

青海湖湖泊沉积物木质素 AMS-¹⁴C 测年

陈清敏^{1,2}, 周卫健², 鲜 锋²

1. 陕西省地质调查院 陕西省地质调查中心, 西安 710068

2. 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

摘要: 对青海湖 1A 钻孔 0—4 m 不同深度共 10 个沉积物样品提取木质素, 并进行 AMS-¹⁴C 测年。结果显示, 木质素的 AMS-¹⁴C 年龄-深度曲线呈良好的线性关系, 大于 10 μg 碳量的木质素单体 ¹⁴C 年龄比 1F 孔同深度基于总有机碳 (TOC) 获得的 ¹⁴C 年龄平均偏年轻约 110 年, 接近采用平均值概念分段线性回归确定的 1F 孔 4.99 m 以上碳库效应估算 (126 年)。这表明沉积物木质素 AMS-¹⁴C 测年可有效减少老碳效应的影响; 同时, 1A 与 1F 两个平行钻孔不同材料测年结果之间的美好对比, 也佐证了基于沉积物 TOC 的 ¹⁴C 测年并采用平均值概念进行分段线性回归建立的青海湖湖泊沉积物年代框架的可靠性。

关键词: 青海湖; 湖泊沉积物; 木质素; AMS-¹⁴C 测年

AMS-¹⁴C dating of lignin phenols extracted from the lacustrine sediments from Qinghai Lake

CHEN Qingmin^{1,2}, ZHOU Weijian², XIAN Feng²

1. Shaanxi Center of Geological Survey, Shaanxi Geological Survey, Xi'an 710068, China

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

Abstract: Background, aim, and scope The establishment of reliable framework is an important part of paleoclimate research. Selecting reliable dating material is the most important part of the chronology research. Qinghai Lake is located in the northeastern margin of Qinghai-Tibet Plateau, influenced by the monsoon climate and drought climate, and sensitive to climate and global environmental change. It is an excellent location for the research of environmental change in the western China, the Qinghai-Tibet Plateau uplift process, environment effect and their associated with global changes. The lakes in the arid-semiarid areas are influenced widespread by reservoir effect and brings much inconvenience in establishing the chronology framework of lacustrine sediments. In order to establish a reliable chronological framework of Qinghai Lake lacustrine sediment core, we tried the AMS-¹⁴C dating of lignin phenols. **Materials and methods** The Qinghai Lake 1A core was from the southeast lake bay. The lignin phenols were extracted from 12 lacustrine sediment samples from above 4 m Qinghai Lake

收稿日期: 2016-10-10; 录用日期: 2017-01-14

Received Date: 2016-10-10; Accepted Date: 2017-01-14

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目 (2010CB833405); 国家自然科学基金项目 (41290250, 41023006)

Foundation Item: National Basic Research Program of China (2010CB833405); National Natural Science Foundation of China (41290250, 41023006)

通信作者: 陈清敏, E-mail: chenqingmin0601@163.com

Corresponding Author: CHEN Qingmin, E-mail: chenqingmin0601@163.com

引用格式: 陈清敏, 周卫健, 鲜 锋. 2017. 青海湖湖泊沉积物木质素 AMS-¹⁴C 测年 [J]. 地球环境学报, 8(2): 113-118.

Citation: Chen Q M, Zhou W J, Xian F. 2017. AMS-¹⁴C dating of lignin phenols extracted from the lacustrine sediments from Qinghai Lake [J]. Journal of Earth Environment, 8(2): 113-118.

