

青海湖裸鲤耳石轮纹 O-Sr 同位素组成及其洄游行为的指示

周玲^①, 金章东^{①②*}, WILLIAMS Ian S^③, 张飞^①

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 710061;

② 西安交通大学全球环境变化研究院, 西安 710049;

③ Research School of Earth Sciences, The Australian National University, Canberra, ACT 0200, Australia

* 联系人, E-mail: zhdjin@ieecas.cn

2015-07-28 收稿, 2015-08-21 修回, 2015-08-24 接受, 2015-12-24 网络版发表

国家自然科学基金(41225015)和黄土与第四纪地质国家重点实验室开放基金(SKLLQG1130)资助

摘要 以溯河洄游为特征的青海湖裸鲤是青海湖鱼类的优势种, 但其洄游行为还知之甚少. 利用高分辨率 SHRIMP II 离子探针和激光剥蚀高分辨多接收电感耦合等离子体质谱仪(LA-MC-ICP-MS)分别测定了青海湖裸鲤微耳石轮纹中的氧和锶(O-Sr)同位素组成. 结果表明, 微耳石成长带中较低的 $\delta^{18}\text{O}$ 记录了青海湖裸鲤春夏时期所洄游的河水化学信息; 将 $\delta^{18}\text{O}$ 与 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 同位素组成相结合, 微耳石轮纹的同位素组成明确指示了多数个体可能更倾向于固定的河流洄游产卵. 这一结果对于认识青海湖裸鲤的洄游习性以及鱼类保护和管理有重要的意义.

关键词 青海湖裸鲤, 微耳石, 轮纹, 稳定同位素, 洄游习性

青海湖裸鲤(俗称“湟鱼”)是青海湖形成发展过程中经过长期演化的特有鱼种, 具有耐盐碱、耐寒、集群等特点, 是青海湖中唯一的经济鱼类, 处于青海湖整个生态系统的核心地位^[1]. 从20世纪80年代开始, 由于过度捕捞和偷捕, 青海湖裸鲤资源量锐减. 因此, 保护与恢复裸鲤资源不仅具有社会经济价值, 而且对青海湖生态环境综合治理产生非常积极的影响.

溯河洄游产卵是青海湖裸鲤的特性, 产卵场主要分布在流域内布哈河、沙柳河、泉吉河、黑马河等主要河流^[1]. 尽管青海湖裸鲤已经被列为国家二级保护动物, 但对其洄游行为还知之甚少. 鱼耳石是硬骨鱼内耳中起听觉和平衡作用的生物矿物, 主要由碳酸钙和有机质构成^[2]. 耳石能够持续成长且不参与代谢, 因此能准确地记录鱼体年龄及生活的水环境信息. 例如, 鱼耳石中的同位素成分(如 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)

被视为一种可靠的环境变化示踪剂. 其中, 耳石中的氧同位素与鱼体生活周围的水之间达到(或接近)平衡, 并且与水温有关^[3], 目前被广泛用来重建现代和过去水体的温度史^[4,5]. Sr同位素不会在湖泊内的化学和生物过程中发生分馏作用, 耳石内的Sr同位素能够忠实记录水体中的Sr同位素组成^[6,7], 因此耳石轮纹Sr同位素组成可直接而有效地对鱼类的迁移过程作出判断, 并示踪鱼类的产卵地及其洄游行为^[8,9].

青海湖湖水经长期演化后具有富集 ^{18}O 的特征, 平均值是3.52‰^[10], 而周围河流主要受到降水补给, 具有较低的 ^{18}O 值(-7.31‰~-5.98‰)^[11](表1). 与此同时, 由于流经的基岩类型不同, 青海湖流域内主要河流的河水具有明显不同的Sr同位素组成(表1), 且存在显著的季节性差异^[12,13]. 因此, 在青海湖裸鲤溯河洄游过程中, 差异性的水化学组分(O-Sr同位素)将被记录在耳石中, 这为利用耳石的微化学组成反演鱼

引用格式: 周玲, 金章东, Williams I S, 等. 青海湖裸鲤耳石轮纹 O-Sr 同位素组成及其洄游行为的指示. 科学通报, 2016, 61: 668-675

Zhou L, Jin Z D, Williams I S, et al. Oxygen and strontium isotope markers of Lake Qinghai naked carp otoliths and their implication for fish migratory pattern (in Chinese). Chin Sci Bull, 2016, 61: 668-675, doi: 10.1360/N972015-00733

表 1 青海湖及其周围河流 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值(平均值 $\pm$ 标准偏差)^{a)}

Table 1 The $\delta^{18}\text{O}$ and $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ values of waters of Qinghai Lake and its surrounding rivers (mean $\pm$ s.d.)

