

青藏高原东部兴措湖生物壳体元素 及同位素记录的气候环境信息

吴敬禄¹ G. H. Schleser² 夏威岚¹ Andreas Lücke³
李世杰¹ 王苏民¹

(1:中国科学院南京地理与湖泊研究所,南京 210008;2:Forschungszentrum Jülich, D-52425 Jülich, Germany)

提要 通过对青藏高原东部若尔盖盆地兴措湖 50 年来 *Gyraulus sibirica* 壳体元素及同位素分析,并与器测气象资料的比较,建立了兴措湖记录与对应的降水和气温间的函数关系,探讨了湖泊记录所指示的气候环境意义。结果表明:青藏高原东部兴措湖地区腹足类生物在夏半年形成壳体,它所记录的是夏半年而不是全年的气候环境信息;*Gyraulus sibirica* 壳体 Mg/Ca 比及 $\delta^{18}\text{O}$ 指标与夏半年气温有一定的相关性,其中壳体 $\delta^{18}\text{O}$ 指标对气温变化更敏感, $\delta^{18}\text{O}$ 与夏半年气温滑动平均间的变率为 $1.64\%/\text{C}$,均值比为 $0.28\%/\text{C}$;Sr/Ca 比、 $\delta^{13}\text{C}$ 指标与夏半年的降水量关系较密切,尤其是 Sr/Ca 比随降水量波动呈显著相关变化,Sr/Ca 变化与降水间的平均变率($d(\text{Sr/Ca})/dP$)为 $-0.045/\text{mm}$ 。

关键词 青藏高原 兴措湖 微量元素 同位素 气候信息

分类号 P343.3 P467

过去气候环境的定量研究是全球变化领域的难点和热点,近年来,湖泊沉积记录在重建不同时间尺度气候环境研究方面发挥了重要的作用,同时在古气候信息定量提取方面也显示了巨大的潜力。但是由于湖泊沉积记录信息的混合性尤其是近期人类活动影响的叠加又使得分离、提取有效气候环境信息的难度大大增加,限制了湖泊档案在过去全球变化定量研究中的作用。因此,在湖泊沉积记录中寻找敏感的气候环境代用指标并利用有效的数理方法定量提取气候环境信息是利用湖泊档案进行高分辨率恢复历史时期气候环境序列的关键。湖泊生物体碳酸盐同位素及其微量元素(尤其是 Mg、Ca、Sr 元素)气候代用指标在过去全球变化定量研究中的挖掘、验证和应用一直为一些国际合作研究计划所倡导,并在近年取得了较好的成果^[1-2]。但是,由于湖泊生物在形成壳体过程中壳体所含同位素组成及其元素含量受多种因素控制(例如碳酸盐氧同位素组成受流域降水的 $\delta^{18}\text{O}$ 和湖水的 $\delta^{18}\text{O}$ 组成、碳酸盐的沉积过程及沉淀时的环境温度等因素影响;壳体 Mg、Sr 等元素吸收与周围水体温度、盐度及水体中相应元素浓度等因素有关),故它们作为气候代用指标仍有一定的不确定性因素。因此,利用不同气候区湖泊记录进行古气候重建时,尚需加强对湖泊现代沉积过程及环境的研究,对气候环境代用指标的应用背景进行深入的研究,以便对它作出更客观的解译。

