耳石进行年轮定年和微化学的测定.

经过稀盐酸腐蚀后, 微耳石上的年轮清晰可见, 可用来计数定年. 在透射光下, 核心区域为近圆形的黑暗区, 其外是由宽的成长带和窄的间歇(暗)带交替排列(图 5). 青海湖裸鲤的生长期主要集中在水温较高的春夏时节(5~9 月份), 9 月份水温开始逐渐下降, 12 月上旬至次年 4 月湖面冰封, 到 4 月中旬后冰封才会全部解除^[31]. 一般来说, 春夏时裸鲤主要洄游到河流中, 河水中充足的光照及水温适合鱼类生长, 新陈

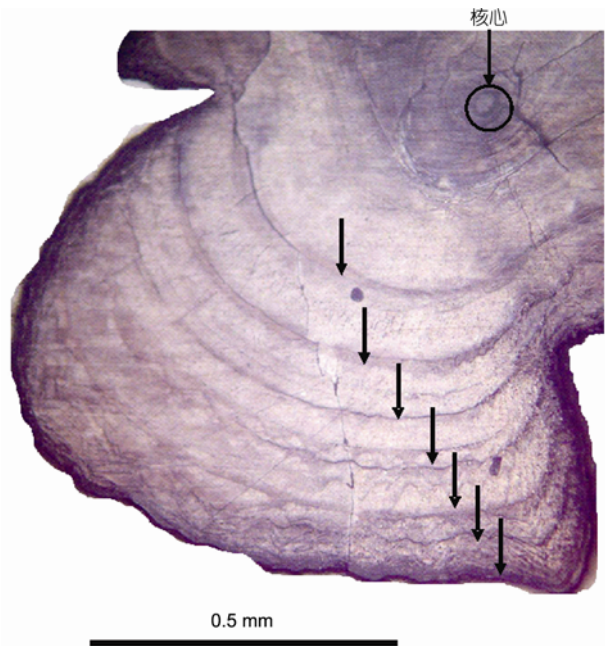


图 5 经过研磨、抛光以及稀盐酸腐蚀后的 NC-4 右侧的微耳石在显微镜入射光下的局部结构
耳石中心的黑色发亮区域是核心, 即圆形所示, 箭头所示年轮: 1~7 年

代谢加快, 耳石的增长速率加快, 形成了宽的成长带; 秋冬时青海湖裸鲤主要生活在湖水中, 光照减弱、水

温降低,限制了鱼类的摄食及新陈代谢,耳石缓慢沉积,形成了窄的间歇(暗)带,这两个区域的交替生长便形成年轮. 因此在一年内,秋冬时节,青海湖裸鲤生长逐渐缓慢,耳石年轮间的间歇带在这段时期形成;一旦进入春季,水温升高,裸鲤的生长加快,耳石进入成长带的生长,形成较宽的轮纹,依此继续下去. 由此,根据间歇带的细线状暗色环带,可直接读其为年轮,从而获得了每个个体的年龄(表 1).

由于水体中的 Sr/Ca 比值是洄游性鱼类的耳石中 Sr/Ca 的决定因素,所以耳石中 Sr/Ca 比值的变化主要反映了鱼体在不同 Sr/Ca 比值的水域的生活历史^[32]. 如洄游性北鲑矢耳石的成长带上具有的较高 Sr/Ca 比值,是鱼体从淡水洄游到河口或海水里的直接响应^[33]. NC-1 微耳石最长生长轴上的 Sr/Ca 比值的变化显示,其长、短半轴上 Sr/Ca 比值的时序变化趋势基本一致,主要在 $1.0 \times 10^{-3} \sim 5.0 \times 10^{-3}$ 之间波动(图 6). 这说明尽管微耳石长、短半轴的生长速率不同,但是 Sr

在耳石中同一环带的沉积保持同步,记录了相同的信息. 类似地,美洲鳗矢耳石中长、短半轴上 Sr/Ca 比值的时序变化也保持一致^[34].