水体	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$
青海湖	+3.52 $\pm$ 0.65 ^[10]	0.711433 $\pm$ 0.000007 ^[12]
布哈河	-6.15 $\pm$ 0.98	0.710993 $\pm$ 0.000010 ^[12]
沙柳河	-7.21 $\pm$ 0.45 ^[11]	0.712262 $\pm$ 0.000006 ^[12]
泉吉河	-5.98 $\pm$ 0.64	0.711845 $\pm$ 0.000015
黑马河	-7.31 ^[11]	0.711896 $\pm$ 0.000020 ^[12]

a) 其他来自金章东未发表的数据

类生活环境及洄游习性提供了可能. 本文测定了青海湖裸鲤微耳石生长轴上 O-Sr 同位素组成的时序变化, 结合各类水体的 O-Sr 同位素端元组成, 探讨其洄游行为, 为这一珍贵鱼种的生活习性和个体差异提供同位素地球化学证据.

1 材料和测试方法

1.1 样品采集

8尾青海湖裸鲤样品采自于2012年7月. 首先进行体长和体重的测量, 拍照后进行解剖, 辨认雌雄, 基本生物学信息见表2; 然后用解剖刀和镊子从鱼内耳中取出3对耳石, 即微耳石、矢耳石和星耳石; 将耳石放入离心管中, 依次加入10%的 H_2O_2 溶液和蒸馏水, 分别超声波震荡2 min, 重复3次, 去除耳石上残留的有机组织; 清洗干净后在烘箱中烘干以待用.

1.2 测试方法

耳石的 SHRIMP II 前处理和氧同位素测定: 将烘干后的微耳石放入包埋板、封埋于环氧树脂(Epofix, Struers)后, 放在60℃加热板上经过24 h烘干, 树脂硬

化后取出; 用慢速切割机切割成适当大小, 然后研磨至耳石表面轮纹清晰, 再将耳石磨片和标准物质(NBS18碳酸盐, $\delta^{18}\text{O}_{\text{VPDB}} = -23.1\text{‰}$; NBS19石灰岩, $\delta^{18}\text{O}_{\text{VPDB}} = -2.2\text{‰}$)一起放入直径为25 mm的包埋板封埋于环氧树脂, 再次烘干; 树脂硬化后取出抛光、拍照, 再依次用汽油、RBS35溶液和微孔水清洗并烘干, 真空喷涂12 nm厚的高纯度铝层, 最后镶嵌到金属环形槽内, 以待上机测试.

耳石中的氧同位素测定分析利用 SHRIMP II 离子探针进行. 该仪器配备15 kV, ~3 nA Cs^+ 离子源, 在电压作用下离子从离子枪内射出, 被聚焦后照射在样品表面激发200~250 pA的二次离子. 法拉利杯同时接收 $^{16}\text{O}^-$ 和 $^{18}\text{O}^-$, 并用Keithley 642静电计测量出离子数. 每次测试包含3 min的预烧以保证二次离子的同位素组成更稳定, 以及10次或14次(10 s/次)的 $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ 比值的计算时间^[14]. 分析时, 首先测试标准物质NBS18和NBS19, 然后每5个样品增加1个标准物质. 打点沿着耳石最长生长轴从核心到边缘, 如图1中的直线AB和EF, 其中NC04增加了一条生长轴打点(图1, 直线AC), 打点的束斑直径约为25 μm , 剥蚀深度为2~3 μm , 氧同位素的测试精度为0.1‰~0.2‰,

表 2 青海湖裸鲤样品基本生物学信息及其微耳石成长带和间歇带中 $\delta^{18}\text{O}$ 的组成

Table 2 Basic biological information of the naked carp samples and $\delta^{18}\text{O}$ values of the incremental and discontinuous zones of their otoliths

编号	体长(cm)	体重(g)	年龄(年)	性别	成长带 $\delta^{18}\text{O}$ (‰)		间歇带 $\delta^{18}\text{O}$ (‰)		P 值 (U 检验)
					范围	平均值	范围	平均值	
NC01	30.0	302	7	雌	-1.81~+1.75	+0.25	+0.47~+3.35	+1.68	0.000
NC02	35.0	450	10	雌	-0.28~+2.39	+1.26	+0.54~+3.90	+2.65	0.000
NC03	42.0	590	12	雌	-1.43~+1.55	+0.48	+0.33~+2.94	+1.22	0.000
NC04	33.0	440	10	雌	-4.88~+2.71	+0.72	+1.03~+3.46	+1.65	0.000
NC05	31.0	310	8	雄	-4.55~+0.84	-1.28	-2.55~+1.97	+2.39	0.028
NC06	32.0	320	9	雌	-4.03~+0.70	-1.13	-2.68~+1.83	-0.04	0.004
NC07	30.5	305	8	雄	-3.20~+1.52	-0.50	-0.96~+2.69	+0.13	0.006
NC08	31.5	315	8	雌	-6.42~+2.67	-0.23	-1.86~+3.33	+1.12	0.034

