

青海湖全新世硬水效应随时间变化性及其对沉积物¹⁴C 年龄的校正*

汪 勇, 沈 吉, 刘兴起, 王苏民, 张恩楼

(中国科学院南京地理与湖泊研究所湖泊与环境国家重点实验室, 南京 210008)

摘 要: 通过研究青海湖全新世硬水效应变化与大气¹⁴C浓度(X_{atm})之间的关系, 确定了湖水溶解无机碳(DIC)与大气¹⁴C浓度之比值($X_{\text{DIC}}/X_{\text{atm}}$)约为0.790. 利用已知 X_{atm} 随时间变化曲线重建了青海湖全新世的硬水效应, 并对沉积物年龄作了相应校正. 结果表明, 青海湖全新世沉积物(有机质)¹⁴C年龄偏老主要缘于湖泊硬水效应, 从全新世早期的1000a左右升高到核爆前前的2300a左右, 核爆效应之后2005AD又降至1500a左右, 其变化至少在很大程度上受控于 X_{atm} 的波动(对应于以上3个时期, 根据 X_{atm} 所恢复的硬水效应分别为1100a、2150a、1313a). 在此基础上, 利用硬水效应校正表对青海湖全新世沉积物¹⁴C年龄进行了分阶段校正, 基于此校正年龄的红色曲线较好地响应了9000-8000cal aBP、6000-5000cal aBP、4200-3800cal aBP、3500-2500cal aBP、1200-1000cal aBP和600-150cal aBP等全球性冷事件.

关键词: 青海湖; ¹⁴C; 硬水效应; X_{atm}

A corrected ¹⁴C age model for Lake Qinghai's sediment spanning the Holocene period, based on the reconstruction of temporal changes in hard water effect

WANG Yong, SHEN Ji, LIU Xingqi, WANG Sumin & ZHANG Enlou

(State Key Laboratory of Lake Science and Environment, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, P. R. China)

Abstract: The relationship between ¹⁴C levels in lake waters and in the atmosphere had been investigated by comparing the changes in hardwater effect (HWE, expressed by X_{DIC}/X ; X : percent modern carbon; DIC: abbreviation of dissolved inorganic carbon) of lake waters with changes in atmospheric ¹⁴C levels (X_{atm}). The $X_{\text{DIC}}/X_{\text{atm}}$ ratio of Lake Qinghai was found to be about 0.790. The reconstruction of HWE was established based on the $X_{\text{DIC}}/X_{\text{atm}}$ ratio and the well known changes of X_{atm} . The age model (based on 5 ¹⁴C dates) of QH-2000 sedimentary core was corrected by the temporal changes of HWE. It showed that the shifts toward old ages for ¹⁴C dates of Lake Qinghai's sediment was mainly due to HWE and the reconstructed HWE was 1100a in the early Holocene, which slowly rose to 2150a in the latest Holocene (pre-bomb era) and then shifted to 1313a in 2005AD. It was also validated by the measured HWE, which was determined to be ca. 1000a, 2300a and 1500a correspondingly. A "HWE correction table" was established for Lake Qinghai so as to transfer any given calendar age without HWE correction into a corrected calendar age. The published redness curve based on our corrected age model shows rapid climate changes (RCC) correlative to those indicated by many records all over the world. The RCCs include those occurred during 9000-8000 cal aBP, 6000-5000 cal aBP, 4200-3800 cal aBP, 3500-2500 cal aBP, 1200-1000 cal aBP and 600-150 cal aBP.

Keywords: Lake Qinghai; ¹⁴C; hardwater effect; X_{atm}

放射碳(¹⁴C)定年的基本前提之一是:样品在形成时应具有与大气相近的¹⁴C含量^[1].但事实上不同碳库的初始¹⁴C浓度仍然可能存在着不可忽视的差别,例如石灰岩地区往往含有“老碳”或“死碳”,其被水流搬运至江河湖海沉积后会使沉积物年龄不同程度地偏老,称之为老碳效应(或碳库效应)^[1].地处基岩为碳

* 国家重点基础研究发展计划“973”项目(2010CB833404)、国家杰出青年科学基金项目(40625007)和国家自然科学基金项目(40872117,40902047)联合资助.2009-06-09 收稿;2009-08-28 收修改稿.汪勇,男,1977年生,博士,助理研究员;E-mail: wangyong@niglas.ac.cn.

