

# Discussion about the Effects and Forming Times of Carbon Reservoir of Lacustrine Sediments in Lake Dongping, North of China

Liwei Yang<sup>1</sup>, Shiyue Chen<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>College of Environment & Planning, Liaocheng University, Liaocheng

<sup>2</sup>College of Urban and Environmental, Jiangsu Normal University, Xuzhou

Email: [yangliwei2013a@126.com](mailto:yangliwei2013a@126.com), [sychen2006@sina.com](mailto:sychen2006@sina.com)

Received: Sep. 4<sup>th</sup>, 2014; revised: Oct. 2<sup>nd</sup>, 2014; accepted: Oct. 12<sup>th</sup>, 2014

Copyright © 2014 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

---

## Abstract

We present here determine <sup>14</sup>C ages of submerged aquatic plant (*Potamogeton malaianus*), lake water and sediments from Lake Dongping in Shandong province, China, comparing the result with the <sup>210</sup>Pb dating and combining with the analysis of the formation of Lake Dongping and flood event of the Yellow River, to evaluate the reservoir age. It shows that the Lake Dongping formed in around 516 AD for the flood of the Yellow River, and reservoir effect of sediments does exist with the depth. The average annual hardwater effect age is 484 a. The reservoir ages of the lake sediments are changes between 1000 a and 2000 a, up to 3700 a. The reason for the reservoirs ages changing with the depth is related to the “old carbon” sediments carrying from the historical flood of the Yellow River, peleo-Jishui river, catchment and human activities. Due to the reservoir age of lacustrine sediments in Lake Dongping is temporally variable, it is necessary to carefully analyse the different lithologic characteristics of the sediment layers and use various possible methods to determine the age of sediments, in order to establish a precise chronological framework for a reliable age basis to interpret the paleoenvironmental changes in this area.

## Keywords

Reservoir Effect, <sup>14</sup>C Age, Lacustrine Sediments, Lake Dongping

---

# 东平湖沉积碳库效应与形成年代探讨

杨丽伟<sup>1</sup>, 陈诗越<sup>2\*</sup>

\*通讯作者。

<sup>1</sup>聊城大学环境与规划学院, 聊城

<sup>2</sup>江苏师范大学城市与环境学院, 徐州

Email: [yangliwei2013a@126.com](mailto:yangliwei2013a@126.com), [sychen2006@sina.com](mailto:sychen2006@sina.com)

收稿日期: 2014年9月4日; 修回日期: 2014年10月2日; 录用日期: 2014年10月12日

## 摘要

本研究通过对山东省东平湖现生沉水植物、湖水、沉积岩芯样品的<sup>14</sup>C年代的测定, 并将结果与<sup>210</sup>Pb测年结果进行对比研究, 同时结合东平湖形成的历史过程与黄河洪水事件的分析, 探讨了东平湖沉积物的碳库效应, 初步确定了东平湖形成年代。研究表明: 东平湖大致形成于公元516年前后, 是黄河泛滥的产物; 东平湖碳库效应随沉积层序有显著变化, 其中湖泊多年平均硬水效应为484 a, 沉积物碳库效应年龄一般为1000~2000 a, 最高可达3700 a。这种沉积物碳库效应随沉积层序发生变化的原因与历史时期黄河泛滥、古济水、流域老碳以及人类活动等多种因素的复杂影响有关。由于东平湖沉积物碳库效应年龄随时间并非恒定, 因此必须在仔细分析不同层序的沉积物的基础上, 运用多种可能的方法测定沉积物年龄, 并相互比较验证, 以建立准确的年代框架, 为该区古环境变迁信息解读提供可靠的年代基础。

## 关键词

碳库效应, <sup>14</sup>C年龄, 湖泊沉积物, 东平湖

## 1. 引言

建立精确可靠的年代是研究过去环境变化的基础[1]-[4]。放射性碳法(<sup>14</sup>C法)是100 a B.P.~50 ka B.P.时间范围内的主要定年方法[5]。其基本假设是: 大气中宇宙射线产生的<sup>14</sup>C通过光合作用进入植物体内并与大气中的<sup>14</sup>C含量达到平衡, 即生物体存活期间具有与大气相近的<sup>14</sup>C含量, 一旦生物体死亡之后, 其体内<sup>14</sup>C含量便按其半衰期衰减(<sup>14</sup>C半衰期是5730 a):  $N = N_0 e^{-\lambda t}$ , 其中,  $N_0$ 是<sup>14</sup>C的初始含量, 是已知的,  $\lambda$ 是衰变参数, 这样可以根据样品中的N含量测定样品的年代t。