1A core, defined by GC-FID, and then separated by HPLC in the University of Washington. The measurement of lignin phenols AMS- ^{14}C dating was finished in the University of California, Irvine. **Results** Finally 10 effective AMS- ^{14}C ages (3550 a BP, 1470 a BP, 2800 a BP, 2390 a BP, 3920 a BP, 3520 a BP, 6390 a BP, 5900 a BP, 7050 a BP, 7150 a BP on the depth of 4.87 cm, 19.18 cm, 26.15 cm, 107.40 cm, 140.19 cm, 196.94 cm, 257.38 cm, 300.24 cm, 342.10 cm, 398.68 cm respectively) were obtained except 2 samples with lignin phenols too little (<2 μg) to be measured on AMS. ^{14}C ages were calibrated by CALIB 6.0. **Discussion** Overall the 10 lignin AMS- ^{14}C ages were linear well. The lignin ^{14}C ages (pure carbon >10 μg) were younger than TOC ^{14}C ages average in 110 a, which is more close to reservoir age (126 a) of 1F core above 4.99 m determined by a piecewise linear regression using “mean value concept” method (Cheng, 2008). **Conclusions** This not only explained that the lignin AMS- ^{14}C dating can effectively avoid the reservoir effect, but also corroborated the reliability of Qinghai Lake sediments chronological framework established by TOC- ^{14}C dating and piecewise linear regression using the “mean value concept” method. **Recommendations and perspectives** The lignin AMS- ^{14}C dating can effectively avoid the reservoir effect of Qinghai Lake and help to establish a reliable chronological framework of Qinghai Lake lacustrine sediment core. The lignin phenols extracted from sediments can be used as reliable dating material based on the perfect chemical extraction, precise chromatography and mass spectrometry technology in the future research.

Key words: Qinghai Lake; lacustrine sediments; lignin phenols; AMS- ^{14}C dating

青海湖位于青藏高原东北缘与黄土高原的过渡地带, 受季风气候与干旱气候的共同影响, 环境脆弱敏感, 对气候和全球环境变化十分敏感, 是研究我国西部环境变化、青藏高原隆升过程、环境效应及它们与全球联系的极佳场所 (Lister et al, 1991)。从 20 世纪初开始, 已经有众多学者对青海湖做了大量基础研究, 尤其是 20 世纪 60 年代以来, 更多学者使用现代分析方法对青海湖湖泊沉积物的古气候演化信息做了大量工作 (Kelts, 1989; Shen et al, 2005; An et al, 2006; Liu et al, 2016)。

由于干旱-半干旱地区的湖泊普遍存在碳库效应 (Deevey et al, 1954; Olsson, 1980; Beukens et al, 2004), 对建立湖泊沉积物年代框架带来了诸多不便。对此, 已有学者开始着手解决此问题, 并提出了不同的校正方法。Shen et al (2005) 将青海湖东南湖盆 QH2000 钻孔 18 ka 以来的碳库效应定为 1039 年。汪勇等 (2007) 通过测定湖水溶解无机碳 (DIC) 的 ^{14}C 浓度以及大气二氧化碳的 ^{14}C 浓度, 采用两者的比值来校正湖水的硬水效应, 认为青海湖表层沉积物有机质 ^{14}C 年龄不老于 1549 年, 青海湖硬水效应在 7—1 ka BP 是逐渐增强的。然而由于硬水效应仅考虑了湖水与大气的交换, 并没有考虑流域河流等其他途径直接带入的老碳酸盐老碳等其他因素的

影响。Yu et al (2007) 采用双盒模型模拟法, 综合考察了青海湖湖水以及湖泊表层沉积物早期成岩带 ^{14}C 质量平衡来评价陆相输入、自生物质以及生物地球化学过程中 ^{14}C 的迁移转化, 模拟得出核爆之前湖水 DIC、溶解有机碳 (DOC) 的库效应均为 1500 年左右。然而由于青海湖地区对气候变化的敏感性, 其水热组合在地质历史时期存在较大的变化, 因此模拟方法获得的碳库效应可能只适用于现代沉积物。程鹏 (2008) 采用平均值概念 (Zhou et al, 2007) 对青海湖长钻孔 1F 岩芯不同的沉积阶段进行线性回归确定了青海湖 1F 孔 32000 年以来的碳库效应, 认为 12.84 m 以上碳库效应为 289 年, 12.84 m 以下碳库效应为 804 年 (程鹏, 2008)。王浩 (2011) 对青海湖不同点位的现代表面样品进行了 AMS- ^{14}C 年龄测试, 发现青海湖空间上的表面年龄均不相同, 跨度范围达几十年到几百年, 这说明青海湖现代碳库效应空间上的复杂性, 在不同的湖泊位置有不同的碳库效应。

