

青海湖意外湖花介 (*Limnocythere inopinata* Bird) 壳体稳定氧同位素组成对盐度的可能响应*

李祥忠¹, 刘卫国^{1,2}

(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: 西安交通大学人居环境与环境学院, 西安 710049)

摘要: 介形类壳体的氧同位素组成已成为恢复湖区古气候/古环境的有效代用指标, 而其氧同位素分馏及环境意义目前还缺乏研究. 为评价青海湖介形类壳体氧同位素分馏及其环境意义, 在青海湖进行系统的表层沉积物和水样的采集, 测定表层沉积物中的意外湖花介 (*Limnocythere inopinata* Bird) 和相应水样的氧同位素组成. 结果表明: 意外湖花介壳体的氧同位素组成主要受控于水体的氧同位素组成, 除温度的影响外, 还可能受到盐度的影响, 随着盐度变化, 该种壳体与水体之间的同位素分馏呈减小趋势, 而两者的氧同位素组成均呈偏正趋势. 青海湖意外湖花介壳体的氧同位素组成在一定程度上可能间接反映水体盐度的变化, 值得进行更深入的研究.

关键词: 青海湖; 意外湖花介; 氧稳定同位素; 盐度

The stable oxygen isotopic composition of ostracoda *Limnocythere inopinata* Bird and its possible response to water salinity in Lake Qinghai

LI Xiangzhong¹ & LIU Weiguo^{1,2}

(1: State Key Laboratory of Loess and Quaternary Geology, Institute of Earth Environment, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710075, P. R. China)

(2: School of Human Settlement and Civil Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, P. R. China)

Abstract: The oxygen isotopic composition of ostracod shells has been used as a useful indicator in paleolimnological research. But studies on the oxygen isotopic fractionation of ostracod shells and its environmental significance were still not enough. In this study, surface sediments and co-existing water were systematically collected at different sites in Lake Qinghai. The oxygen isotopic composition of lake water and ostracod shells of *Limnocythere inopinata* Bird selected from the surface sediments were measured to test the oxygen isotopic fractionation of ostracod shells and evaluate its environmental significance in Lake Qinghai. Our results show that the oxygen isotopic composition of *L. inopinata* is mainly controlled by the water isotope and the oxygen isotopic fractionation between ostracod shells and water is not only affected by temperature but also maybe by water salinity. The oxygen isotopic fractionation factor of ostracod shells reduces with increasing water salinity, eliminating the effect of temperatures. However, the oxygen isotopic compositions of both ostracod shells and water become enriched with increasing salinity in Lake Qinghai. The oxygen isotopic composition of *L. inopinata* may be used to indicate the variability of salinity in Lake Qinghai, and further works need to be done in future.

Keywords: Lake Qinghai; *Limnocythere inopinata* Bird; oxygen stable isotope; salinity

介形类是一种水生双壳类动物, 其壳体的主要成分为方解石, 故而适于碳、氧同位素测定. 由于介壳类的碳、氧同位素组成直接来源于其所生存的水体, 并且受众多环境参数的影响, 故而介壳类的碳、氧同位素组成变化可以用来反映其生存水体的环境信息, 被广泛用于湖泊古环境重建^[1-10].

介形类壳体氧同位素组成不仅受到其生长水体的氧同位素组成的控制, 其氧同位素分馏作用还受温度的影响^[9-11]. 近二十年来, 对现生介形类的氧同位素分馏效应进行了大量研究, 不同种属以及不同生长阶段介形类之间的同位素分馏差异及其原因成为研究的热点. 通过不同温度下的培养实验, Xia 等^[11]发现介形

* 国家自然科学基金项目(41003011, 41073018)和黄土与第四纪地质国家重点实验室自主部署课题(ZYSQ0811)“西部之光”博士项目(2011)联合资助. 2011-10-24 收稿; 2012-02-21 收修改稿. 李祥忠, 男, 1979 年生, 博士, 助理研究员; E-mail: lixiangzhong@ieecas.cn.