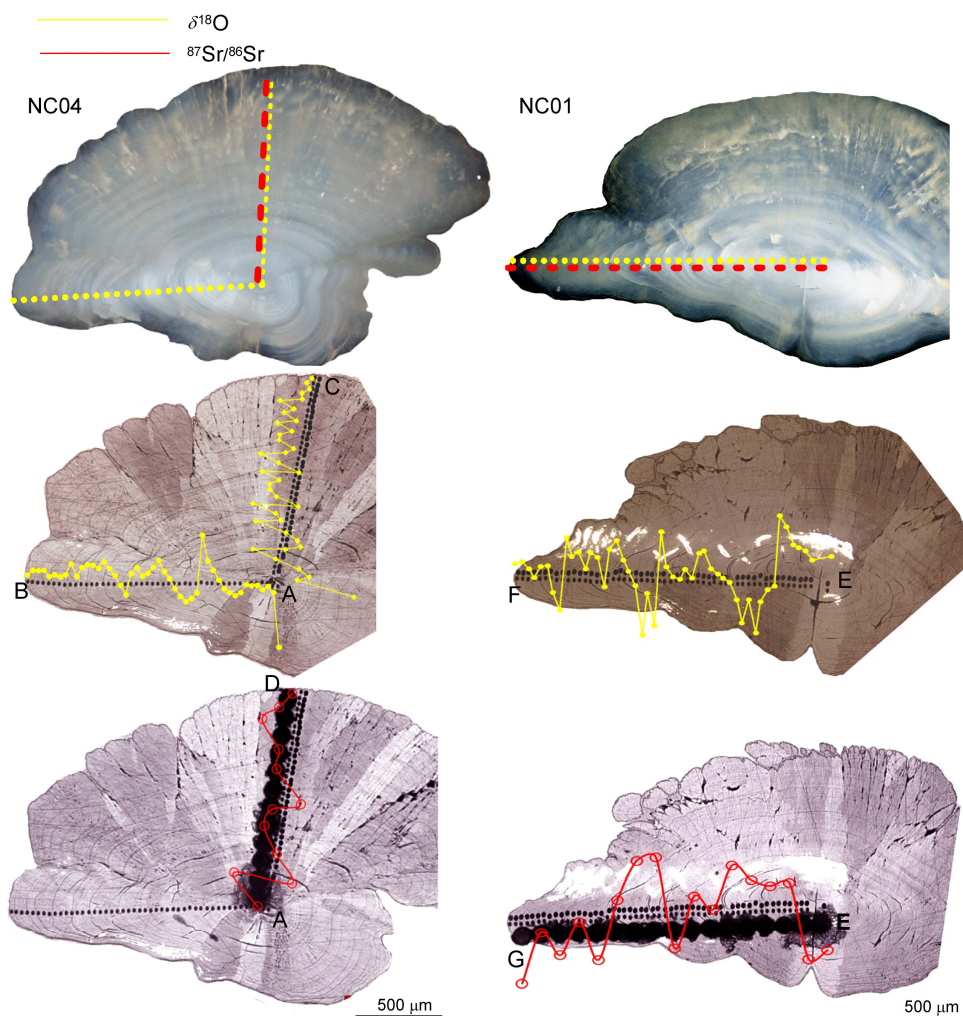


图1 青海湖裸鲤微耳石(NC01, NC04)抛光照片, 以及利用SHRIMP II 和LA-MC-ICP-MS分别测试从耳石核心到边缘的O-Sr同位素打点位置及数据示意图。黄色数据点(AB, AC, EF)示意间距 25 μm 的O同位素组成, 红色数据点(AD, EG)为间距 95 μm 的Sr同位素组成

Figure 1 Optical micrographs of the polished otoliths of the Qinghai Lake naked carps (NC01, NC04), showing the analytical spots and the data curves by SHRIMP II and LA-MC-ICP-MS from core to edge. The oxygen isotopic compositions along the AB, AC, and EF transects are shown as yellow points and curves with 25 μm interval, and the red ones along the AD and EG transects are Sr isotopic compositions with 95 μm interval

标准偏差约为0.3‰。

耳石的LA-MC-ICP-MS前处理和Sr同位素测定: 从SHRIMP II上取出来的耳石样品, 经清洗除去铝层, 直至表面干净, 利用配有Lambda Physik 193 nm ArF准分子激光器的激光剥蚀系统和Finnigan-MAT Neptune MC-ICP-MS进行Sr同位素测试。考虑到耳石的矿物是文石, 因此选用由澳大利亚大堡礁的现代砗磲*Tridacna gigas*(SrCO_3)作为标准物质。激光剥蚀系统的操作条件设置为: 剥蚀时间30 s, 剥蚀前和剥蚀后各20 s, 束斑直径是95 μm , 工作频率是5 Hz, 激光能量密度 $\sim 10 \text{ J/cm}^2$ 。在测试标准物质砗磲后, 每测试一个样品点加一个标准物质, 依次测试。测试中沿