酸岩地区的湖泊,其水体硬度较大,湖水溶解无机碳(DIC)多源自流域老碳或死碳,加之湖水循环周期一般较短,湖水与大气之间的¹⁴C 交换不能充分达到平衡,因而湖水相对于大气¹⁴C 含量便会偏低,而湖泊自生有机质和碳酸盐的初始¹⁴C 含量也会偏低,导致其年龄偏老,这便是硬水效应^[2],其本质上是湖水碳库效应.湖泊沉积物中的碳源十分复杂,受流域老碳(外源)和湖泊硬水效应(内源)的影响,沉积物的年龄一般都偏老,这在中国许多湖泊中都有表现^[3-9].

对于青海湖而言,晚冰期以来其沉积物有机碳、氮之比值(C/N)大多处在10以下^[10-11],沉积物中有机质主要来自湖泊内源有机质,且主要由浮游藻类所贡献^[12](有机质碳同位素($\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$)处在 -28% 至 -20% ^[10-11]),因此沉积物中总有机质(TOC)的¹⁴C 年龄主要受硬水效应影响. Shen等^[11]曾利用年代-深度序列线性回归的方法,估算青海湖晚冰期以来沉积物TOC的¹⁴C 年龄偏老约1039a,并用其对年龄作了统一校正. Henderson等^[13]通过比较¹⁴C 和²¹⁰Pb 两种测年结果确定过去1000a中青海湖沉积物TOC的¹⁴C 年龄偏老约700a左右. Yu等^[14]建立了青海湖¹⁴C 收支黑箱模型,并用马尔可夫链蒙特卡罗方法得出核爆效应之前的硬水效应为1500a.但是,考虑到湖泊水文状况和大气¹⁴C 浓度等因素的变化,湖泊硬水效应随着时间推移也应该是不断变化的.虽然湖泊水文状况的定量恢复难度较大,但大气¹⁴C 浓度(X_{atm} , X 为所占现代碳标准^[1]的百分比)的变化是已知的.自晚冰期以来大气¹⁴C 浓度下降了近30%^[15],1952AD 受人为核爆试验影响,大气 X_{atm} 几乎增至原来的200%^[16],其后又逐渐下降.湖水 X_{DIC} 势必会响应 X_{atm} 的这种变化,并导致硬水效应的变化.这就可以很好地研究随着时间的变化湖泊硬水效应(t_{DIC} ,可通过 X_{DIC} 和¹⁴C 年龄计算公式换算得出)对 X_{atm} 变化是如何响应的,并在此基础上,对沉积物¹⁴C 年龄进行不同的校正.

本文通过研究青海湖全新世早期和核爆近前,以及现代湖水的硬水效应,定量得出了硬水效应与大气¹⁴C 浓度之间的关系($X_{\text{DIC}}/X_{\text{atm}}$),利用硬水效应随时间的变化对沉积物¹⁴C 年龄进行不同校正,在此基础上获得的深度-年龄模型较为可靠,可以利用全球性冷事件对其作出检验.

1 材料与方法

研究对象为2000年于青海湖东南湖盆22.3m 水深处采得的QH-2000孔岩芯(长795cm),其全新世深度-年代模型的建立是基于5个AMS¹⁴C 年龄(表1)^[11],测年材料均为样品中的总有机质,其 $\delta^{13}\text{C}$ 值处于22.3‰-25.8‰之间^[11],分馏效应对年龄的影响均在测年误差范围之内.