类 *Candona rawsoni* 与水体的氧同位素分馏存在着微弱的生物分馏效应,可能是由于介形类在形成壳体的早期阶段旺盛的新陈代谢活动所造成的. Von Grafenstein 等^[12]发现,生长在相同环境中的不同种属介形类的氧同位素组成存在显著差异,由此推断不同种属介形类的“生命效应”是导致上述差异的可能原因,同时认为介形类的“生命效应”受温度影响,且同一种属介形类的“生命效应”在不同生长阶段保持不变. Keatings 等^[13]发现,生长在淡水环境中的介形类有较高的氧同位素分馏效应,介形类的氧同位素组成较达到氧同位素平衡分馏的方解石偏正约 3‰. 然而,上述研究均认为介形类的氧同位素分馏因种属和生长阶段不同而存在差异,而且其成壳速度以及成壳时水体的 pH 值是导致这一差异的可能原因^[13].

有关咸水介形类 *Eucypris mareotica* 氧同位素分馏的研究显示,该种与水体之间基本达到了氧同位素分馏平衡,并且其壳体与生长水体之间的氧同位素分馏系数,远远小于相同温度下其他淡水介形类的氧同位素分馏系数^[14];据此推断,咸水介形类的氧同位素分馏大小除受温度的控制外,可能还受水体盐度和 CO_3^{2-} 浓度的影响^[14]. 但是,该研究并未测定 *E. mareotica* 生长水体的盐度和 CO_3^{2-} 浓度的大小,无法给出较确切的结论. Liu 等^[15]系统研究了青海湖表层沉积物介形类及总碳酸盐氧同位素组成的分布特征,结合湖水的水化学参数,分别讨论了温度和盐度对碳酸盐氧同位素分馏的影响,提出湖水 $\text{HCO}_3^-/\text{CO}_3^{2-}$ 比值可能会影响湖泊碳酸盐与湖水之间的氧同位素分馏,并且总碳酸盐和介形类的氧同位素组成变化可能反映湖水盐度的变化. 但是,该研究在讨论盐度与介形类氧同位素组成的关系时,并没有剔除温度的影响^[15]. 鉴于此,本文在已经发表青海湖湖水温度变化数据的基础上^[16-17],剔除温度影响后,重新分析了青海湖不同水深表层沉积物中意外湖花介 (*Limnocythere inopinata*) 及相应湖水的氧同位素数据^[15],粗略探讨介形类 *L. inopinata* 的氧同位素组成对湖水盐度可能的响应,进而为利用第四纪普遍出现的介形类 *L. inopinata* 的氧同位素组成,结合其他环境代用指标为进行湖泊盐度的恢复提供理论和实验基础.

1 材料和方法

1.1 样品采集处理及测试分析

2006 年 6 月,利用自制重力钻在青海湖不同深度的 23 个样点,采集现代湖底表层 0~2 cm 沉积物,同时采集水样(图 1),水样经孔径为 0.7 μm 的滤纸过滤后密封,带回实验室后冷藏保存. 具体样品处理和分析方法详见文献[15].