但由于碳库效应的影响, 样品的<sup>14</sup>C年龄往往与真实年龄存在差距[6]。就湖泊沉积物而言, 由于流域老碳和湖水硬水效应的共同作用, 沉积物<sup>14</sup>C年龄一般都比实际偏老。如张家富[7]等通过对固城湖沉积物全样有机质的<sup>14</sup>C年龄和石英的光释光年龄的对比研究发现, <sup>14</sup>C年龄总体上要老于光释光年龄约2000 a, 并将之归结为碳库效应的影响。为消除碳库效应的干扰, 大多研究者都是采用线性回归的方法获得碳库效应年龄, 即将深度为零的<sup>14</sup>C年龄回归值作为碳库效应年龄。研究表明, 碳库效应年龄在空间上有明显的差别, 如我国环渤海海岸带全新世沉积物碳库效应年龄为400 a[8], 青海湖为1039 a[9](还有700 a[10]和1500 a[11]之说), 岱海表层沉积物为2000 a[12], 青藏高原错鄂是3470 a[13], 而青藏高原班公错更高达6670 a[14]。近来, 吴艳宏[12]、汪勇[15]等研究认为, 湖泊沉积物<sup>14</sup>C年龄偏老的程度在湖泊水文状况和大气<sup>14</sup>C浓度等因素影响下会随着时间的推移而发生变化, 即在时间序列上碳库效应也并非恒定。

本文拟通过对东平湖沉积物<sup>14</sup>C年龄数据, 结合<sup>137</sup>Cs、<sup>210</sup>Pb测年数据以及湖泊发育过程与洪水事件等综合分析探讨东平湖沉积物的碳库效应及其层序变化, 为进一步精确解读该区环境变迁信息提供参考。

## 2. 研究区概况

东平湖(35°43'N~36°07'N, 116°02'E~116°18'E), 位于山东省西部东平县境内(图 1), 是黄河下游仅存的天然湖泊, 也是古梁山泊唯一遗存水域。东平湖目前面积 627 km<sup>2</sup>(包括老湖与新湖), 常年水面 209 km<sup>2</sup>, 平均水深 2~4 m [16]。湖区为暖温带大陆性半湿润季风气候区, 四季分明, 多年平均气温 13.4℃, 平均降水量为 640 mm, 多集中在夏季, 无霜期约 200 d。主要水源来自湖东南部的大清河(大汶河下游河段), 向北经小清河泄湖水入黄河。该区地质构造上位于鲁中隆断区域徐州凹陷带的交界处, 在不同方向的动力作用下, 产生了较大断裂带, 形成了构造洼地, 加上黄河与大汶河流经此地, 便成为地表径流和地下径流汇集的地区, 积水成湖[17]-[19]。

东平湖形成历史较为复杂, 以土山岛为中心地带的一片水域最早见于唐代记载[18] [20], 由于水景清美, 誉称“小洞庭”(土山岛上至今留有唐朝诗人东平太守苏源明建的“洄源亭”遗址), 又由于临近小安山, 也叫安山湖。北宋时期, 梁山泊因黄河泛滥扩大, 合并安山湖于其中。公元 1351 年黄河改道南流, 失去了黄河水补给的梁山泊逐步淤浅收缩, 到金末多涸为陆地, 但安山湖仍存于小安山以北。公元 1411 年, 明朝利用安山湖蓄水济运, 使安山湖成为重要的水柜留存于古运河南岸。1855 年, 黄河改道夺大清河入海, 淹没了包括安山湖在内的黄河与大汶河交汇地带的一大片洼地, 时称积水洼, 民国年间定名为东平湖。1958 年改建为东平湖水库, 成为黄河蓄滞洪区。