在本文中,笔者根据兴措湖 *Gyraulus sibirica* 壳体同位素组成、元素含量的变化特征,并

• 国家自然科学基金(49803001)及国家重点基础研究发展规划项目(G1998040800)联合资助项目。

收稿日期:2001-02-08;收到修改稿日期:2001-06-06。

吴敬禄,男,1965 年生,博士,副研究员,E-mail:w.jinglu@niglas.ac.cn

与器测降水、温度资料比较,进行兴措湖沉积记录的气候环境信息定量提取研究,为有效重建长尺度历史时期气候环境特征提供基础。

1 区域概况

兴措湖位于青藏高原东北部若尔盖盆地中部($102^{\circ}20' - 102^{\circ}24' E; 33^{\circ}54' - 33^{\circ}50' N$),为丘陵间断陷小盆地,盆地三面由高3500~3600m山地环绕,西南侧有一相对较宽广的谷地。兴措湖现代湖面海拔高3425m,湖泊面积 2km^2 ,流域面积 29km^2 。野外地质地貌考察发现,在其周围分布有明显的两级古湖岸阶地。在大约2万年开始的黄河袭夺若尔盖古湖后^[3],兴措湖渐渐脱离若尔盖古湖而形成一个独立封闭的水体^[4]。目前湖水主要由流域大气降水及部分地下水补给。所以从地形地貌及湖泊水文学角度分析,兴措湖是历史时期气候环境恢复研究的理想地区。

2 样品和分析

2.1 ^{137}Cs 和 ^{210}Pb 年代测定

将获得的SXC孔连续沉积样柱以间隔1cm分样,装盒。回实验室烘干,称净重,求出质量深度。测量 ^{137}Cs 和 ^{210}Pb 的仪器是美国OTEC公司的OTEC919型高纯锗低本底 γ 谱仪(外加 α 探头)。

2.2 同位素及元素分析

在室内以间隔1cm挑选腹足类螺,经鉴定后,选取连续单种*Gyraulus sibirica*。将*Gyraulus sibirica*壳体在1%双氧水溶液中浸泡12h,然后以蒸馏水超声波洗刷干净、烘干,研磨至粉末(<100目),供同位素及Sr、Ca、Mg元素测定分析备用。

称取100 μg 粉样置于英国AP公司(AAnalytical Precision)生产的预处理系统中加100%浓磷酸恒温(70℃)反应12h分解碳酸钙制取CO₂气体,最后在Finigan Model-252型质谱仪上测定CO₂气体的氧、碳同位素,测试以PDB标准。实验误差 $\delta^{13}\text{C}$ 为 $\pm 0.1\text{‰}$, $\delta^{18}\text{O}$ 为 $\pm 0.2\text{‰}$ 。

称取1mg粉样酸溶,然后采用Thermo IRIS ICP-OES同时测定壳体的Sr、Ca、Mg含量。

3 实验结果及分析

以 ^{137}Cs 和 ^{210}Pb 测定结果为基础,根据SXC孔岩心的沉积速率对采集样品深度进行了年代率定^[4]。在此基础上,通过与气象资料耦合,重点对SXC孔近50年来沉积样品(钻孔上部10cm)中腹足类*Gyraulus sibirica*壳体同位素及Sr、Ca、Mg指标所记录的气候环境意义进行探讨。

3.1 50年来兴措湖*Gyraulus sibirica*壳体同位素及元素特征

早期的研究表明腹足类壳体碳酸盐是在与周围水体处于同位素平衡状态下形成,并且形成的碳酸盐 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 组成在沉积后过程中保持不变^[5]。壳体碳酸盐 $\delta^{18}\text{O}$ 组成受壳体形成时周围水体的氧同位素(受降水及湖水滞留时间等因素控制)、盐度及温度等因素影响,而影响碳同位素的因素有湖水的硬度、湖泊初级生产力、水溶解CO₂浓度等。对于生物壳体Mg/Ca、Sr/Ca组成,影响因素有壳体形成时周围水体的Mg²⁺浓度、Sr²⁺浓度、水体盐度及温度、水体的离子成分及水动力状况等。国内外研究表明^[1,2,5-7],生物壳体同位素及元素记录是有效的