NC-1 微耳石的长、短半轴上 1~3 龄中的间歇(暗)带具有低、且相对稳定的 Sr/Ca 比值(图 6 灰色阴影部分),平均为 $(1.96 \pm 0.80) \times 10^{-3}$. 由于耳石中年轮的间歇(暗)带是青海湖裸鲤在湖水中生活时形成,因此间歇(暗)带中的 Sr/Ca 比值是湖水化学的直接反映. 由于青海湖湖水的 Sr/Ca 比值很均一,平均值为 $(3.92 \pm 0.06) \times 10^{-3}$ (图 1),因此根据 1~3 龄间歇(暗)带的 Sr/Ca 比值可以获得微耳石与湖水之间 Sr 的分配系数, $D_{Sr} = [\text{Sr/Ca}]_{\text{耳石}} / [\text{Sr/Ca}]_{\text{湖水}} = 0.50 \pm 0.21$. NC-1 微耳石 4 龄中的间歇(暗)带却表现出相对偏高的 Sr/Ca 比值,这可能因为靠近边缘,间歇(暗)带变窄,电子微探针打点包含了成长带的信息.

耳石年轮的成长带是鱼体在春夏时期形成,因此成长带内的 Sr/Ca 比值记录了该时期鱼体洄游到青

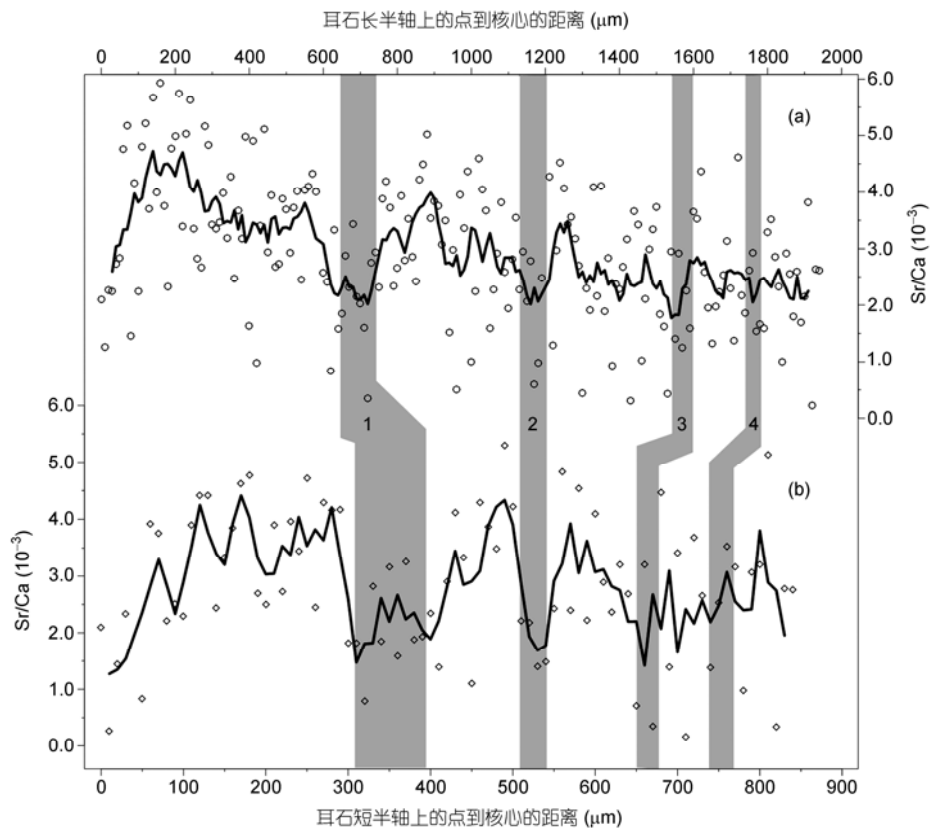


图 6 青海湖裸鲤 NC-1 微耳石的 Sr/Ca(质量浓度)比值的时序变化

(a)和(b)分别表示长、短半轴上 Sr/Ca 比值的数据点和滑动平均曲线,其中长半轴上是 7 点平均,短半轴上是 3 点平均,灰色的阴影表示年轮的间歇(暗)带在长、短半轴上的对应关系,即 4 条年轮的环带