表1 青海湖QH-2000孔AMS¹⁴C 测年结果^[11]
Tab.1 AMS¹⁴C dates of Core QH-2000 from Lake Qinghai^[11]

深度(cm)	测年材料	AMS ¹⁴ C 年龄(aBP)	$\delta^{13}\text{C}$ (‰,PDB)	硬水效应(a)	日历年龄(cal aBP)
+	湖水DIC	1469 ± 100	-2.29	1469 ± 100	-55
+	沉水植物	1629 ± 120	-8.34	1629 ± 120	-55
7-9 ⁺	TOC	2323 ± 200		2150	5
50-51	TOC	2700 ± 100	-25.8	2047	575
150-151	TOC	4010 ± 100	-25.7	2062	1890
230-231	TOC	5060 ± 90	-26.7	1822	3450
356-357	TOC	6760 ± 180	-22.3	1323	6225
475-477	TOC	9660 ± 140	-22.3	1170	9515
470-471 ^Δ	孢粉浓缩物	8615 ± 60		0	9597

“+”表示年龄为中国科学院南京地理与湖泊研究所¹⁴C 实验室结果;“Δ”表示年龄为瑞典隆德大学AMS¹⁴C 实验室结果及其硬水效应校正.

1.1 全新世早期硬水效应的测定

挑选QH-2000孔岩芯470-471cm 层位样品(形成于全新世早期^[11])进行孢粉AMS¹⁴C 测年(在瑞典隆德大学AMS¹⁴C 实验室完成),孢粉浓缩物的提取参见Kilian等^[17]的方法,所得孢粉浓缩物经镜下鉴定,其中40%以上为乔木种属花粉,剩余的几乎全部是陆生藜科和蒿属花粉.可以判定此孢粉浓缩物的¹⁴C 年龄不受湖泊硬水效应的影响,将其所代表的绝对年龄与相同层位TOC 样品年龄(主要受硬水效应影响)相减,即

可得出全新世早期的硬水效应。

1.2 核爆近前硬水效应的测定

选取青海湖核爆效应开始(1952AD)近前(QH-2000孔7-9cm层位,据笔者未发表 ^{210}Pb - ^{137}Cs 测年数据)沉积物TOC样品进行了常规 ^{14}C 定年(β 粒子液体闪烁计数法,在中国科学院南京地理与湖泊研究所 ^{14}C 实验室完成)。由于 ^{14}C 年龄的计算均以1950AD为原始起点,又对于青海湖而言其TOC年龄偏老主要缘于硬水效应,所以QH-2000孔7-9cm层位样品TOC的 ^{14}C 年龄即可近似代替核爆近前的硬水效应。

1.3 现代湖泊硬水效应的测定

于2005年7月在青海湖东南湖盆,分别采集了湖水溶解无机碳(现场用过量 CaCl_2 饱和溶液沉淀)和沉水植物(大型轮藻)样品(2组平行样品),进行常规 ^{14}C 定年(取两次测量结果的平均值),同时测定了样品的 $\delta^{13}\text{C}$ 值(表1)(均在中国科学院南京地理与湖泊研究所 ^{14}C 实验室完成),依照 $\delta^{14}\text{C} \approx 2\delta^{13}\text{C}$ 的关系^[1]计算出样品的 $\delta^{14}\text{C}$ 值,并对 ^{14}C 年龄进行了分馏效应校正。湖泊内生沉水植物主要与湖水DIC发生碳的交换,因此湖水DIC和沉水植物的表观 ^{14}C 年龄均可代表现代湖泊的硬水效应。

2 结果和讨论

2.1 晚冰期以来的硬水效应及其变化规律

青海湖全新世早期孢粉浓缩物的 ^{14}C 年龄较之相同层位TOC样品的 ^{14}C 年龄偏年轻约923a(未考虑测年误差影响)。此外,QH-2000孔用1039a对年代-深度模型作了校正后^[11],各指标均显示全新世的开始时间为10800cal aBP。可见,全新世早期青海湖的硬水效应处在1000a左右。

核爆效应开始(1952AD)近前青海湖沉积物TOC的 ^{14}C 年龄为 $2323 \pm 200\text{aBP}$ 。另外,据前人青海湖 ^{210}Pb 测年结果^[18-20],现代沉积物的平均沉积速率处于0.10-0.12cm/a之间(^{137}Cs 测年结果与之基本吻合,沉积速率处于0.10-0.16cm/a之间^[18,20]),那么QH-2000钻孔50-51cm深度处的绝对年龄应约为500aBP左右,而同此层位TOC的 ^{14}C 年龄偏老约2200a(表1)^[11]。所以,笔者实际测定的硬水效应($2323 \pm 200\text{aBP}$)还是较为可信的。