20 世纪 90 年代中期以来, 随着加速器质谱 (AMS) 技术、制备毛细管气相色谱 (PCGC)、高效液相色谱 (HPLC) 等技术的不断成熟, 晚第四纪沉积物中含量较为丰富的烷烃和木质素也逐步成为 ^{14}C 测年研究对象 (Eglinton et al, 1996, 1997; Pearson et al, 2001; Rethemeyer et al, 2004; 陈清敏等, 2011), 并逐渐得到应用。Hou

et al (2010) 采用微波消解系统氧化铜氧化法以及 HPLC 分离纯化方法提取了青海湖三个岩芯样品木质素化合物进行 ¹⁴C-AMS 测年, 木质素的 ¹⁴C 年龄都比全有机碳年龄偏年轻, 不同沉积深度的 ¹⁴C 年龄偏差显著不同, 在末次冰期和全新世分布在 700—1581 年, 说明不同时期青海湖硬水影响是变化的, 因此通过减去现代湖水 DIC 年龄来计算整个岩芯的年代校正不够准确。本文基于此方法对青海湖 1A 孔上部 0—4 m 岩芯进行木质素单体的 ¹⁴C-AMS 测年研究, 并与程鹏 (2008) 采用平均值概念方法建立的年代框架相互佐证, 以期对青海湖湖泊沉积物建立可靠的年代标尺。

1 样品采集和分析

青海湖钻探工程由 ICDP (国际大陆科学钻探) 项目指定钻探公司 DOSECC 实施。2005 年 7 月, 在青海湖东南湖湾 (36°48'40.7"N, 100°08'13.5"E), 水深 24.7 m 处采集了 18.47 m 的青海湖沉积物样品 (1A, 图 1)。岩芯采集上岸后统一封存并运往中国科学院地球环境研究所岩芯库冷冻保存。

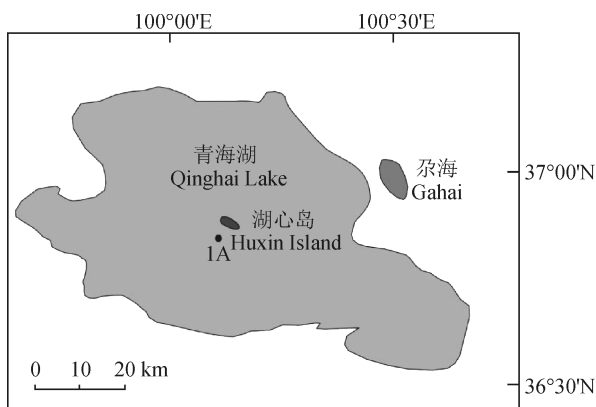


图 1 青海湖 1A 钻孔位置图
Fig.1 Location of 1A core in Qinghai Lake

样品的制备过程如下: 称取 3 mg 左右沉积物样品研磨至 80 目以下, 采用 1 mol·L⁻¹ HCl 溶液酸洗, 充分去除无机碳酸盐成分。利用快速溶剂萃取仪 (ASE200) 完成有机组分抽提实验, 萃取溶剂为二氯甲烷和甲醇溶液 (体积比为二氯甲烷: 甲醇=9:1)。通过微波消解作用碱性氧化铜氧化水解木质素高分子, 并利用层析柱萃取不同有机组分。通过反相液相色谱 (RP-HPLC) 分离并收集木质素。RP-HPLC 仪器条件: Agilent 1000 液相色

谱, 配以自动进样器、二极管阵列探测器 (DAD) 和收集系统 (4.6×12.5 mm×5 μm 的 ZORBAX Eclipse XDB-C18 柱, 带有 4.6×12.5 mm×5 μm 的 ZORBAX Eclipse AAA 防护柱)。控制程序为 LC/MSD ChemStation 软件。木质素提取实验在美国华盛顿大学完成, 木质素 AMS-¹⁴C 测年在美国加州大学欧文分校加速器实验室完成。