着耳石截面最长生长轴靠近O同位素的点剥蚀打点, 如图1中直线AD和EG。砗磲*Tridacna gigas*标样测定的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ (推荐值为0.709172)为 0.709157 ± 0.000020 ($2\sigma, n=15$)。

O和Sr同位素测试均在澳大利亚国立大学地球科学学院完成。

2 结果与讨论

2.1 青海湖裸鲤微耳石不同生长轴的 $\delta^{18}\text{O}$ 组成

一般来说, 青海湖裸鲤春夏时主要洄游到河流中, 河水中充足的光照及水温适合鱼类生长, 新陈代

谢加快,耳石的生长速率加快,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。由于耳石不同方向的生长率不同,不同方向的耳石轮纹宽窄不一。图2展示了青海湖裸鲤NC04微耳石2个生长轴($\delta^{18}\text{O}$ 组成,即图1中AB和AC两个方向。除了AC轴上一个高值以外,AB和AC两个生长轴上的 $\delta^{18}\text{O}$ 值能够一一对应,说明耳石轮纹在不同方向的沉积是同步的,记录了相同的信息,这与我们之前获得的微耳石长、短半轴上的Sr/Ca表现出同步的变化是一致的^[15]。

AB生长轴上的 $\delta^{18}\text{O}$ 变化范围为 $-5.89\text{‰} \sim +4.63\text{‰}$,平均值是 $+0.52\text{‰}$ 。相对于AB生长轴,AC生长轴上 $\delta^{18}\text{O}$ 变化较小,在 $-4.88\text{‰} \sim +3.46\text{‰}$ 之间(平均值为 $+1.29\text{‰}$),但波动较频繁。耳石中氧同位素比值主要受到水温和水中氧同位素组成的影响^[16],因此在同一时期内形成的耳石环带记录了相同的水化学信息。由于AC轴方向生长较慢,形成的轮纹较窄,那么在利用离子探针打点取样时,相邻两个打点可能分别记录了河水和湖水的信息或者两者的混合信息。相反地,AB轴生长较快,形成的耳石轮纹较宽,相邻2个或3个探针的点可能记录了同一水环境(湖水

或者河水)的信息。Dou等人^[17]对长江刀鲚耳石的X射线强度面分布也清晰地显示了最长生长轴上相同Sr含量的环带最宽。因此,为较全面地获得耳石轮纹记录的环境信息,在离子探针打点测试时,可直接选择最长轴进行。

2.2 青海湖裸鲤微耳石中O-Sr同位素组成对其洄游行为的指示

本文首次测定青海湖裸鲤微耳石轮纹的O-Sr同位素组成,得到了它们高分辨率的时序变化。相对于间歇带,青海湖裸鲤微耳石成长带中的 $\delta^{18}\text{O}$ 较低。如表2所示,NC01~NC08成长带中 $\delta^{18}\text{O}$ 的平均值都低于间歇带,两带 $\delta^{18}\text{O}$ 组成差异显著(U 检验 <0.05)。这是因为耳石的成长带是鱼体洄游到河水的期间内形成的,记录了河水较低的 $\delta^{18}\text{O}$ 组成,而青海湖湖水经长期演化富集 ^{18}O (表1)^[10,11],因此在湖水中形成的耳石间歇带的 $\delta^{18}\text{O}$ 值较高。同时,单个个体间歇带的 $\delta^{18}\text{O}$ 组成基本一致,但是各成长带 $\delta^{18}\text{O}$ 却存在不同程度的差异,一些较宽成长带中的 $\delta^{18}\text{O}$ 值还表现出波动变化(图3)。成长带 $\delta^{18}\text{O}$ 的这些差异除了受到河水温度和 $\delta^{18}\text{O}$ 组成季节性变化的影响外,还可能与个体的生命效应和洄游习性有关。譬如,各个鱼体洄游时间的长短,或洄游到河流的不同位置(例如,由于混合了湖水,靠近河口的河水具有与河流中、上游河水不同的 $\delta^{18}\text{O}$ 组成),乃至在洄游期往返于河湖之间,均可能造成成长带之间 $\delta^{18}\text{O}$ 的这些差异。

不同河流流域的岩性不一,导致河水中 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 不同,这种差异也反映在微耳石的锶同位素组成上^[18,19]。就布哈河这一青海湖流域最大的河流而言,尽管其河水的Sr同位素组成存在季节性变化($0.710645 \sim 0.711178$)^[12,13],但因其流域主要分布中生代海相灰岩和砂岩,其 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值(平均值 0.710993)远远低于其他河流。例如,泉吉河、黑马河与沙柳河流经的基岩包含火成岩和变质岩,它们 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 平均值分别是 0.711845 , 0.711896 和 0.712262 (表1)。作为一个汇,青海湖湖水的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 组成位于这些河流之间,且较为均一,其平均值为 0.711433 (图4)。这些具有差异性O-Sr同位素组成的水体为利用耳石的微化学示踪裸鲤的洄游提供了条件。