现代湖水DIC和沉水植物的表观 ^{14}C 年龄(分别为 $1469 \pm 100\text{aBP}$ 和 $1629 \pm 120\text{aBP}$)基本上可以相互印证,笔者取其两者的平均值($1549 \pm 110\text{a}$)作为青海湖现代的硬水效应。Yu等^[14]通过黑箱模型,得出青海湖核爆效应之前硬水效应约为1500a,但并无实测年龄印证;而Henderson等^[13]认为过去1000a中青海湖沉积物(有机质) ^{14}C 年龄偏老一直是700a左右,显然是没有充分考虑核爆效应的巨大影响。

晚冰期以来,大气 ^{14}C 浓度呈递减趋势^[15](图1c);1952AD全球开始核试验后, X_{atm} 迅速升高,于1963AD前后达到峰值后缓慢降低^[16](图1c)。随着 X_{atm} 的升高和降低,所有样品(与大气碳库达到交换平衡)形成之时的初始 ^{14}C 放射性比度也随之升高和降低。由于 ^{14}C 年龄均以NBS草酸等^[1]为现代碳标准计算得出,且以1950AD为原始起点,所以1950AD之前和之后样品的 ^{14}C 年龄或多或少都会偏年轻,其与真实年龄之间的偏差(老碳和/或硬水效应)也会偏小。青海湖全新世早期以来硬水效应先升后降(1000a左右→2300a左右→1500a左右)的趋势,符合大气 X_{atm} 先降后升的变化规律(图1c)。

2.2 硬水效应曲线的重建

全球海洋表层水 ^{14}C 年龄平均偏老400a左右^[22]。受大气 CO_2 浓度变化的影响,海洋碳库效应的强度随着时间推移也是不断变化的,而且即使是同一时间不同海域因海洋环流的不同,其碳库效应也是互不相同的,但对于同一时间,特定海域来说,可以认为表层海水老碳年龄是恒定不变的^[22-25]。

就湖泊而言,在 ^{14}C 收支相对稳定(主要取决于湖泊水文状况)的情况下,湖水DIC与大气 ^{14}C 浓度比值($X_{\text{DIC}}/X_{\text{atm}}$)可能为一恒定值^[26]。通过湖水DIC样品实测年龄(t_{DIC}),利用 ^{14}C 年龄计算公式反推出 X_{DIC} ($X_{\text{DIC}} = \exp(-t_{\text{DIC}}/8267)$),可以得出 $X_{\text{DIC}}/X_{\text{atm}}$ 比值,假设这一比值恒定,则根据已知 X_{atm} 随时间变化曲线(图1c),即可重建湖泊过去的硬水效应(t_{DIC} 与 X_{DIC} 可通过公式 $X_{\text{DIC}} = \exp(-t_{\text{DIC}}/8267)$ 互相推算)。但青海湖过去的 $X_{\text{DIC}}/X_{\text{atm}}$ 比值是否恒定不变呢?其硬水效应是否完全受控于 X_{atm} 呢?下面采用“假设-验证”的方法加以讨论。

如果假设硬水效应完全受控于 X_{atm} ,则当 $X_{\text{DIC}}/X_{\text{atm}}$ 比值为0.790时(相当于全新世早期、以及核爆效应

前后的硬水效应分别为 1100a、2150a 和 1313a), 则全新世早期、以及核爆效应前后 3 个典型时期的实测硬水效应(分别为 923a、2300a 和 1500a 左右)(图 1a)均分布在由 X_{atm} 重建得出的硬水效应曲线附近(图 1b)。考虑到测年误差(若占¹⁴C 年龄 1% 的话,则相对于少了一个数量级的硬水效应的比例可高达 10% 左右)的影响,此假设基本成立,硬水效应的变化至少在很大程度上受控于 X_{atm} 的变化。