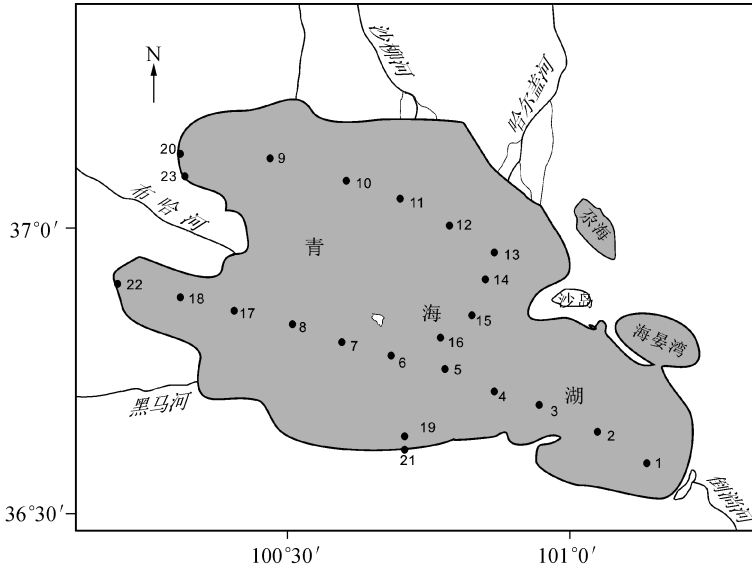


图 1 青海湖样点分布

Fig. 1 Distribution of sampling sites in Lake Qinghai

1.2 温度校正

青海湖意外湖花介 (*L. inopinata* Bird) 营底栖生活且成年壳体多形成于夏季^[18-19],而青海湖夏季底部平

均水温约为 4~6℃,表层平均水温约为 13~16℃^[16],并且据《青海湖综合考察报告》^[17],青海湖夏季存在显著的温度分层现象,且表层最高水温可达 18.9℃,底部最低水温达 6℃.显然,采自浅水的意外湖花介成壳温度明显高于深水区的成壳温度,但青海湖底部和表层水体的氧同位素组成几乎一致^[15].对于方解石来说,温度每升高 1℃其 $\delta^{18}\text{O}$ 值降低约 0.24‰^[20].因此,本文假设小于 1.5 m 深处的 *L. inopinata* 生成温度平均比深水区高约 10℃,而在水体氧同位素组成不变的情况下,10℃的温度差异会导致介壳的氧同位素组成偏负约 2.4‰左右,因此将采自水深小于 1.5 m 的意外湖花介壳体的 $\delta^{18}\text{O}$ 值统一加上 2.4‰来校正温度的影响.

2 结果与讨论

青海湖 *L. inopinata* 壳体 $\delta^{18}\text{O}$ 值的变化范围约为 -0.70‰~4.78‰,湖水的 $\delta^{18}\text{O}$ 值约为 -0.57‰~3.71‰,湖水盐度范围为 8.9~16.5 g/L,经温度校正后介壳的 $\delta^{18}\text{O}$ 值约为 1.70‰~5.02‰(表 1).*L. inopinata* 壳体的 $\delta^{18}\text{O}$ 值与对应湖水的 $\delta^{18}\text{O}$ 值呈正相关($r=0.84, P<0.01$),反映了意外湖花介的氧同位素组成主要受控于其生长湖水的氧同位素组成.*L. inopinata* 壳体和水体的氧同位素组成均随盐度的升高而逐渐偏正(图 2a),进一步验证了 *L. inopinata* 壳体的氧同位素组成主要受控于其生长湖水的氧同位素组成.因此,该数据可以用来讨论 *L. inopinata* 与水体之间的氧同位素分馏,并且青海湖 *L. inopinata* 的氧同位素组成变化可能指示了湖水盐度的变化.

当湖水盐度由 8.9 g/L 增至 16.5 g/L 时,*L. inopinata* 与湖水之间的氧同位素差值($\delta^{18}\text{O}_{\text{介形虫-湖水}}$)由 2.27‰降至 0.08‰,湖水盐度与 *L. inopinata* 的氧同位素分馏呈显著负相关($r=-0.73, P<0.01$),说明 *L. inopinata* 与水体之间的氧同位素分馏明显受到盐度的影响(图 2b).但是,在高盐度区间内,介形类壳体与水体之间的氧同位素差异较为分散,有关盐度对介形类氧同位素分馏的影响可能需要更深入的研究以进行验证.盐度应该不会直接影响 *L. inopinata* 壳体的氧同位素组成,究竟什么原因导致 *L. inopinata* 的氧同位素组成与水体盐度之间的关系?有关介形类成壳机理的研究十分缺乏,因此只能借助其它生物碳酸盐及无机碳酸盐氧同位素分馏研究的结果,来推测影响介形类壳体氧同位素分馏的原因.

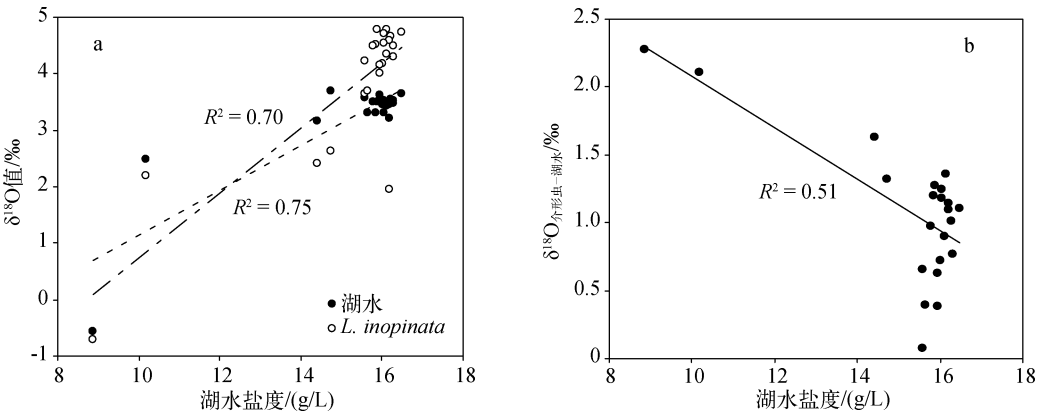


图 2 介形类壳体及湖水氧同位素组成(a)、氧同位素分馏(b)与湖水盐度的关系
Fig.2 Correlativities between salinities and oxygen isotopes of ostracod shells and lake water(a) and oxygen isotopic fractionation(b)