海湖周边各条河流的信息。然而, 对某一个体的洄游是否会固定于某一河流, 或具有随意性, 以及洄游期间是否也会经常返回到湖水中, 目前都不甚了解。在 NC-1 微耳石长半轴上的成长带内, 1~2 龄内的 Sr/Ca 比值分别显著高于间歇(暗)带(U 检验 <0.05 , $P_1 = 0.001$, $P_2 = 0.027$), 而 3~4 龄内的 Sr/Ca 比值与间歇(暗)带差异不显著(U 检验 >0.05 , $P_3 = 0.186$, $P_4 = 0.315$), 短半轴上也有相同的检验结果。这是春夏时期鱼体洄游到不同河水中的直接记录, 因为青海湖流域各主要河流的水化学之间存在明显的差异^[20]。青海湖流域内 5 条主要河流的夏季河水的 Sr/Ca 比值分别为 $(7.44 \pm 1.35) \times 10^{-3}$ (布哈河)、 $(5.21 \pm 0.51) \times 10^{-3}$ (沙柳河)、 $(4.27 \pm 0.42) \times 10^{-3}$ (黑马河)、 $(4.15 \pm 0.37) \times 10^{-3}$ (泉吉河)和 $(4.04 \pm 0.48) \times 10^{-3}$ (哈尔盖河), 其中布哈河和沙柳河河水的 Sr/Ca 比值明显高于湖水和其他几条河流, 黑马河、泉吉河和哈尔盖河的 Sr/Ca 比值则略高于湖水(图 1)。假设青海湖裸鲤微耳石与河水之间具有其与湖水相近的 Sr 分配系数, 那么 NC-1 鱼体在 1 和 2 龄的洄游期内可能主要生活在 Sr/Ca 较高的布哈河或沙柳河, 而 3 和 4 龄的洄游期内能还会洄游到其他河流中(如黑马河、泉吉河等)。这表明, 单一鱼体可能会洄游于不同河流之间, 而不会只固定于某一河流, 具有一定的随意性。长江口凤鲚耳石中的 Sr/Ca 比值分析也表明, 凤鲚不只在海水和河口半咸水之间洄游, 还进入淡水域, 拥有多种洄游类型^[35]。同时, NC-1 裸鲤每个成长带内的 Sr/Ca 比值还表现出

较为频繁的波动, 这可能反映了: (1) 河水与微耳石之间 Sr 的分配系数可能不同于湖水; (2) 不同河段的河水的 Sr/Ca 比值存在差异, 并有显著的季节性变化^[20]; (3) 不同季节水体温度、盐度和鱼体内在的生理变化等因素的可能影响^[4,5]; (4) 鱼体在不同的河流及湖水之间洄游。通过青海湖裸鲤耳石中其它微量元素(如 Mg/Ca, Ba/Ca, Fe/Ca, Mn/Ca 等)和 Sr 同位素分析等的细致研究, 将更深入解析这些制约因素, 并为进一步示踪青海湖裸鲤的洄游习性及其生活环境提供线索。

3 结论

通过 X 射线衍射(XRD)和红外光谱(FTIR)分别对青海湖裸鲤微耳石、矢耳石和星耳石开展矿物相分析, 发现微耳石由纯文石组成, 矢耳石和星耳石的主要矿物组成分别是文石和球霏石, 矢耳石中可能存在少量球霏石成分, 星耳石中可能存在极少量的方解石。

微耳石电子微探针(EPMA)的测试表明, 其长、短半轴上的 Sr/Ca 比值的时序变化趋势呈现同步性, 耳石年轮的间歇(暗)带处呈现较低的 Sr/Ca 比值, 是青海湖裸鲤生活在 Sr/Ca 较低的湖水中的直接反映, 而成长带中相对偏高及波动的 Sr/Ca 比值则可用于示踪其洄游过程中所经历的水域环境, 结果表明单一个体的洄游路线具有一定的随意性。