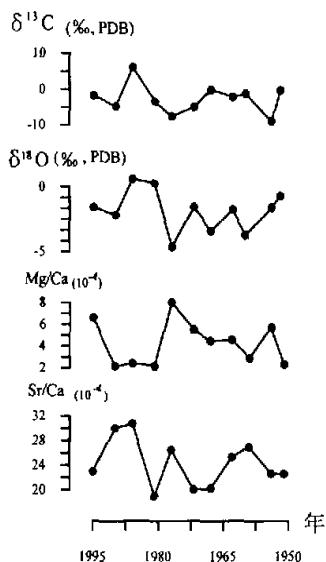


图 1 近 50 年 *Gyraulus sibirica* 壳体同位素及元素变化特征

Fig. 1 Stable isotope and trace elements in the shells *Gyraulus sibirica* in the recent 50 years

生存的水体环境直接相关,客观地记录了当时气候环境变化特征。

3.2 兴措湖 *Gyraulus sibirica* 壳体同位素及元素记录与器测气象资料的比较

将湖泊沉积物环境代用指标与现代器测资料的比较研究是定量恢复古气候环境的重要步骤。通过比较研究,可以更精确地建立气候环境代用指标与气候间的内在关系,从而利用环境代用指标客观地进行古气候环境的恢复研究。考虑到 SXC 孔沉积物的分辨率所限(平均 1cm 为 3—5 年)及 *Gyraulus sibirica* 的生活期限,笔者将附近若尔盖县气象站测得的年均气温及年降水量资料与 *Gyraulus sibirica* 壳体 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ 指标、Mg/Ca 比及 Sr/Ca 比指标进行比较,结果发现 Mg/Ca 比、 $\delta^{18}\text{O}$ 指标与当地气温有一定的相关性,取夏半年(4 月、5 月、6 月、7 月、8 月)五个月的气温平均值比较此种关系更显著(图 2),而 Sr/Ca 比、 $\delta^{13}\text{C}$ 指标与夏半年的降水量关系也相当密切(图 3)。据此推断,兴措湖 *Gyraulus sibirica* 壳体可能主要在夏半年形成,同时也表明青藏高原东部地区湖泊生物壳体元素及氧、碳同位素指标记录的是夏半年气候环境信息,而不代表全年的气候信息。

图 2 表明, $\delta^{18}\text{O}$ 变化曲线不仅与气温波动总体趋势一致,而且在一些细节上也有较好的可比性。20 世纪 50 年代到 60 年代中期,研究区气温为近 50 年来最高时期,但在约 1960 年前后有一次较大幅度的降温,与此对应, $\delta^{18}\text{O}$ 值在约 1960 年左右也出现一次明显的偏负;从 60 年代中期到 70 年代末的近 15 年内,气温曲线呈现为低谷期,其中包含约 1972 年一次温度回返和分别约 1969 年和 1977 年两次明显降温事件, $\delta^{18}\text{O}$ 值在相应气温曲线的高温期表现为高

气候变化指示计。图 1 是近 50 年来兴措湖 *Gyraulus sibirica* 壳体同位素及元素的测定结果。从图 1 可知,20 世纪 50 年代初期 $\delta^{18}\text{O}$ 值较高,其后缓慢降低,到 50 年代末 $\delta^{18}\text{O}$ 值降为低值;从 50 年代末到 70 年代末的近 20 年时间, $\delta^{18}\text{O}$ 值总体偏低,但其间几次高低波动较为明显,1977 年前后是 $\delta^{18}\text{O}$ 曲线的一个最低值期,随后 $\delta^{18}\text{O}$ 曲线快速升高到近 50 年最高峰并维持近 10 年后迅速回落,但尚处于较高阶段并一直至今。对应于 $\delta^{18}\text{O}$ 值变化, $\delta^{13}\text{C}$ 曲线总体上保持一致的变化趋势,除了在大约 1954 年、1977 年出现两次明显低谷和约 1985 年一次峰值外, $\delta^{13}\text{C}$ 波动相对较为平缓。Mg/Ca 比指标与 $\delta^{18}\text{O}$ 变化有呈负相关趋势。Sr/Ca 比指标近 50 年来曲线为三峰两谷特征,60 年代末 70 年代初及 80 年代初为 Sr/Ca 比值低值时期。