2 结果与讨论

2.1 青海湖 1A 孔木质素 AMS-¹⁴C 测年结果

对青海湖 1A 孔 0—4 m 已知年代数据 (程鹏, 2008) 相近深度的样品, 开展木质素测年研究, 并进行对比验证。按照以上方法处理了青海湖 1A 孔 0—4 m 不同深度共 12 个样品, 分别提取了木质素。其中有 2 个样品因样品量过低 (<2 μg), 不能进行 AMS-¹⁴C 测量。分别将其他 10 个样品的木质素组分进行 AMS-¹⁴C 测量, ¹⁴C 年龄通过 CALIB 6.0 软件 (<http://calib.qub.ac.uk/>) 来校正 (表 1)。¹⁴C 年龄的深度序列见图 2。青海湖 1A 孔 10 个沉积物样品木质素纯碳量分布在 6.3—29.2 μg, 测量误差 150—1060 年。

青海湖 1A 孔 0—4 m 9 个沉积物 TOC AMS-¹⁴C 年龄线性回归方程为:

$$Y_{\text{TOC}} = 18.397x + 723.52 \quad (\text{程鹏, 2008}) \quad (1)$$

式中: Y_{TOC} 为年龄, x 为深度。

根据以上方程, 算出与木质素样品同深度的 TOC 年龄 Y_{TOC} , 根据公式:

$$\Delta Y = Y_{\text{Lignin}} - Y_{\text{TOC}} \quad (2)$$

计算出同一深度木质素 ¹⁴C 年龄 (Y_{Lignin}) 与 TOC ¹⁴C 年龄的差值 ΔY (图 3)。各个深度 ΔY 的平均值为 392 年, 说明在 10 个木质素样品深度上, 木质素的 ¹⁴C 年龄比 TOC ¹⁴C 年龄平均偏老 392 年。

2.2 青海湖 1A 孔木质素 ¹⁴C 年龄与 1F 孔 TOC ¹⁴C 年代框架对比

课题组对青海湖 1F 孔岩芯进行了大量工作, 程鹏 (2008) 采用平均值概念对 1F 孔 TOC ¹⁴C 年龄进行了分段线性回归, 建立了年代学框架。根据 1F 孔 0—4.99 m TOC ¹⁴C 年龄线性回归方程:

$$y = 23.522x + 126.07 \quad (3)$$

计算出木质素样品各个深度的 TOC ¹⁴C 年龄, 并且得出 1F 孔 0—4.99 m 老碳年龄为 126 年。此外, 课题组已根据多项古气候代用指标将 1A 孔深度校正到 1F 孔深度。表 2 列出了 1A 孔木质素样品校

正到 1F 孔的深度以及对应的木质素 ^{14}C 校正年龄和 1F 孔 TOC ^{14}C 校正年龄。拟将 1A 孔木质素 ^{14}C

年龄与 1F 孔 TOC ^{14}C 年代框架对比, 以期检验木质素 ^{14}C 测年去除老碳效应的可靠性。

表 1 青海湖 1A 孔沉积物样品木质素 AMS- ^{14}C 测量结果
Tab.1 The results of lignin AMS- ^{14}C dating for the lacustrine sediments from Qinghai Lake 1A core

实验室 编号 Lab No.	样品 编号 Sample No.	深度 Depth /cm	纯碳 Pure carbon / μg	FM	\pm	$\Delta^{14}\text{C}/\text{‰}$	\pm	^{14}C 年龄 ^{14}C age /a BP	\pm
UCIT21723	QH-1	4.87	6.3	0.6425	0.0789	-362.2	78.9	3550	990
UCIT21724	QH-2	19.18	10.4	0.8324	0.0438	-173.6	43.8	1470	430
UCIT21725	QH-3	26.15	8.3	0.7054	0.0538	-299.7	53.8	2800	620
UCIT21727	QH-5	107.40	29.2	0.7431	0.0131	-262.3	13.1	2390	150
UCIT21729	QH-7	140.19	8.3	0.6137	0.0525	-390.8	52.5	3920	690
UCIT21730	QH-8	196.94	14.6	0.6454	0.0265	-359.2	26.5	3520	340
UCIT21731	QH-9	257.38	12.5	0.4515	0.0318	-551.8	31.8	6390	570
UCIT21732	QH-10	300.24	25.0	0.4800	0.0143	-523.4	14.3	5900	240
UCIT21733	QH-11	342.10	12.5	0.4160	0.0321	-587.0	32.1	7050	630
UCIT21734	QH-12	398.68	8.3	0.4109	0.0541	-592.1	54.1	7150	1060

^{14}C 校正年龄取均值。

^{14}C cal age is median probability.