致谢 感谢台湾成功大学地球动力学研究中心陈慧伦女士和许智杰博士对鱼耳石的前处理工作的指导, 感谢台湾 Iizuka Yoshiyuki 博士在耳石 Sr/Ca 比值测试中的帮助, 感谢中国科学院地球环境研究所张飞、金玉安和贺茂勇博士, 南京农业大学的石宏霖, 青海湖布哈河水文站的石岳威、邱新宁工程师在采样过程中给予的帮助。特别感谢评审专家提出的宝贵意见, 使得本文的实验方法和讨论得到进一步深入。

参考文献

- 1 Degens E T, Deuser W G, Haedrich R L. Molecular structure and composition of fish otoliths. *Mar Biol*, 1969, 2: 105–113
- 2 Stevenson D K, Campana S E. Otolith Microstructure Examination and Analysis. Ottawa: Department of Fisheries and Oceans, 1992. 2–8
- 3 Campana S E. Chemistry and composition of fish otoliths: Pathways, mechanisms and applications. *Mar Ecol Prog Ser*, 1999, 188: 263–297
- 4 Martin G B, Thorrold S R, Jones C M. Temperature and salinity effects on strontium incorporation in otoliths of larval spot (*Leiostomus xanthurus*). *Can J Fish Aquat Sci*, 2004, 61: 34–42
- 5 Tzeng W N. Effects of salinity and ontogenetic movements on strontium: Calcium ratios in the otoliths of the Japanese eel, *Anguilla japonica* Temminck and Schlegel. *J Exp Mar Biol Ecol*, 1996, 199: 111–122
- 6 Kalish J M. Use of otolith microchemistry to distinguish the progeny of sympatric anadromous and non-anadromous salmonids. *Fish Bull*, 1990, 88: 657–666
- 7 Secor D H. Application of otolith microchemistry analysis to investigate anadromy in Chesapeake Bay striped bass *Morone saxatilis*. *Fish*