从 $\delta^{18}\text{O}$ 、 $\delta^{13}\text{C}$ 、Mg/Ca 比及 Sr/Ca 比各项指标的变化特征分析,70 年代后期指标与前期相比都出现了明显的变化, $\delta^{18}\text{O}$ 、 $\delta^{13}\text{C}$ 及 Sr/Ca 比突然增高,而 Mg/Ca 比值陡然降低,这与 70 年代后期兴措湖退缩、水深变浅改变了活体 *Gyraulus sibirica*

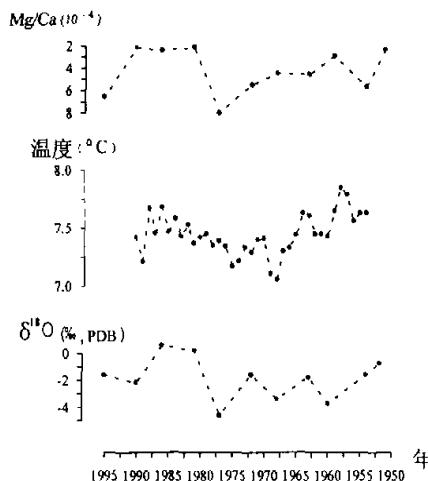


图2 *Gyraulus sibirica* 壳体 Mg/Ca 比、 $\delta^{18}\text{O}$ 含量与对应夏半年气温滑动平均变化曲线

Fig. 2 Comparison of Mg/Ca ratio, $\delta^{18}\text{O}$ values in *Gyraulus sibirica* shells and relative summer running average air temperature in the past 50 years

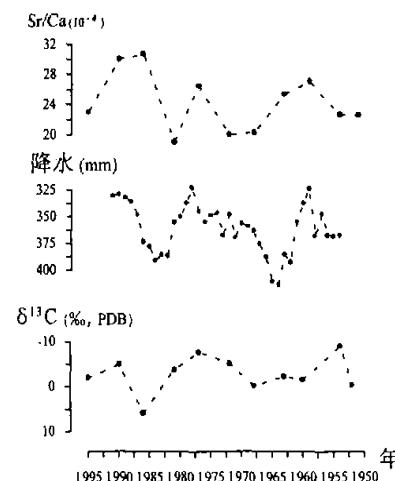


图3 *Gyraulus sibirica* 壳体 Sr/Ca 比、 $\delta^{13}\text{C}$ 含量与对应夏半年降水滑动平均变化曲线

Fig. 3 Comparison of Sr/Ca ratio, $\delta^{13}\text{C}$ values in *Gyraulus sibirica* shells and relative summer running average precipitation in the past 50 years

值段。80年代无论温度曲线还是 $\delta^{18}\text{O}$ 曲线都为峰值段,到90年代,气温回落, $\delta^{18}\text{O}$ 曲线也随之降低。以上分析表明,*Gyraulus sibirica* 壳体 $\delta^{18}\text{O}$ 变化主要与温度相关,温度高则对应 $\delta^{18}\text{O}$ 值偏正,但 $\delta^{18}\text{O}$ 变化幅度与温度的变幅并不一致,近50年来 $\delta^{18}\text{O}$ 值除主要与温度有关外,还受其它因素影响。 Mg/Ca 比除70年代中期有一次低值期外,整体变化较为缓慢,与温度间也存在一定的负相关性。