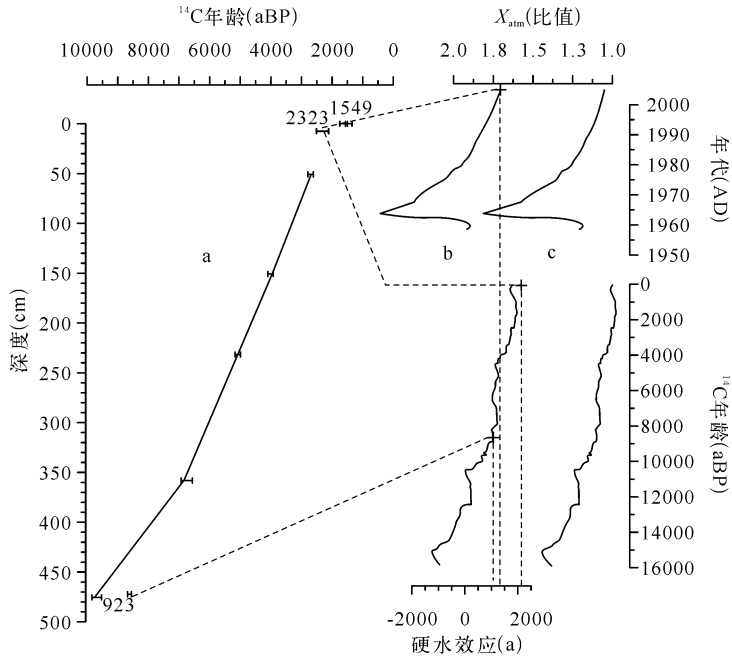


图 1 青海湖 QH-2000 孔深度¹⁴C 年龄关系(923a、2323a 和 1549a 分别代表全新世 3 个典型时期的实测硬水效应)(a);全新世青海湖硬水效应变化曲线(b);全新世大气¹⁴C 浓度(X_{atm})变化曲线,其中 1986AD 后的 X_{atm} 是根据公式 $\Delta^{14}\text{C} = 417 \times \exp(-t/16)$ [21] 算出($\Delta^{14}\text{C} = (X - 1) \times 1000\%$)(c)

Fig. 1 Age-depth model for Core QH-2000 from Lake Qinghai (923a, 2323a and 1549a indicate the hardwater effect in the early Holocene, pre-bomb era and post-bomb era) (a); Hardwater effect curve of Lake Qinghai in Holocene (b); Atmospheric ¹⁴C level curve of Lake Qinghai in Holocene (Atmospheric ¹⁴C level after 1986AD was calculated using the relationship $\Delta^{14}\text{C} = 417 \times \exp(-t/16)$ [21] ($\Delta^{14}\text{C} = (X - 1) \times 1000\%$)) (c)

2.3 硬水效应校正表

由于受硬水效应影响而偏老的¹⁴C 年龄不是绝对年龄(即真实的年龄),所以依照硬水效应变化曲线(其变化对应的是绝对年龄——¹⁴C 年龄或日历年龄坐标)无法对给出的偏老年龄(非真实年龄)进行校正。为此,笔者建立了硬水效应校正表(表 2),其中 $X_{t,\text{sed}}$ 是经过 t 时间(绝对年龄)之后,样品¹⁴C 比度的测量值(利用其直接计算出的年龄是偏老的)。表 2 就是通过建立从绝对年龄 t 到 $X_{t,\text{sed}}$ (可由偏老年龄通过¹⁴C 年龄计算公式算出)的一一对应关系,来完成校正的。具体计算过程如下: $X_{0,\text{sed}}$ 代表样品的初始¹⁴C 比度,我们已知其等同于湖泊硬水效应($X_{\text{lake,DIC}}$),又 $X_{\text{lake,DIC}}$ 是线性响应大气 $X_{0,\text{atm}}$ 随时间变化的,于是 $X_{0,\text{sed}} = X_{\text{lake,DIC}} = 0.790 \times X_{0,\text{atm}}$;经过了 t 时间后 $X_{0,\text{sed}}$ 便衰变到 $X_{t,\text{sed}}$,可通过 $X_{t,\text{sed}} = 0.790 \times X_{0,\text{atm}} \times \exp(-t_{\text{sed}}/8267)$ 计算得出。可见,给出任何一个受硬水效应影响的偏老年龄,只要利用¹⁴C 年龄计算公式($X_{t,\text{sed}} = \exp(-t_{\text{sed}}/8267)$)反推其¹⁴C 比度测量值($X_{t,\text{sed}}$),查表 2 即可获得对应校正后的绝对年龄(¹⁴C 年龄或日历年龄)。需要说明的是,对应于大气 $X_{0,\text{atm}}$ 变化的时间坐标有¹⁴C 年龄和日历年龄两种,若采用日历年龄的时间坐标,则由此方法校正后得出绝对年龄无需再进行日历年龄的校正 [27]。