海洋有孔虫壳体的氧同位素分馏机制已经有较多的研究,有关影响因素相对较为清楚,即主要受其生命过程(成壳速度、光合作用和呼吸作用)、“生命效应”、成壳时的碳酸根浓度、宿生水体 pH 值的影响^[21-26]. Zeebe^[24]的研究发现,海水的 pH 值每增加 0.2~0.3,有孔虫方解石壳体的 $\delta^{18}\text{O}$ 值即降低 0.22‰~0.33‰,这种变化往往被研究者误解为温度所导致的^[24]. Mulitza 等^[25]研究生长在大西洋和南海中的有孔虫时发现,浮游有孔虫的壳体与海水之间的氧同位素分馏小于无机方解石的氧同位素平衡分馏,继而认为,有孔虫成壳时微环境水体的 pH 值是导致有孔虫壳体较低氧同位素分馏的原因^[25]. 青海湖具有较高的盐度和 pH 值(表 1),水体的 pH 值变化会不会影响 *L. inopinata* 的氧同位素分馏呢?

本研究采集的 23 个水样中,样品的 pH 值变化范围很小,介于 8.94~9.12 之间(表 1),且水体 pH 值与 $\delta^{18}\text{O}_{\text{介形虫-湖水}}$ 无显著相关关系,由此可见水体 pH 值的变化不会导致 *L. inopinata* 壳体发生较大的氧同位素分馏. Wolf-Gladrow 等^[26]的研究发现,有孔虫的成壳和呼吸作用可以导致其周围微环境水体的 pH 值发生变化,并且这一变化与周围海水的 pH 值和盐度有关. *L. inopinata* 会不会像有孔虫那样,其成壳时水体微环境的 pH 值会随壳体周围水体 pH 值以及盐度发生变化,进而影响其氧同位素分馏? 由于测定条件的限制,目前尚无法测得介形类成壳时微环境水体的 pH 值、盐度以及离子组成等参数,无法确定介形类成壳时水体微环境变化对其氧同位素分馏可能的影响.

表 1 青海湖采样点基本情况及湖水和介形类 *L. inopinata* 的氧同位素组成*

Tab. 1 General characteristics of sampling sites, the oxygen isotopic composition of ostracod shells of <i>L. inopinata</i> and lake water in Lake Qinghai							
采样点	水深 /m	湖水 pH	盐度 /(g/L)	[CO ₃ ²⁻] /(g/L)	$\delta^{18}\text{O}_{\text{湖水}}$ VSMOW/‰	$\delta^{18}\text{O}_{\text{介形虫}}$ VPDB/‰	$\delta^{18}\text{O}_{\text{介形虫-校正后}}$ VPDB/‰
1	24.0	9.12	16.0	0.47	3.46	4.18	4.18
2	24.0	9.06	16.0	0.50	3.62	4.01	4.01
3	25.0	9.04	16.2	0.50	3.55	4.65	4.65
4	26.5	9.03	16.5	0.51	3.63	4.74	4.74
5	26.0	8.96	16.1	0.53	3.44	4.79	4.79
6	26.0	9.04	16.1	0.50	3.54	4.72	4.72
7	25.5	9.07	15.9	0.51	3.50	4.78	4.78
8	24.0	9.03	16.2	0.50	3.45	4.60	4.60
9	18.5	9.06	16.0	0.50	3.53	4.16	4.16
10	25.0	9.02	15.6	0.50	3.57	4.22	4.22
11	26.0	9.02	15.9	0.53	3.32	4.51	4.51
12	26.0	9.00	16.3	0.50	3.48	4.49	4.49
13	22.0	9.00	16.1	0.50	3.45	4.35	4.35
14	24.0	8.96	15.8	0.53	3.51	4.48	4.48
15	24.0	8.94	16.3	0.50	3.52	4.29	4.29
16	24.0	9.08	16.0	0.50	3.31	4.55	4.55
17	18.0	9.04	15.6	0.53	3.56	3.64	3.64
18	11.5	9.08	15.6	0.50	3.30	3.69	3.69
19	1.5	8.95	16.2	0.53	3.21	1.95	4.35
20	0.5	9.08	14.4	0.45	3.17	2.40	4.80
21	0.5	—	10.2	0.28	2.49	2.20	4.60
22	0.5	9.06	8.9	0.22	-0.57	-0.70	1.70
23	0.5	9.08	14.7	0.47	3.71	2.62	5.02