比较近50年来*Gyraulus sibirica* 壳体Sr/Ca比与夏半年降水量曲线(图3)可知,两者无论是总体趋势,还是在细节变化上都有较好的可比性。Sr/Ca比三次高值期分别对应与三次降水低值期对应,而80年代中期的降水峰值与Sr/Ca比低值段对应,两者表现为明显的负相关。*Gyraulus sibirica* 壳体 $\delta^{13}\text{C}$ 与降水量曲线两者虽然在细节变化上有些差别,但在总体上变化较为一致,降水量曲线峰值对应 $\delta^{13}\text{C}$ 高值。60年代和80年代两次 $\delta^{13}\text{C}$ 曲线峰值与降水高值段对应,70年代降水偏少,而对应的 $\delta^{13}\text{C}$ 值也偏负。由于控制生物壳体 $\delta^{13}\text{C}$ 变化的湖水硬度、水溶解 CO_2 含量及水化学等因素直接受降水量变化影响,因此,生物壳体 $\delta^{13}\text{C}$ 变化与降水间有一定的相关性,但两者之间在变化细节及变幅上的差异也表明了影响生物壳体 $\delta^{13}\text{C}$ 的因素更为复杂。

3.3 兴措湖 *Gyraulus sibirica* 壳体同位素及元素记录的气候信息量化研究

对于一个封闭湖泊系统而言,影响湖面波动及湖水物理、化学、生物变化的主要因素是大气降水和温度。湖泊生物的生长、发育、死亡与其生存的环境水温、水质及水位变化等因素直接相关。所以,大气温度及降水通过影响湖泊水体温度、湖泊物理化学及湖面的变化而间接影响

生物体的形成、发育,从而控制生物壳体中稳定氧、碳同位素各组分间的迁移或富集,即所有种种变化的综合效应被生物壳体中元素及同位素指标所记录。因此,可以通过一些数学物理方法对生物壳体记录所蕴含的气候信息进行定量或半定量复原。

运用最小二乘法对兴措湖近 50 年来 *Gyraulus sibirica* 壳体 Mg/Ca 比、 $\delta^{18}\text{O}$ 指标与器测夏半年平均气温 (T) 间进行一元线性回归分析,获得线性回归方程: $\text{Mg/Ca} = -3.49T + 30.23$, 相关系数为 0.47, 未通过信度检验; $\delta^{18}\text{O} = 1.64T - 14.36$, 相关系数为 0.89, 通过信度检验。因此可以推断,壳体氧同位素指标较 Mg/Ca 指标更敏感地指示了壳体形成时的温度变化。从回归方程可以得到 $\delta^{18}\text{O}$ 与气温间的平均变率 ($d\delta^{18}\text{O}/dT$) 为 $1.64\%/\text{C}$, 表明若尔盖地区夏半年温度滑动平均每年变化 1C , 直接和间接导致 *Gyraulus sibirica* 壳体 $\delta^{18}\text{O}$ 的变化效应平均在 1.64% , 显示了生物壳体 $\delta^{18}\text{O}$ 对温度变化的敏感性。近 50 年来 *Gyraulus sibirica* 壳体 $\delta^{18}\text{O}$ 的平均值为 -2.1% , 对应夏半年平均气温为 7.4C , 由此获得的 $\delta^{18}\text{O}$ 与温度比值为 $0.28\%/\text{C}$ 。生物壳体 $\delta^{13}\text{C}$ 指标与器测夏半年降水 (P) 间的一元线性回归方程为: $\delta^{13}\text{C} = 0.027P - 8.047$, 其相关系数为 0.71, 通过信度检验; $\text{Sr/Ca} = -0.045P + 40.72$, 其相关系数为 0.87, 通过信度检验。较稳定碳同位素指标, Sr/Ca 比更能体现有效蒸发的变化。 Sr/Ca 比变化与降水间的平均变率 ($d(\text{Sr/Ca})/dP$) 为 $-0.045/\text{mm}$, 表明研究区夏半年降水滑动平均每变化 10mm 的结果可以间接引起 -0.45 的 Sr/Ca 比值波动。