## 3. 材料与方法

2008 年 4 月在东平湖湖心(35°59'11.6"N, 116°11'35.3"E)水深 3.85 m 处, 用水上平台钻取 157 cm 长的

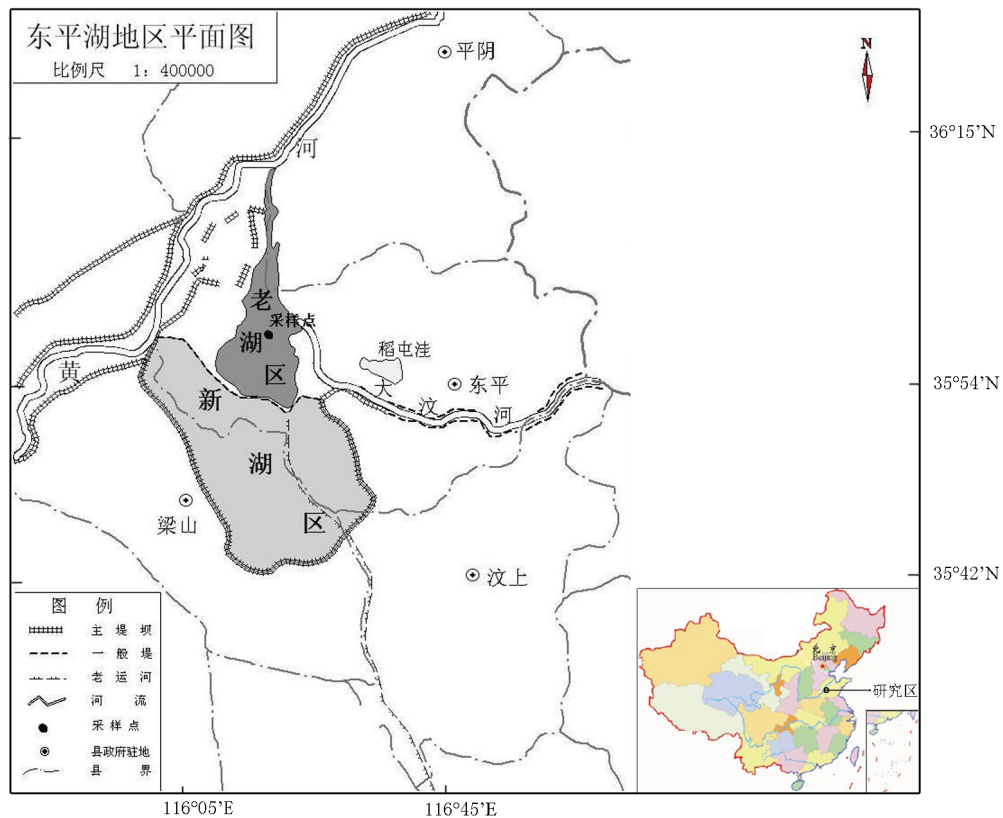


Figure 1. Sketch map of Lake Dongping and the sampling site

图 1. 东平湖及采样点位置示意图

沉积岩芯柱，用于常规分析；另用重力采样器在附近采得长为 60 cm 的短岩芯柱，密封保存，用于  $^{210}\text{Pb}$  和  $^{137}\text{Cs}$  测年。2011 年 4 月在湖心处采集了沉水植物马来眼子菜，用于  $^{14}\text{C}$  测年以确定湖水多年的平均年龄。同时利用自制采水器采集湖水样品和表层沉积物样品，湖水采自水深 1 m 处，点位与表层沉积物样品位置相近。所采湖水带回实验室后加  $\text{CaCl}_2$ ，蒸发获得结晶  $\text{CaCO}_3$  用于  $^{14}\text{C}$  年代测定。表层沉积物样品是利用重力采样器在湖心获得。

$^{210}\text{Pb}$  和  $^{137}\text{Cs}$  测年是在中国科学院南京地理与湖泊研究所湖泊沉积与环境国家重点实验室进行用美国 EG&GOrtec 公司生产的高纯锗井型探测器和 IBM 微机构成的 16K 多道分析器所进行的。

水草的  $^{14}\text{C}$  年代分析是由新西兰 National Isotope Centre, Institute of GNS science of New Zealand 完成的。湖水和表层沉积物样品在中国科学院地球环境研究所黄土与第四纪国家重点实验室利用加速器质谱仪(AMS)测定。岩芯柱 72 cm、119 cm、144 cm 处的  $^{14}\text{C}$  年龄在波兰 Poznań Radiocarbon Laboratory of the A. Mickiewicz University 完成，其余(13 cm、28 cm、38 cm) $^{14}\text{C}$  年龄在中国科学院南京地理南京地理与湖泊研究所利用液体闪烁计数仪(LSC)测定。

沉积岩芯柱粒度指标是在中国科学院南京地理与湖泊研究所湖泊沉积与环境国家重点实验室用英国 Mastersizer2000 激光粒度仪(分析范围 0.02  $\mu\text{m}$ ~2 mm)分析的。