* 水深、盐度、 $\delta^{18}\text{O}_{\text{湖水}}$ 以及 $\delta^{18}\text{O}_{\text{介形虫}}$ 数据均引自文献[15].

Spero 等^[22]对影响有孔虫与海水之间氧同位素分馏的原因进行了研究,发现有孔虫壳体的 $\delta^{18}\text{O}$ 值随海水 CO_3^{2-} 浓度的增加而降低,该结果与无机合成碳酸盐时氧同位素组成随溶液 CO_3^{2-} 浓度的升高而偏负的结果一致,由此认为碳酸盐形成时的同位素动力学效应是导致生物碳酸盐和无机构成碳酸盐与生成水体发生氧同位素分馏的原因^[27]. Li 等^[28]研究了盐度和温度对无机合成碳酸盐氧同位素分馏的影响,发现随着水体盐度的增加,方解石与水体之间的氧同位素分馏系数逐渐降低,从而认为在高盐度水体中,较快的方解石形成速率是导致方解石与水体之间较小氧同位素分馏的原因^[28]. Liu 等^[15]系统研究了青海湖表层沉积物介形类及总碳酸盐的氧同位素组成的分布特征,结合湖水的水化学参数,分别讨论了温度和盐度对碳酸盐氧同位素分馏的影响,首次提出湖水 $\text{HCO}_3^-/\text{CO}_3^{2-}$ 比值可能会影响湖泊碳酸盐与湖水之间的氧同位素分馏. 培养实验表明,在高盐度水体中形成的介形类 *E. mareotica* 与水体之间的氧同位素分馏明显小于淡水介形类^[14].

湖水的盐度与 CO_3^{2-} 浓度呈显著正相关(图 3a),因此,本文研究了湖水 CO_3^{2-} 浓度与 $\delta^{18}\text{O}_{\text{介形虫-湖水}}$ 之间的关系. $\delta^{18}\text{O}_{\text{介形虫-湖水}}$ 随 CO_3^{2-} 浓度的增加而逐渐降低(图 3b),这一结果与上述有孔虫的研究结果一致^[27]. 据此推测,当水体中 CO_3^{2-} 浓度升高时,较高的 CO_3^{2-} 浓度有利于介形类壳体的快速形成,较快的成壳速度导致

介形类与水体之间的氧同位素分馏减小. 由于目前介形类的成壳机理知之甚少, 现在还无法解释 CO_3^{2-} 浓度是如何影响介形类的成壳速度.

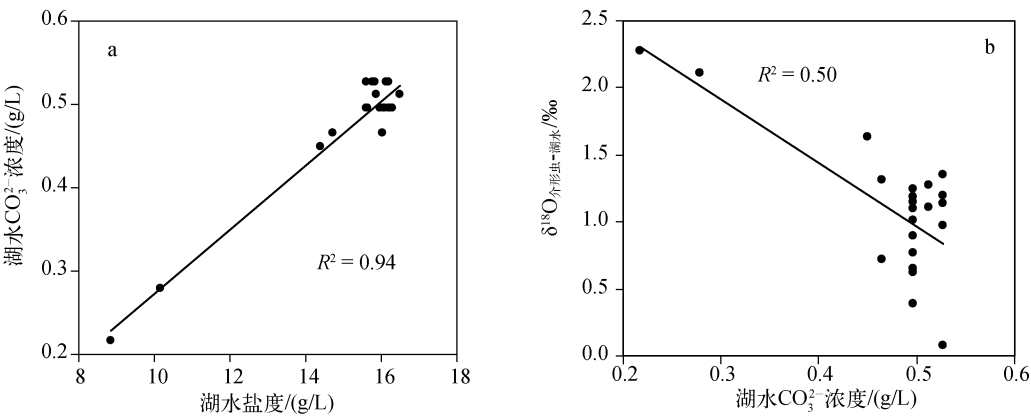


图3 青海湖湖水盐度(a)和介形类壳体与湖水氧同位素分馏 $\delta^{18}\text{O}_{\text{介形虫-湖水}}$ (b)与湖水 CO_3^{2-} 浓度的相关关系
Fig. 3 Correlativities between water salinities(a), oxygen isotopic fractionation between ostracod shells and lake water(b) and CO_3^{2-} in Lake Qinghai