4 结论与讨论

将器测时期湖泊沉积物气候代用指标变化信息与器测气象资料比较、验证并获得函数关系,是定量恢复历史时期气候变迁最有效的途径之一。笔者通过对若尔盖盆地兴措湖近 50 年来 *Gyraulus sibirica* 壳体 $\delta^{18}\text{O}$ 、 $\delta^{13}\text{C}$ 指标及 Sr/Ca 比、 Mg/Ca 比指标与相应器测降水、温度资料的比较,对它们包含的气候信息进行了定量探讨。从本文的结果看,封闭湖泊(例如兴措湖)生物壳体 $\delta^{18}\text{O}$ 指标及 Sr/Ca 指标是揭示壳体形成时温度和降水变化的有效指标,尤其对于浅水湖泊更是如此。一些研究显示,湖泊碳酸盐氧同位素主要由温度控制,温度高,利于碳酸盐富集重氧同位素^[6,8]。但是在一些环境条件下,例如贫氧同位素的冰融水以及流域水文特征的变化等因素都将影响湖泊水体氧同位素组成,进而有可能成为影响碳酸盐氧同位素组成的主要因素^[9]。兴措湖自 20kaBP 前后渐渐成为封闭湖泊,湖泊水体环境相对稳定,流域水文情势简单。*Gyraulus sibirica* 壳体 $\delta^{18}\text{O}$ 指标与夏半年温度滑动平均明显呈正相关系,表明影响 *Gyraulus sibirica* 壳体氧同位素的主要因素为温度,这也与笔者先前的研究较为一致^[7]。笔者认为这种统计学上关系至少包含两层意义,一是温度变化直接影响生物壳体形成时的同位素平衡交换;二是温度变化通过影响生物壳体的生存环境(湖水硬度及湖水氧同位素组成等)而间接影响壳体氧同位素。*Gyraulus sibirica* 壳体 Sr/Ca 比与降水呈负相关(与湖水盐度呈正相关),这一结果与 Patrick 等对介形虫壳体的研究结果相一致^[10]。运用统计学方法对生物壳体 $\delta^{18}\text{O}$ 指标及 Sr/Ca 比与相应器测温度、降水资料进行量化分析,建立了函数关系,并获得 $\delta^{18}\text{O}$ 与夏半年气温滑动平均间的变率为 $1.64\%/\text{C}$, 均值比为 $0.28\%/\text{C}$; Sr/Ca 比变化与降水间的平均变率 ($d(\text{Sr/Ca})/dP$) 为 $-0.045/\text{mm}$ 。本文中,笔者在现有基础上将壳体记录与气候参数间复杂关系进行了简单线性分析,其中的一些问题尚待进一步讨论。但目前有关湖泊腹足类壳体元素及同位素与气候参数量化关系方面的研究报道很少,而深海有孔虫壳体 $\delta^{18}\text{O}$ 与海水

温度间的平均变率为 $0.2\text{‰}/^{\circ}\text{C}$,这一结果为大多数研究者所接受^[5].有关 $\delta^{18}\text{O}$ 与温度间关系报道较多的是降水 $\delta^{18}\text{O}$ 与气温方面的研究结果,由于水汽来源及大气环流格局差异,不同地区形成降水的过程复杂,加上受地形、海拔等因素影响,不同地区降水 $\delta^{18}\text{O}$ 与气温间的有关量值差别很大,在 $0.18\text{‰}/^{\circ}\text{C}$ 至 $0.98\text{‰}/^{\circ}\text{C}$ 间都有报道^[11,12].对于湖泊水体尤其是浅水湖泊系统水温受陆地气温影响而变幅较大,因此,湖泊生物壳体 $\delta^{18}\text{O}$ 与温度间(尤其与气温间)的平均变率比海洋的大.随着不同地区不同湖泊相关研究的开展,相信各湖区间湖泊碳酸盐 $\delta^{18}\text{O}$ 与气温间的统计量值将会有所差别.也因为于此,笔者认为利用湖泊记录进行有效地历史气候恢复,需要加强湖区及流域现代过程研究,用器测资料来标定研究区湖泊记录的替代气候环境指标,从而利用所标定的气候环境代用指标对湖泊记录的历史气候环境信息进行客观地恢复.