青海湖裸鲤微耳石的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值变化范围为 $0.711223 \sim 0.711947$,介于布哈河和沙柳河河水组成

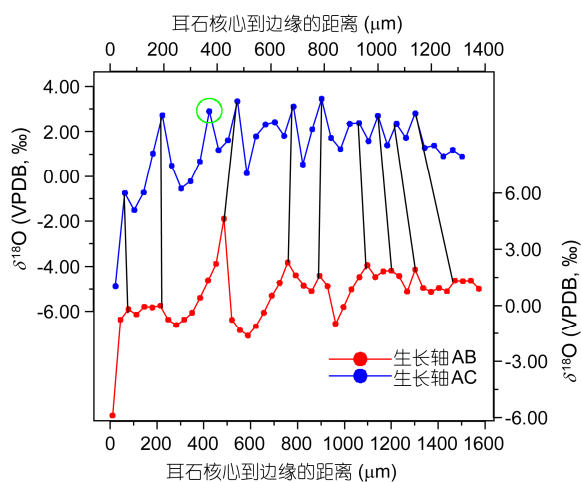


图2 青海湖裸鲤(NC04)微耳石2个生长轴(AB和AC)上 $\delta^{18}\text{O}$ 组成的时序变化和对应关系。除了个别点(绿色圆圈)外,两轴的值一一对应,表明不同方向的轮纹记录了相同的信息

Figure 2 The temporal $\delta^{18}\text{O}$ variations along the AB and AC growth axes of the naked carp NC04 otolith and their one-to-one correspondence at discontinuous zones. Except one point (green circle), the well correspondence of $\delta^{18}\text{O}$ values along the axes demonstrates that growth axes at different directions record the same information