2.4 校正年龄可靠性的检验

全新世的气候存在着诸如早全新世 8000aBP 全球降温事件 [28]、晚全新世 4000aBP 前后的海水降温事件

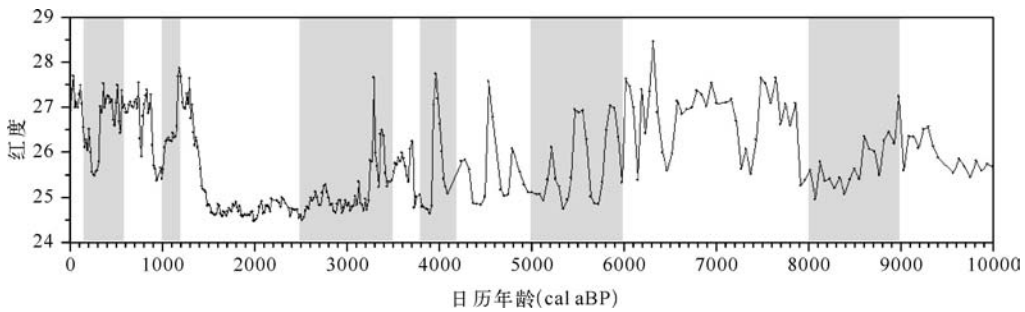
(普林虫低值事件^[29])以及中世纪暖期之后的小冰期^[30]等短期气候突变事件. 特别是, Bond 等^[31]发现全新世北大西洋深海沉积同样存在冰筏沉积的 8 个 D-O 旋回. 这些全球性的特征事件无疑是很好的对比材料. 笔者利用 Mayewski 等^[32]通过全球 50 个地点全新世记录综合得出的全球性冷事件(包括: 9000-8000cal aBP、6000-5000cal aBP、4200-3800cal aBP、3500-2500cal aBP、1200-1000cal aBP 和 600-150cal aBP 冷事件), 去检验 QH-2000 孔红度指标曲线^[33](基于硬水曲线校正后的年龄坐标), 发现这些冷事件在红度指标(红度偏负时对应冷干气候^[33])的记录中都有体现(图 2), 这说明笔者的硬水效应校正方法还是比较可靠的.

表 2 青海湖全新世沉积物硬水效应校正

Tab. 2 Hardwater effect correction for Lake Qinghai's sediment, back to 10000 cal aBP

日历年龄(aBP)	¹⁴ C 年龄(aBP)	$X_{0,atm}^*$	$X_{0,sed}$	$X_{t,sed}$	日历年龄(aBP)	¹⁴ C 年龄(aBP)	$X_{0,atm}^*$	$X_{0,sed}$	$X_{t,sed}$
50	70	0.997	0.788	0.781	6000	5283	1.071	0.846	0.446
500	415	1.009	0.797	0.758	8000	7187	1.076	0.850	0.356
2000	2060	0.986	0.779	0.607	10000	8877	1.110	0.877	0.300
4000	3704	1.023	0.808	0.516					

* 大气 $X_{0,atm}$ 数据引用 Reimer 等^[15] 和 Levin 和 Kromer^[16] 的结果, 实际分辨率达到 5-20a.