- Bull, 1992, 90: 798–806
- 8 Limburg K E. Otolith strontium traces environmental history of subyearling American shad *Alosa sapidissima*. Mar Ecol Prog Ser, 1995, 119: 25–35
 - 9 Wang C H, Hsu C C, Chang C W, et al. The migratory environmental history of freshwater resident Flathead Mullet *Mugil cephalus* L. in the Tanshui River, Northern Taiwan. Zool Stud, 2010, 49: 504–514
 - 10 Tsunagawa T, Suzuki T, Arai T. Otolith Sr:Ca ratios of freshwater goby *Rhinogobius* sp. TO indicating absence of sea migrating traits. Ichthyol Res, 2010, 57: 319–322
 - 11 张国华, 但胜国, 苗志国, 等. 六种鲤科鱼类耳石形态以及在种类和群体识别中的应用. 水生生物学报, 1999, 23: 683–688
 - 12 Li Z, Gao Y H, Feng Q L. Hierarchical structure of the otolith of adult wild carp. Mat Sci Eng C- Bio S, 2009, 29: 919–924
 - 13 杨良锋, 李胜荣, 罗军燕, 等. 不同水域鲤鱼耳石微化学特征及其环境指示意义. 岩石矿物学杂志, 2006, 25: 511–517
 - 14 高永华, 李胜荣, 冯庆玲, 等. LA-ICP-MS 方法在鲤鱼耳石微区研究中的应用. 矿物岩石地球化学通报, 2007, 26(增刊): 92–94
 - 15 李胜荣, 申俊峰, 罗军燕, 等. 鱼耳石的成因矿物学属性: 环境标型及其研究新方法. 矿物学报, 2007, 27: 241–248
 - 16 Gauldie R W. Polymorphic crystalline structure of fish otoliths. J Morphol, 1993, 218: 1–28
 - 17 Brown R, Kenneth P S. Elemental distribution within polymorphic inconnu (*Stenodus leucichthys*) otoliths is affected by crystal structure. Can J Fish Aquat Sci, 1999, 56: 1898–1903
 - 18 Melancon S, Fryer B J, Ludsin S A, et al. Effects of crystal structure on the uptake of metals by lake trout (*Salvelinus namaycush*) otoliths. Can J Fish Aquat Sci, 2005, 62: 2609–2619
 - 19 Walker K F, Dunn I G, Edwards D, et al. A fishery in a changing lake environment: the naked carp *Gymnocypris przewalskii* (Kessler) (Cyprinidae: Schizothoracinae) in Qinghai Hu, China. Int J Salt Lake Res, 1996, 4: 169–222
 - 20 Zhang F, Jin Z D, Hu G, et al. Seasonally chemical weathering and CO₂ consumption flux of Lake Qinghai river system in the northeastern Tibetan Plateau. Environ Earth Sci, 2009, 59: 297–313
 - 21 陈大庆, 张信, 熊飞, 等. 青海湖裸鲤生长特征的研究. 水生生物学报, 2006, 30: 173–179
 - 22 史建全, 祁洪芳, 杨建新, 等. 青海湖裸鲤人工繁殖及鱼苗培育技术的研究. 淡水渔业, 2000, 30: 3–6
 - 23 史建全, 杨建新, 祁洪芳, 等. 青海湖裸鲤形态特征与遗传性状. 青海科技, 2000, 7: 16–18
 - 24 熊飞, 陈大庆, 刘绍平, 等. 青海湖裸鲤不同年龄鉴定材料的年轮特征. 水生生物学报, 2006, 30: 185–191
 - 25 张信, 熊飞, 唐红玉, 等. 青海湖裸鲤繁殖生物学研究. 海洋水产研究, 2005, 26: 61–67
 - 26 Iizuka Y. An analytical method of electron microprobe for study on otolith (carbonate/bio-mineral): Implications for study of fish migration. Technical Report, JEOL 2010 EPMA Users' Meeting, University of Tokyo. 2010
 - 27 Reed S J B. Electron Microprobe Analysis. 2nd ed. Cambridge: Cambridge University, 1993. 346
 - 28 张刚生, 李浩璇. 生物成因与无机成因文石的 FTIR 光谱区别. 矿物岩石, 2006, 26: 1–4
 - 29 Wang L, Sondi I, Matijevic E. Preparation of uniform needle-like aragonite particles by homogeneous precipitation. J Colloid Interf Sci, 1999, 218: 545–553
 - 30 Tomas J, Geffen A J, Allen I S, et al. Analysis of the soluble matrix of vaterite otoliths of juvenile herring (*Clupea harengus*): Do crystalline otoliths have less protein? Comp Biochem Phys A, 2004, 139: 301–308
 - 31 熊飞. 青海湖裸鲤繁殖群体生物学. 硕士学位论文. 武汉: 华中农业大学, 2003. 1–76
 - 32 Brown R J, Severin K P. Otolith chemistry analyses indicate that water Sr:Ca is the primary factor influencing otolith Sr:Ca for freshwater and diadromous fish but not for marine fish. Can J Fish Aquat Sci, 2009, 66: 1790–1808
 - 33 Howland K L, Tonn W M, Babaluk J A, et al. Identification of freshwater and anadromous inconnu in the Mackenzie river system by analysis of otolith strontium. Trans Amer Fisheries Soc, 2001, 130: 725–741
 - 34 Wang C H, Tzeng W N. Interpretation of geographic variation in size of American eel *Anguilla rostrata* elvers on the Atlantic coast of North America using their life history and otolith ageing. Mar Ecol Prog Ser, 1998, 168: 35–43
 - 35 Yang J, Arai T, Liu H, et al. Reconstructing habitat use of *Coilia mystus* and *Coilia ectenes* of the Yangtze River estuary, and of *Coilia ectenes* of Taihu Lake, based on otolith strontium and calcium. J Fish Biol, 2006, 69: 1120–1135