3 结论

介形类 *L. inopinata* 广泛分布于世界各地的淡水和咸水湖泊中,在国内晚新生代介形类动物群分布中亦占有重要地位,在河北阳原蔚县泥河湾层顶部^[29]乃至桑干—汾渭断陷带各盆地湖相地层顶部^[30]皆见这一组合,成为地质时期湖泊萎缩后期特征的介形类动物群,因此 *L. inopinata* 壳体氧同位素组成可广泛用于现代和地质时期湖泊水体环境的重建. 本文通过对青海湖 *L. inopinata* 以及湖水的氧同位素分析,剔除温度影响后,粗略讨论了湖水盐度对介形类壳体氧同位素分馏的可能影响,取得如下几点认识:

- 1) 剔除温度影响外,介形类壳体的氧同位素组成依然响应盐度变化,其 $\delta^{18}\text{O}$ 值随盐度的升高而升高.
- 2) 剔除温度影响外,*L. inopinata* 壳体与水体之间的氧同位素分馏还可能受盐度的影响,随水体盐度的升高,*L. inopinata* 壳体与水体间的氧同位素差异逐渐减小.
- 3) 为了进一步明确湖水盐度或湖水 CO_3^{2-} 浓度对 *L. inopinata* 壳体氧同位素分馏的可能影响,建议通过培养实验,进一步加强介形类成壳机制及介形类壳体氧同位素组成对湖泊水化学条件(盐度、pH 和离子组成等)响应的机制研究.

本文仅仅是对青海湖 *L. inopinata* 氧同位素组成与盐度之间关系的初步认识和粗略估算,所得结论还有待进一步证实,但是该研究为利用介形类壳体的氧同位素组成来反演湖水盐度变化提供了新的思路,值得开展更为深入的研究.

4 参考文献

[1] Bahr A, Arz HW, Lamy F *et al.* Late glacial to Holocene paleoenvironmental evolution of the Black Sea, reconstructed with stable oxygen isotope records obtained on ostracod shells. *Earth and Planetary Science Letters*, 2006, **241**: 863-875.
[2] Belis CA, Ariztegui D. The influence of biological and environmental factors on the stable isotopic composition of ostracods — the late Pleistocene record from Lake Albano, Central Italy. *Journal of Paleolimnology*, 2004, **63**: 219-232.
[3] Bright J, Kaufman DS, Forester RM *et al.* A continuous 250,000yr record of oxygen and carbon isotopes in ostracode and bulk-sediment carbonate from Bear Lake, Utah-Idaho. *Quaternary Science Reviews*, 2006, **25**: 2258-2270.
[4] Fritz P, Anderson TW, Lewis CFM. Late Quaternary climatic trends and history of Lake Erie from stable isotope studies. *Science*, 1975, **190**: 267-269.
[5] Von Grafenstein U, Erlenkeuser H, Brauer A *et al.* A mid-European decadal isotope-climate record from 15500 to 5000 years BP. *Science*, 1999, **284**: 1654-1657.