图 2 青海湖 QH-2000 孔全新世基于硬水效应校正年龄的红度曲线^[33]

(阴影部分标示的为 9000-8000cal aBP、6000-5000cal aBP、4200-3800cal aBP、3500-2500cal aBP、1200-1000cal aBP 和 600-150cal aBP 全球性冷事件^[32])

Fig. 2 Redness curve based on an age model with temporal correction of hardwater effect changes^[33]

(The grey vertical columns indicate rapid climate changes during 9000-8000cal aBP, 6000-5000cal aBP, 4200-3800cal aBP, 3500-2500cal aBP, 1200-1000cal aBP and 600-150cal aBP^[32])

3 结论

湖泊沉积物¹⁴C 年龄偏老(老碳和/或硬水效应)受湖泊水文状况、大气¹⁴C 浓度等因素影响, 随着时间推移是不断变化的. 对于青海湖而言, 其沉积物¹⁴C 年龄偏老主要系硬水效应所致, 沉积物 C/N 比值和 $\delta^{13}C_{org}$ 都可以说明这一点. 笔者的工作是通过研究全新世硬水效应的变化规律, 找出其与大气¹⁴C 浓度变化之间的线性关系, 虽然没有考虑湖泊水文状况的变化, 但研究结果显示大气¹⁴C 浓度变化所能够引起的硬水效应波动和实际测量值十分接近, 说明青海湖全新世硬水效应至少在很大程度上受控于大气¹⁴C 浓度的变化. 由于测年误差的存在, 使得笔者的研究无法十分精准, 但利用受控于大气¹⁴C 浓度的硬水效应对沉积物的年龄进行随时间的校正还是十分必要的, 因为青海湖已有的年龄数据很少包含不受老碳和/或硬水效应影响的年代结果. 当然今后尚需进一步探讨青海湖水文状况与老碳/硬水效应之间定性和定量的关系.

致谢: 特别感谢中国科学院南京地理与湖泊研究所张虎才研究员, 以及中国科学院西宁盐湖研究所赖忠平研究员、隆浩博士的指导和帮助! 也衷心感谢三峡大学魏宝华硕士的帮助!