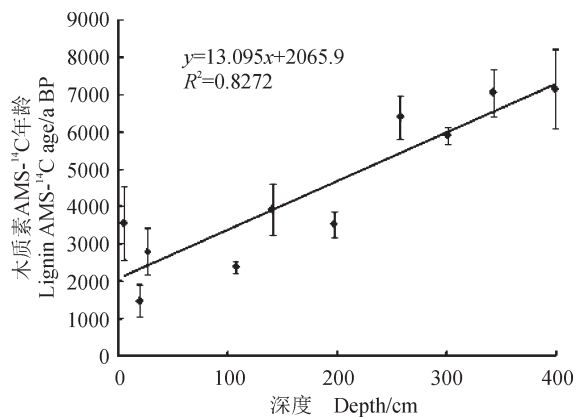


图 2 青海湖 1A 孔沉积物样品木质素 AMS- ^{14}C 年龄深度序列

Fig.2 The age-depth sequence of lignin AMS- ^{14}C dating for the lacustrine sediments from Qinghai Lake 1A core

由于样品量越小, AMS- ^{14}C 测量误差越大, 因此去掉样品量较小的点, 再将木质素与 TOC AMS- ^{14}C 测年结果进行对比。

(1) 去掉木质素样品量小于 $8\ \mu\text{g}$ 的点

木质素样品量小于 $8\ \mu\text{g}$ 只有 1 个点, QH-1 ($6.3\ \mu\text{g}$)。去掉 QH-1, 将其他 9 个点木质素 ^{14}C 年龄与 TOC ^{14}C 年龄进行对比。通过计算, 木质素 ^{14}C 年龄比同深度的 1F 孔 TOC ^{14}C 年龄平均偏老

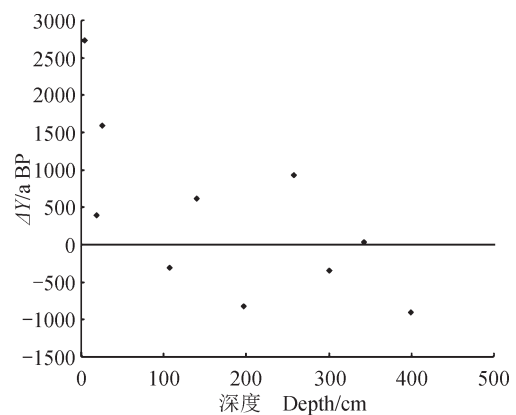


图 3 同一深度木质素 ^{14}C 年龄 (Y_{lignin}) 与 TOC ^{14}C 年龄的差值 ΔY

Fig.3 The difference value (ΔY) between lignin ^{14}C age and TOC ^{14}C age for the lacustrine sediments at the same depth

73 年。

(2) 去掉木质素样品量小于 $10\ \mu\text{g}$ 的点

木质素样品量小于 $10\ \mu\text{g}$ 有 QH-1 ($6.3\ \mu\text{g}$)、QH-3 ($8.3\ \mu\text{g}$)、QH-7 ($8.3\ \mu\text{g}$)、QH-12 ($8.3\ \mu\text{g}$) 共 4 个点。去掉这 4 个点, 将其他 6 个点木质素 ^{14}C 年龄与 TOC ^{14}C 年龄进行对比。通过计算, 木质素 ^{14}C 年龄比同深度的 1F 孔 TOC ^{14}C 年龄平均偏年轻 110 年。

表2 青海湖 1A 孔木质素样品校正到 1F 孔的深度以及 ¹⁴C 年龄
Tab.2 The corrected depths and ages of 1F core for the lignin samples from 1A core