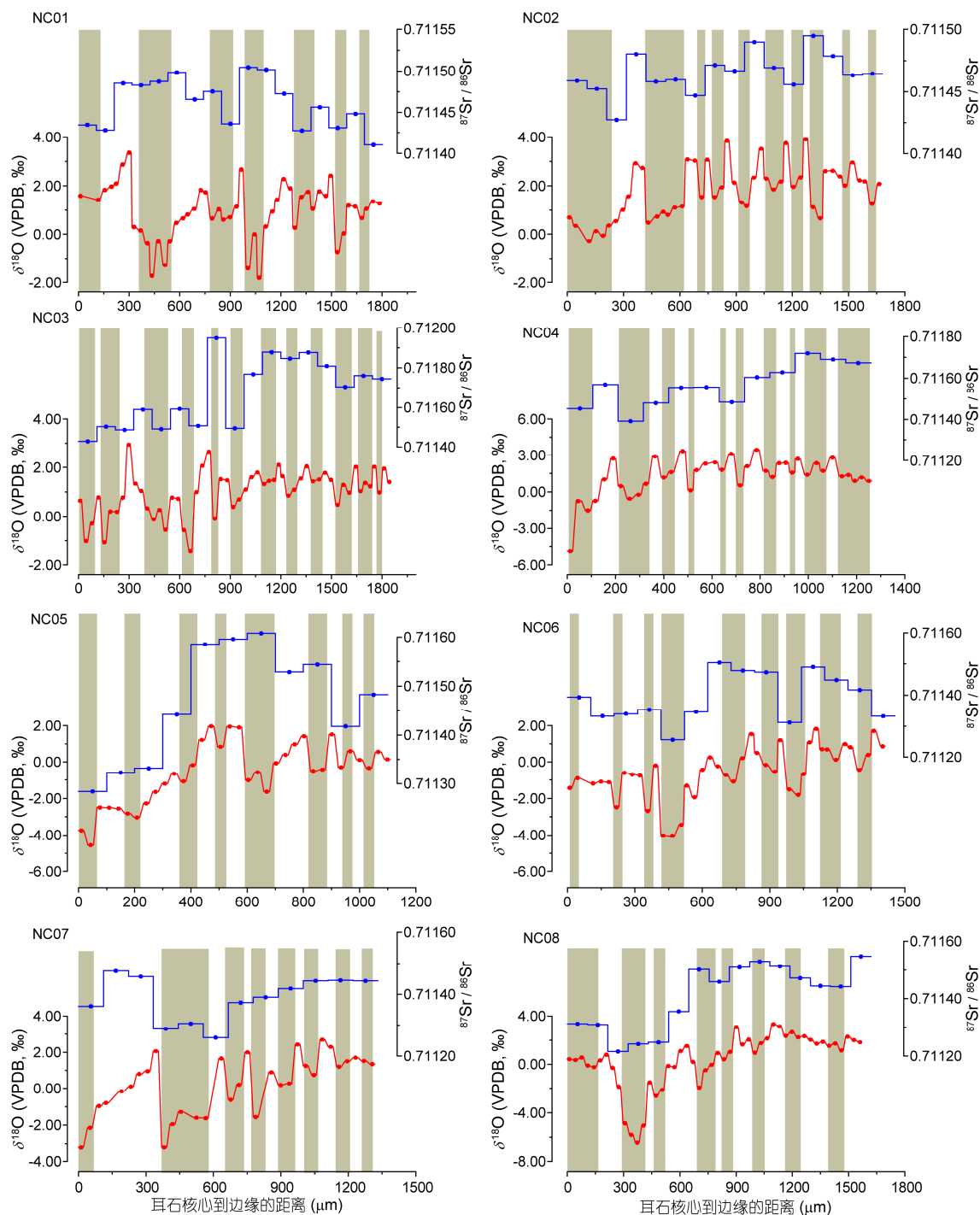


图3 青海湖裸鲤微耳石O-Sr同位素组成的时序变化。灰色条带是根据低 $\delta^{18}\text{O}$ 组成划分的成长带

Figure 3 The temporal variations of the O and Sr isotopic compositions of the naked carp otoliths. The gray bands show low $\delta^{18}\text{O}$ values corresponding to the otolith incremental zones

之间(图4)。由于激光打点直径比SHRIMP II大得多, 所得的微耳石Sr同位素的分辨率不及 $\delta^{18}\text{O}$ 高, 一个 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值对应2个或3个 $\delta^{18}\text{O}$ 值的打点范围, 因此很多Sr同位素数据包含了成长带和间歇带的混合信息,

未能与 $\delta^{18}\text{O}$ 划分的条带一一对应(图3)。尽管如此, 结合青海湖水和主要河水的O-Sr同位素组成, 青海湖裸鲤耳石轮纹中的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 与 $\delta^{18}\text{O}$ 比值的分布关系明确指示了耳石记录的水化学特征及鱼体的洄游习性。

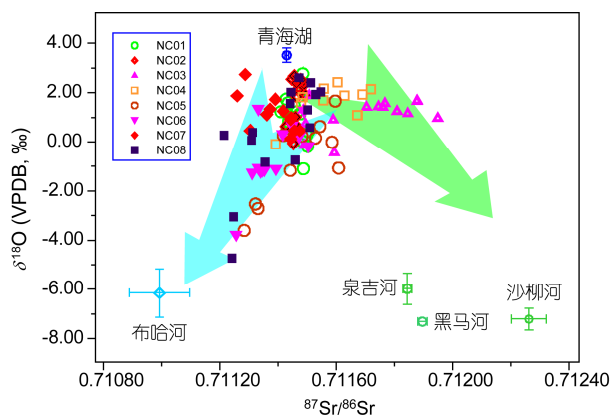


图4 青海湖裸鲤微耳石、青海湖湖水及主要河流的O-Sr组成的分布图。耳石轮纹中O-Sr同位素组成可有效区分不同裸鲤个体的洄游河流，蓝色和绿色箭头分别标示洄游到布哈河和其他河流的裸鲤个体的O-Sr组成特征

Figure 4 Isotopic covariance of O-Sr compositions of the Qinghai Lake naked carp otoliths, along with those of the lake and major river waters. The otolith O-Sr compositions can effectively distinguish migratory rivers of different naked carps. The blue and green arrows mark the characteristics of the O-Sr compositions for the naked carps migrating to the Buha River and other rivers, respectively

由图4可见，裸鲤耳石的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 与 $\delta^{18}\text{O}$ 比值具有两个明显的趋势：NC06、NC07和NC08的O-Sr同位素整体地趋向于布哈河的端元组成，而NC03和NC04主要趋向于沙柳河，或泉吉河和黑马河端元，NC05则两者兼而有之。由于在耳石轮纹形成过程中Sr同位素不会发生分馏作用^[6,7]，因此O-Sr同位素的这两个明显的趋势表明青海湖裸鲤多数个体可能更倾向于某一条固定的河流进行洄游产卵。例如，NC06、NC07和NC08可能在布哈河产卵繁殖后，主要固定于青海湖和布哈河之间的洄游，而NC03则主要固定于沙柳河洄游，NC04也主要在泉吉河、黑马河或沙柳河活动，并没有到布哈河的行为。与此同时，NC01和NC02的O-Sr同位素比值则比较集中，变化很小， $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比

值与湖水基本一致，这可能暗示着它们主要在河口附近活动的习性，或者它们在河流中停留的时间很短。这些结果说明，青海湖裸鲤的洄游可能更多地趋向于其孵化出生的河流，具有一定的固定性。NC05是一个例外，其靠近核心的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值偏低，并趋向于布哈河端元，而边缘的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值却转向黑马河或泉吉河端元(图3)，可能指示该鱼体并没有固定到其出生的布哈河进行洄游产卵。尽管如此，在某一个阶段它的洄游河流还是固定的。事实上，生物学家对青海湖裸鲤洄游群体的DNA数据已暗示了青海湖裸鲤的洄游可能具有种群固定性。例如，张春霖等人^[20]采用随机扩增多态性DNA (RAPD)方法对布哈河、黑马河及沙柳河3个洄游繁殖群体各30个个体的DNA多态性分析表明，沙柳河群体与布哈河及黑马河这两个群体之间的亲缘关系较远，难以进行遗传信息的传递。陈大庆等人^[21]则通过该3个裸鲤群体线粒体D-loop基因片段的比较，也发现这些群体间的基因交流较小。本研究则为青海湖裸鲤个体洄游河流的固定性提供了可靠的稳定同位素证据。