致谢 中国科学院南京古生物研究所潘华章研究员帮助腹足类鉴定;壳体同位素及元素分析在德国 Jülich 研究中心完成.羊向东副研究员及李万春博士协助野外工作,在此表示感谢.

参 考 文 献

- 1 Grafenstein U, Helmut E, Achim B, et al. A mid-European decadal isotope-climate record from 15,500 to 5000 years B. P. *Science*, 1999, **284**:1654–1657
- 2 张彭熹,张保珍.青海湖全新世以来古环境参数的研究.第四纪研究,1994,(3):225–336
- 3 王云飞,王苏民,薛 滨等.黄河袭夺若尔盖古湖时代的沉积学依据.科学通报,1995,14(8):723–725
- 4 吴敬禄,李世杰,王苏民等.若尔盖盆地兴措湖沉积记录揭示的近代气候环境.湖泊科学,2000,12(4):291–296
- 5 Bowen R. Isotopes and Climates. London: Elsevier Applied Science, 1990. 140–75
- 6 Gasse F, Arnold M, Li B Y, et al. A 1300-year climate record from western Tibet. *Nature*, 1991, **353**(24):742–747
- 7 Wu J L, Wang S M, Pan, H X. et al., Climatic variations in the past 140ka recorded in core RM, east Qinhai-Xizang Plateau, *Science in China(D)*, 1997, **27**(3):154–161
- 8 吴敬禄,王苏民.青藏高原东部 RM140ka 以来湖泊碳酸盐同位素记录的古气候特征.中国科学(D辑),1997,27(3):154–161
- 9 卫克勤,林瑞芬.内陆封闭湖泊自生碳酸盐氧同位素剖面的古气候意义.地球化学,1995,24(3):215–223
- 10 Patrick D D, Allan R, Chivas J, et al. Uptake of Mg and Sr in the euryhaline ostracod *Cyprideis* determined from in vitro experiments. *Paleocean Paleoclim Paleol*, 1999, **148**:105–116
- 11 Stuiver M. Oxygen and carbon isotope ratios of fresh water carbonates as climatic indicators. *J Geophys Res.*, 1970, **75**:5247–5257
- 12 Abell P. Oxygen isotope ratios in modern African gastropod shells: a data base for palaeoclimatology. *Chem Geol*, 1985, **58**:183–193

Climatic Signals Recorded in Stable Isotope and Trace Elements of Shells in Xincuo Lake, Eastern Tibetan Plateau

WU Jinglu¹ G. H. Schleser² XIA Weilan¹ Andreas Lücke²
LI Shijie¹ WANG Suming¹

(1; Nanjing Institute of Geography and Limnology, CAS, Nanjing 210008, P. R. China;

2; Forschungszentrum Jülich, D-52425 Jülich, Germany)

Abstract

Here we displayed the results of trace elements and stable isotope in shell *Gyraulus sibirica* continuously preserved in the sediments of Xincuo Lake, Eastern Tibetan Plateau, in the past 50 years. By coupling these indexes and instrumental meteorological data in its basin, we probed quantitatively modern climatic signals recorded in these indexes to build relative function relations. The results showed that gastropod shells in Xincuo Lake were formed in summer half year, so that trace elements, stable isotope in shells just recorded the climatic signals of the summer half year instead of those of the whole year, Mg/Ca ratio and $\delta^{18}\text{O}$ proxy had a certain correlativity with summer half year air temperature, in which $\delta^{18}\text{O}$ proxy was more sensitive with variability of $\delta^{18}\text{O}$ to temperature $d\delta^{18}\text{O}/dT = 1.64\%/\text{C}$; As to Sr/Ca ratio and $\delta^{13}\text{C}$ proxy, especially Sr/Ca ratio, there had a close correlation with summer half year precipitation, in which the variability of Sr/Ca to precipitation $d(\text{Sr/Ca})/dP = -0.045/\text{mm}$.

Key Words Xincuo Lake, trace element, stable isotope, modern climate, Tibetan Plateau