样品 编号 Sample No.	1A 孔深度 1A depth /cm	校正到 1F 孔深度 1F depth /cm	木质素 ¹⁴ C 年龄 Lignin ¹⁴ C cal age /a BP	1F 孔 TOC ¹⁴ C 年龄 1F TOC ¹⁴ C cal age /a BP
QH-1	4.87	8.57	3914	327.67
QH-2	19.18	20.33	1424	604.26
QH-3	26.15	26.50	2957	749.31
QH-5	107.4	128.56	2460	3149.98
QH-7	140.19	150.83	4364	3673.98
QH-8	196.94	194.50	3844	4701.10
QH-9	257.38	257.71	7214	6187.97
QH-10	300.24	307.76	6745	7365.26
QH-11	342.1	345.92	7918	8262.92
QH-12	398.68	404.46	8069	9639.81

¹⁴C 校正年龄取均值。

¹⁴C cal age is median probability.

从两组对比中可以看出, 木质素样品量越大, 与 1F 孔 TOC ¹⁴C 年龄的差值越接近采用平均值概念分段线性回归确定的 1F 孔 4.99 m 以上碳库效应 (126 年) (程鹏, 2008)。可能是由于样品量越小测量误差越大, 样品制备、测量各个环节引入的污染更加显著。木质素是地球上数量仅次于纤维素的有机物, 仅来源于微管植物, 是植物细胞壁的主要组成部分, 占植物干重的 15%—36%。木质素大分子很难被降解, 不能被动物所消化, 主要以植物残体或水中悬浮物的形式搬运到沉积物中, 埋藏后受到的氧化降解也很小, 因此沉积物中的木质素能够有效代表沉积时的环境条件, 木质素单体可作为可靠的 ¹⁴C 测年对象。在样品量足够的情况下, 木质素单体 ¹⁴C 测年可有效减少老碳效应的影响。以上对比结果也佐证了程鹏 (2008) 通过 TOC ¹⁴C 定年并采用平均值概念进行分段线性回归建立的青海湖湖泊沉积物年代框架的可靠性。

3 总结

(1) 青海湖 1A 孔 0—4 m 不同深度共 10 个沉积物木质素样品 ¹⁴C 年龄线性较好, 并且与采用 TOC AMS-¹⁴C 测年方法建立的年代框架 (程鹏, 2008) 相近。

(2) 采用逐级去除小碳量样品的方法, 将青海湖 1A 孔木质素样品 ¹⁴C 校正年龄与 1F 孔对应深度的 TOC ¹⁴C 校正年龄相比较, 发现木质素样品量越大, 与 1F 孔 TOC ¹⁴C 年龄的差值越接近采

用平均值概念分段线性回归确定的 1F 孔 4.99 m 以上碳库效应 (126 年) (程鹏, 2008)。说明在样品量足够的情况下, 木质素单体 ¹⁴C 测年可有效减少老碳效应的影响。

(3) 对比结果佐证了通过 TOC-¹⁴C 定年并采用平均值概念进行分段线性回归法建立的青海湖湖泊沉积物年代框架的可靠性。

致谢: 感谢中国科学院地球环境研究所安芷生院士对本项目工作的支持和指导, 感谢美国华盛顿大学 Julian P Saches 教授和中国科学院青藏高原研究所侯居峙研究员在木质素提取实验中给予的指导和帮助, 感谢美国加州大学徐小梅博士在木质素 AMS-¹⁴C 测年工作中给予的帮助和支持。

参考文献

- 陈清敏, 王 喆, 余华贵. 2011. 分子化石单体 AMS-¹⁴C 测年研究进展 [J]. *安徽农业科学*, 39(35): 21563—21565, 21576. [Chen Q M, Wang Z, Yu H G. 2011. Research progress of AMS-¹⁴C dating on molecular fossil [J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 39(35): 21563—21565, 21576.]
- 程 鹏. 2008. 晚第四纪沉积物 ¹⁴C 年代学研究 [D]. 北京: 中国科学院研究生院. [Cheng P. 2008. ¹⁴C dating of late Quaternary sediments [D]. Beijing: Graduate University of Chinese Academy of Science.]
- 汪 勇, 沈 吉, 吴 健, 等. 2007. 湖泊沉积物 ¹⁴C 年龄硬水效应校正初探——以青海湖为例 [J]. *湖泊科学*, 19(5): 504—508. [Wang Y, Shen J, Wu J, et al. 2007. Hard-