- [6] Von Grafenstein U, Erlenkeuser H, Müller J *et al.* Oxygen isotope records of benthic ostracods in Bavarian lake sediments. *Naturwissenschaften*, 1992, **79**: 145-152.
- [7] Liu X, Shen J, Wang SM *et al.* Southwest monsoon changes indicated by oxygen isotope of ostracode shells from sediments in Qinghai Lake since the late Glacial. *Chinese Science Bulletin*, 2007, **52**: 539-544.
- [8] 刘传联, 赵泉鸿, 汪品先. 东营凹陷生油岩中介形虫氧、碳同位素的古湖泊学意义. 地球科学——中国地质大学学报, 2001, **26**: 441-445.
- [9] 张彭熹, 张保珍, 杨文博. 青海湖冰后期以来古气候波动模式的研究. 第四纪研究, 1989, (1): 66-77.
- [10] 蒋庆丰, 沈吉, 刘兴起等. 乌伦古湖介形组合及其壳体同位素记录的全新世气候环境变化. 第四纪研究, 2007, **27**: 382-391.
- [11] Xia J, Ito E, Engstrom DR. Geochemistry of ostracode calcite: Part 1. An experimental determination of oxygen isotope fractionation. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1997, **61**: 377-382.
- [12] Von Grafenstein U, Erlenkeuser H, Trimborn P. Oxygen and carbon isotope in modern fresh-water ostracod valves: assessing vital offsets and autecological effects of interest for palaeoclimate studies. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 1999, **148**: 133-152.
- [13] Keatings KW, Heaton THE, Holmes JA. Carbon and oxygen isotope fractionation in non-marine ostracods: results from a 'natural culture' environment. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2002, **66**: 1701-1711.
- [14] Li XZ, Liu WG. Oxygen isotope fractionation in the ostracod *Eucypris mareotica*: results from a culture experiment and implications for paleoclimate reconstruction. *Journal of Paleolimnology*, 2010, **43**: 111-120.
- [15] Liu WG, Li XZ, 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. *Chemical Geology*, 2009, **268**: 126-136.
- [16] Lister GS, Kelts K, Chen KZ *et al.* Lake Qinghai, China: closed-basin lake levels and the oxygen isotope record for ostracoda since the latest Pleistocene. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 1991, **84**: 141-162.
- [17] 中国科学院兰州地质研究所. 青海湖综合考察报告. 北京: 科学出版社, 1979: 24.
- [18] Yin Y, Geiger W, Martens K. Effects of genotype and environment on phenotypic variability in *Limnocythere inopinata* (Crustacea: Ostracoda). *Hydrobiologia*, 1999, **400**: 85-114.
- [19] Li XZ, Liu WG, Zhang L *et al.* Distribution of Recent ostracod species in the Lake Qinghai area in northwestern China and its ecological significance. *Ecological Indicators*, 2010, **10**: 880-890.
- [20] O'Neil JR, Clayton RN, Mayeda TK. Oxygen isotope fractionation in divalent metal carbonates. *Journal of Chemical Physics*, 1969, **51**: 5547-5558.
- [21] Ortiz JD, Mix AC, Rugh W *et al.* Deep-dwelling planktonic foraminifera of the northeastern Pacific Ocean reveal environmental control of oxygen and carbon isotopic disequilibria. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1996, **60**: 4509-4523.
- [22] Spero HJ, Lea DW. Intraspecific stable isotope variability in the planktic foraminifera *Globigerinoides sacculifer*: Results from laboratory experiments. *Marine Micropaleontology*, 1993, **22**: 221-234.
- [23] Bijma J, Spero HJ, Lea DW. Reassessing foraminiferal stable isotope geochemistry: Impact of the oceanic carbonate system (experimental results). In: Fischer G, Wefer G eds. Use of proxies in paleoceanography—Examples from the South Atlantic. Berlin: Springer, 1999: 489-512.
- [24] Zeebe R. An explanation of the effect of seawater carbonate concentration on foraminiferal oxygen isotopes. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1999, **63**: 2001-2007.
- [25] Mulitza S, Boltovskoy D, Donner B *et al.* Temperature: $\delta^{18}\text{O}$ relationships of planktonic foraminifera collected from surface waters. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2003, **202**: 143-152.
- [26] Wolf-Gladrow DA, Bijma J, Zeebe RE. Model simulation of the carbonate chemistry in the microenvironment of symbiont bearing foraminifera. *Marine Chemistry*, 1999, **64**: 181-198.
- [27] McCrea JM. On the isotopic chemistry of carbonates and a paleotemperature scale. *Journal of Chemical Physics*, 1950, **18**: 849-857.
- [28] Li HC, Stott LD, Hammond DE. Temperature and salinity effects on ^{18}O fractionation for rapidly precipitated carbonates: Laboratory experiments with alkaline lake water. *Episodes*, 1997, **20**: 193-198.
- [29] 王强, 王景哲. 泥河湾层的介形类、有孔虫化石. 见: 陈茅南编. 泥河湾层的研究. 北京: 海洋出版社, 1988: 62-73.
- [30] 王景哲, 王强, 田国强. 桑干汾渭断陷带晚新生代介形类组合序列和古环境. 微体古生物学报, 1987, **4**(4): 409-420.