4 参考文献

- [1] 仇士华,陈铁梅,蔡莲珍. 中国¹⁴C年代学研究. 北京:科学出版社,1990:1-119.
- [2] Deevey ES, Gross MS, Hutchinson GE *et al.* The natural ¹⁴C contents of materials from hard-water lakes. *National Academy of Science*, 1954, **40**: 285-288.
- [3] 任国玉. 内蒙古湖相沉积¹⁴C年代测定中“硬水”影响的发现. 湖泊科学,1998,**10**(3): 80-82.
- [4] 张成君,曹 洁,类延斌. 中国新疆博斯腾湖全新世沉积环境年代学特征. 沉积学报,2004,**22**(3):494-499.
- [5] Xiao JL, Xu QH, Nakamura T *et al.* Holocene vegetation variation in the Daihai Lake region of north-central China: a direct indication of the Asian monsoon climatic history. *Quaternary Science Reviews*, 2004,**23**(14-15): 1669-1679.
- [6] Herzsuh U, Winter K, Wünnemann *et al.* A general cooling trend on the central Tibetan Plateau throughout the Holocene recorded by the Lake Zigetang pollen spectra. *Quaternary International*, 2006, **154-155**: 113-121.
- [7] Morrill C, Overpeck JT, Cole JE *et al.* Holocene variations in the Asian monsoon inferred from the geochemistry of lake sediments in central Tibet. *Quaternary Research*, 2006, **65**: 232-243.
- [8] Liu XQ, Dong HL, Rech JA *et al.* Evolution of Chaka Salt Lake in NW China in response to climate change during the latest Pleistocene-Holocene. *Quaternary Science Reviews*, 2008, **27**(7-8):867-879.
- [9] Liu XQ, Herzsuh U, Shen J *et al.* Holocene environmental and climatic changes inferred from Wulungu Lake in northern Xinjiang, China. *Quaternary Research*, 2008, **70**(3):412-425.
- [10] 刘兴起,王苏民,沈 吉等. 16ka 以来青海湖沉积物有机碳同位素的变化特征及其影响因素. 自然科学进展,2003, **13**(2):169-173.
- [11] Shen J, Liu XQ, Wang SM *et al.* Palaeoclimate changes in the Qinghai Lake area during the last 18000 years. *Quaternary International*, 2005, **136**: 131-140.
- [12] 王苏民,龚鸿身. 中国湖泊志. 北京:科学出版社,1998:474.
- [13] Henderson ACG, Holmes JA. Palaeolimnological evidence for environmental change over the past millennium from Lake Qinghai sediments: A review and future research prospective. *Quaternary International*, 2009, **194**: 134-147.
- [14] Yu SY, Shen J, Cloman SM. Modeling the radiocarbon reservoir effect in lacustrine systems. *Radiocarbon*, 2007, **49**: 1241-1254.
- [15] Reimer PJ, Baillie MGL, Bard E *et al.* IntCal04 terrestrial radiocarbon age calibration, 0-26 cal ka BP. *Radiocarbon*, 2004, **46**: 1029-1058.
- [16] Levin I, Kromer B. The tropospheric¹⁴CO₂ level in mid-latitudes of the northern hemisphere (1959-2003). *Radiocarbon*, 2004, **46**(3): 1261-1272.
- [17] Kilian MR, van der Plicht J, van Geel B *et al.* Problematic ¹⁴C-AMS dates of pollen concentrates from Lake Gosciadz (Poland). *Quaternary International*, 2002, **88**: 21-26.
- [18] 沈 吉,张恩楼,夏威夷. 青海湖近千年来环境变化的湖泊沉积记录. 第四纪研究,2001,**21**:508-513.
- [19] Zhang EL, Shen J, Wang SM *et al.* Quantitative reconstruction of the paleosalinity at Qinghai Lake in the past 900 years. *Chinese Science Bulletin*, 2004, **49**: 730-734.
- [20] Xu H, Ai L, Tan LC *et al.* Stable isotopes in bulk carbonates and organic matter in recent sediments of Lake Qinghai and their climatic implications. *Chemical Geology*, 2006, **235**: 262-275.
- [21] Levin I, Kromer B. Twenty years of atmospheric ¹⁴CO₂ observations at Schauinsland Station, Germany. *Radiocarbon*, 1997, **39**(2): 205-218.
- [22] Reimer PJ, Reimer RW. A marine reservoir correction database and on-line interface. *Radiocarbon*, 2001, **43**: 461-464.
- [23] Yoneda M, Hirota M, Uchida M *et al.* Marine radiocarbon reservoir effect in the Western North Pacific observed in archaeological fauna. *Radiocarbon*, 2001, **43**: 465-471.
- [24] Dutta K, Bhushan R, Somayajulu BLK. ΔR correction values for the Northern Indian Ocean. *Radiocarbon*, 2001, **43**: 483-488.
- [25] Hideshima S, Matsumoto E, Abe O *et al.* Northwest Pacific marine reservoir correction estimation from annually banded coral from Ishigaki Island, Southern Japan. *Radiocarbon*, 2001, **43**: 473-476.
- [26] Stiller M, Kaufman A, Carmi I *et al.* Calibration of lacustrine sediment ages using the relationship between ¹⁴C levels in

- lake waters and in the atmosphere: the case of Lake Kinneret. *Radiocarbon*, 2001, **43**: 821-830.
- [27] Stuiver M, Reimer PJ, Braziunas TF. High precision radiocarbon age calibration for terrestrial and marine samples. *Radiocarbon*, 1998, **40**: 1127-1151.
- [28] Stager JC, Mayewski PA. Abrupt early to mid-Holocene climatic transition registered at the equator and the poles. *Science*, 1997, **276**: 1834-1836.
- [29] 翦知湓, 李保华, Pflaumann U 等. 西太平洋晚全新世变冷事件. 中国科学(D辑), 1996, **26**(5): 461-466.
- [30] Keigwin LD. The Little Ice Age and medieval warm period in the Sargasso Sea. *Science*, 1996, **274**: 1504-1508.
- [31] Bond G, Showers W, Cheseby M *et al.* A pervasive millennial-scale cycle in north Atlantic Holocene and glacial climates. *Science*, 1997, **278**: 1257-1266.
- [32] Mayewski PA, Rohling EE, Stager JC *et al.* Holocene climate variability. *Quaternary Research*, 2004, **62**: 243-255.
- [33] Ji JF, Shen J, Balsam W *et al.* Asian monsoon oscillations in the northeastern Qinghai-Tibet Plateau since the late glacial as interpreted from visible reflectance of Qinghai Lake sediments. *Earth and Planetary Science Letters*, 2005, **233**: 61-70.