3 结论

利用精准的SHRIMP II 离子探针和LA-MC-ICP-MS对青海湖裸鲤微耳石轮纹中的O-Sr同位素组成进行了高分辨率原位测试。结果发现，青海湖裸鲤耳石生长轮纹的不同方向具有同步变化的 $\delta^{18}\text{O}$ 组成，其成长带中较低的 $\delta^{18}\text{O}$ 组成记录了春夏时期裸鲤所洄游河流的化学信息。由于不同河流和湖水差异性的化学组成，耳石轮纹中O-Sr同位素组成有效指示了不同裸鲤个体洄游到布哈河或者其他河流的行为，揭示了青海湖裸鲤多数个体可能更倾向于固定的河流进行洄游产卵的特性。

致谢 感谢澳大利亚国立大学地球科学学院的Kelsie Long, Les Kinsley和Rainer Grün对鱼耳石的前处理和O-Sr同位素测试的指导，以及中国科学院地球环境研究所汪进、贺茂勇、王玉娇，布哈河水文站邱新宁在采样过程中给予的帮助。

参考文献

- 1 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
- 2 Degens E T, Deuser W G, Haedrich R L. Molecular structure and composition of fish otoliths. *Mar Biol*, 1969, 2: 105–113

- 3 Thorrold S R, Campana S E, Jones C M, et al. Factors determining $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{18}\text{O}$ fractionation in aragonitic otoliths of marine fish. *Geochim Cosmochim Acta*, 1997, 61: 2909–2919
- 4 Patterson W P. North American continental seasonality during the last millennium: High-resolution analysis of sagittal otoliths. *Paleogeogr Paleoclimatol Paleoecon*, 1998, 138: 271–303
- 5 Weidman C R, Millner R. High-resolution stable isotope records from North Atlantic cod. *Fish Res*, 2000, 46: 327–342
- 6 Faure G, Powell J L. *Strontium Isotope Geology*. Berlin: Springer-Verlag, 1972. 78–91
- 7 Weber P K. Geochemical markers in the otoliths of Chinook salmon in the Sacramento-San Joaquin River System, California. Doctor Dissertation. Berkeley: University of California. 2002
- 8 Kennedy B P, Folt C L, Blum J D, et al. Natural isotope markers in salmon. *Nature*, 1997, 387: 766–767
- 9 Millera J A, Kent A J R. The determination of maternal run time in juvenile Chinook salmon (*Oncorhynchus tshawytscha*) based on Sr/Ca and $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ within otolith cores. *Fish Res*, 2009, 95: 373–378
- 10 Liu W G, Li X Z, Zhang L, et al. Evaluation of oxygen isotopes in carbonate as an indicator of lake evolution in arid areas: The modern Qinghai Lake, Qinghai-Tibet Plateau. *Chem Geol*, 2009, 268: 126–136
- 11 Cui B L, Li X Y. Characteristics of stable isotope and hydrochemistry of the groundwater around Qinghai Lake, NE Qinghai-Tibet Plateau, China. *Environ Earth Sci*, 2014, 71: 1159–1167
- 12 Jin Z D, Yu J M, Wang S M, et al. Constraints on water chemistry by chemical weathering in the Lake Qinghai catchment, northeastern Tibetan Plateau (China): Clues from Sr and its isotopic geochemistry. *Hydrogeol J*, 2009, 17: 2037–2048
- 13 Jin Z D, You C F, Yu J M, et al. Seasonal contributions of catchment weathering and eolian dust to river water chemistry, northeastern Tibetan Plateau: Chemical and Sr isotopic constraints. *J Geophys Res*, 2011, 116, doi: 10.1029/2011JF002002
- 14 Aubert M, Williams I S, Boljkovac K, et al. *In situ* oxygen isotope micro-analysis of faunal material and human teeth using a SHRIMP II: A new tool for palaeo-ecology and archaeology. *J Archaeol Sci*, 2012, 39: 3184–3194
- 15 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 [周玲, 金章东, 李福春, 等. 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. *中国科学: 地球科学*, 2012, 42: 1210–1217]
- 16 Nelson C S, Northcote T G, Hendy C H. Potential use of oxygen and carbon isotopic composition of otoliths to identify migratory and non-migratory stocks of the New Zealand common smelt: A pilot study. *New Zeal J Mar Fresh*, 1989, 23: 337–344
- 17 Dou S Z, Yokouchi K, Yu X, et al. The migratory history of anadromous and non-anadromous tapertail anchovy *Coilia nasus* in the Yangtze River Estuary revealed by the otolith Sr:Ca ratio. *Environ Biol Fish*, 2012, 95: 481–490
- 18 Ingram B L, Weber P K. Salmon origin in California's Sacramento-San Joaquin river system as determined by otolith strontium isotopic composition. *Geology*, 1999, 27: 851–854
- 19 Kennedy B P, Blum J D, Folt C L, et al. Using natural strontium isotopic signatures as fish markers: Methodology and application. *Can J Fish Aquat Sci*, 2000, 57: 2280–2292
- 20 Zhang C L, Chen D Q, Shi J Q, et al. Genetic diversity analysis of different populations of *Gymnocypris przewalskii* by RAPD (in Chinese). *J Fish Chin*, 2005, 29: 307–311 [张春霖, 陈大庆, 史建全, 等. 青海湖裸鲤繁殖群体遗传多样性的RAPD分析. *水产学报*, 2005, 29: 307–311]
- 21 Chen D Q, Zhang C L, Lu C, et al. Polymorphism of D-loop sequenc from mitochondrial genomes of brood-stocks of *Gymnocypris przewalskii* (Kessler) (in Chinese). *J Fish Sci Chin*, 2006, 13: 800–806 [陈大庆, 张春霖, 鲁成, 等. 青海湖裸鲤繁殖群体线粒体基因组D-loop区序列多态性. *中国水产科学*, 2006, 13: 800–806]