- water effect correction of lacustrine sediment ages using the relationship between ^{14}C levels in lake waters and in the atmosphere: the case of Lake Qinghai [J]. *Journal of Lake Science*, 19(5): 504–508.]
- 王 浩. 2011. 青海湖湖相沉积 ^{14}C 年代学与古环境研究 [D]. 北京: 中国科学院研究生院. [Wang H. 2011. Study on paleoenvironment and ^{14}C dating of lacustrine sediments from Qinghai Lake [D]. Beijing: Graduate University of Chinese Academy of Science.]
- An Z S, Li A, Colman S M, et al. 2006. Lake Qinghai Scientific Drilling Project [J]. *Scientific Drilling*, 1(2): 20–22.
- Beukens R P, Gove H E, Litherland A E, et al. 2004. The old carbon project: how old is old? [J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, 223/224: 333–338.
- Deevey E S, Gross M S, Huntchinson G E, et al. 1954. The national ^{14}C contents of materials from hard-water lake [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 40: 285–288.
- Eglinton T I, Aluwihare L I, Bauer J E, et al. 1996. Gas chromatographic isolation of individual compounds from complex matrices for radiocarbon dating [J]. *Analytical Chemistry*, 68: 904–12.
- Eglinton T I, Benitez-Nelson B C, Pearson A, et al. 1997. Variability in radiocarbon ages of individual organic compounds from marine sediments [J]. *Science*, 277(8): 796–799.
- Hou J Z, Huang Y S, Brodsky C, et al. 2010. Radiocarbon dating of individual lignin phenols: A new approach for establishing chronology of late quaternary lake sediments [J]. *Analytical Chemistry*, 82(17): 7119–7126.
- Kelts K. 1989. Geological fingerprints of climate history—a cooperative study of Qinghai Lake, China [J]. *Eclogae Geologicae Helvetiae*, 8(21): 167–182.
- Lister G S, Kelts K, Chen K Z, et al. 1991. Lake Qinghai, China: closed-basin lake levels and the oxygen isotope record for ostracoda since the last Pleistocene [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 84(1/2/3/4): 141–162.
- Liu X X, Vandenberghe J, An Z S, et al. 2016. Grain size of Lake Qinghai sediments: Implications for riverine input and Holocene monsoon variability [J]. *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology*, 449: 41–51.
- Olsson I U. 1980. Radiocarbon dating of material from different reservoirs [M]// Suess H E, Berger R. Radiocarbon Dating. San Diego: UCLA Press: 613–618.
- Pearson A, McNichol A P, Benitez-Nelson B C, et al. 2001. Origins of lipid biomarkers in Santa Monica Basin surface sediment: a case study using compound-specific $\Delta^{14}\text{C}$ analysis [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 65(18): 3123–3137.
- Rethemeyer J, Kramer C, Gleixner G, et al. 2004. Complexity of soil organic matter: AMS ^{14}C analysis of soil lipid fractions and individual compounds [J]. *Radiocarbon*, 46(1): 465–473.
- Shen J, Liu X Q, Wang S, et al. 2005. Palaeoclimatic changes in the Qinghai Lake area during the last 18,000 years [J]. *Quaternary International*, 136(1): 131–140.
- Yu S Y, Shen J, Stenven C M. 2007. Modeling the radiocarbon reservoir effect in lacustrine system [J]. *Radiocarbon*, 49(3): 1241–1254.
- Zhou W J, Chen M B, Xian F, et al. 2007. The mean value concept in mono-linear regression of multi-variables and its application to trace studies in Geo-sciences [J]. *Science in China: Series D*, 50(12): 1828–1834.