Oxygen and strontium isotope markers of Lake Qinghai naked carp otoliths and their implication for fish migratory pattern

ZHOU Ling¹, JIN ZhangDong^{1,2}, WILLIAMS Ian S³ & ZHANG Fei¹

¹ State Key Laboratory of Loess and Quaternary Geology, Institute of Earth Environment, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710061, China;

² Institute of Global Environmental Change, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

³ Research School of Earth Sciences, The Australian National University, Canberra ACT 0200, Australia

As the dominant and unique species in Lake Qinghai, the naked carp *Gymnocypris przewalskii* (Kessler) is characterized by upstream migration to spawn during late spring and summer in each year and back lake to live during the remaining seasons, but little is known about its migratory pattern. The migratory pattern of the naked carp is significant in understanding its living habitat and in protecting this precious fish. Otoliths are paired biogenic carbonates in the inner ear of teleost fish and grow layer by layer throughout the fish life. Owing to its metabolically inert without involvement in metabolic processes after deposition, chemical compositions of daily and annual growth increments in otoliths record the water elements of the ambient waters where the fish encountered during its life history. Therefore, microchemistry variation of otoliths has been used widely to trace migration pattern of fish and to reconstruct water chemistry and environmental conditions in the past.

The distinct water chemistry of the lake and rivers within the Lake Qinghai catchment provides a rare opportunity to trace migration pattern of the Lake Qinghai naked carp and past water compositions by using otolith microchemistry. In this study, the *in-situ* oxygen isotope ($\delta^{18}\text{O}$) and $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ratios of the otolith increments of eight Lake Qinghai naked carps were firstly analyzed using high-resolution SHRIMP II ion microprobe and laser ablation multicollector inductively coupled plasma mass spectrometry (LA-MC-ICP-MS) at Research School of Earth Sciences, The Australian National University, respectively. The analytical intervals of $\delta^{18}\text{O}$ and $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ratios along the otolith increment axes are 25 μm and 95 μm , respectively. The $\delta^{18}\text{O}$ results show (1) that one-to-one correspondence of the $\delta^{18}\text{O}$ values along two growth axes of the naked carp otolith demonstrates the same information at different directions of the otolith and (2) that low $\delta^{18}\text{O}$ in the otolith incremental zones record ambient river chemistry when the fish migrate to rivers during late spring and summer. One-to-one correspondence between $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ and $\delta^{18}\text{O}$ compositions along the otolith increment axes is not possible, since the analytical resolution of $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ data is much lower than that of $\delta^{18}\text{O}$. However, the covariance of $\delta^{18}\text{O}$ versus $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ compositions of the otoliths distinctly implies that the majority of the naked carps are more likely to migrate and spawn in one fix river where they were born. For example, when the otolith $\delta^{18}\text{O}$ versus $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ compositions of one fish point to the Buha River end-members, we infer that the fish favors to migrate to the Buha River where it was born. This implication is significant and helpful in understanding the migratory pattern of the naked carp and in protecting and managing this precious species in Lake Qinghai. This study also provides a good case for tracing fish migratory using paired stable isotopic compositions of otolith increments using high-resolution SHRIMP II ion microprobe and LA-MC-ICP-MS.

Lake Qinghai naked carp, otoliths, growth increments, O-Sr isotopes, migratory pattern

doi: 10.1360/N972015-00733