## 4. 结果

### 4.1. 沉积物岩性与粒度特征

东平湖湖心 157 cm 长的沉积岩芯其岩性特征明显分为两部分(图 2)，120 cm 以下为灰黄色粉砂夹淡黄色粘土，属河流相沉积；120 cm 以上为湖相沉积，其中 120~10 cm 段主要为黄色或淡黄色粘土，10 cm 以下为淡黄色或灰黑色淤泥。

总体来看，沉积物粒度特征在 120 cm 处发生明显变化，120 cm 以下粒度较粗，中值粒径在 20  $\mu\text{m}$  以上，平均约 30  $\mu\text{m}$ ， $<4 \mu\text{m}$  的粘土含量在 20% 以下，平均 15%。反映该段沉积环境不稳定，水动力比较强。120 cm 以上沉积物粒度总体较细，中值粒径大多在 10  $\mu\text{m}$  以下，平均约 8.9  $\mu\text{m}$ ， $<4 \mu\text{m}$  的粘土含

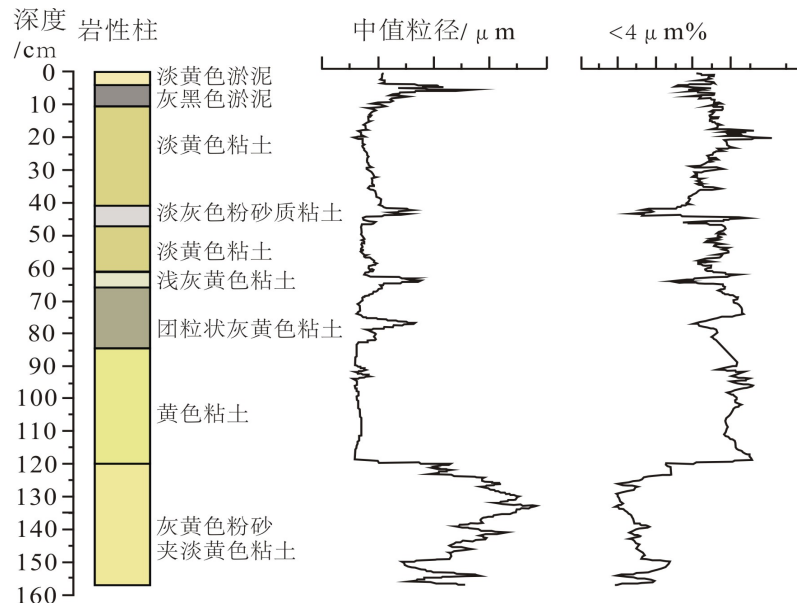


Figure 2. Lithological property and grain size in core of Lake Dongping  
图 2. 东平湖沉积岩性与粒度特征

量在 30% 以上, 平均 35.8%。反映该段沉积环境较稳定, 水动力较弱, 为相对静水沉积环境, 这也响应于沉积孢粉的记录[21]。

## 4.2. 年代结果

利用东平湖沉水植物马来眼子菜、湖水和沉积岩芯样品共获得了 9 个  $^{14}\text{C}$  年龄(表 1), 湖心沉水植物马来眼子菜、湖水和表层沉积物的  $^{14}\text{C}$  年龄分别为  $484 \pm 20$  a B.P.、 $2345 \pm 28$  a B.P 和  $1284 \pm 49$  a B.P., 沉积岩芯柱的  $^{14}\text{C}$  年龄从上到下依次为  $980 \pm 70$  a B.P.、 $1300 \pm 50$  a B.P.、 $1900 \pm 120$  a B.P.、 $2820 \pm 35$  a B.P.、 $5220 \pm 40$  a B.P.、 $5115 \pm 35$  a B.P., 除了底部样品外, 总体上  $^{14}\text{C}$  年龄随着深度增加而增加, 没有出现明显的年龄倒转现象, 说明沉积层序是比较稳定的。

东平湖沉积物  $^{137}\text{Cs}$  的蓄积峰位置在 12 cm 处, 对应于 1963 年人工核试验高峰, 利用 1963 年  $^{137}\text{Cs}$  核素蓄积峰进行校正, 采用  $^{210}\text{Pb}$  计年的 CRS 模式建立东平湖现代沉积年代序列, 具体结果见文献[22]。根据 CRS 模式建立的年代序列, 岩芯柱 13 cm、28 cm、38 cm 分别对应于 1962 年、1935 年、1905 年, 进一步可推测 47 cm 处约为 1855 年(表 1)。

## 5. 讨论

马来眼子菜(*Potamogeton malaiianus*)是一种多年生沉水草本植物, 其光合作用所需的  $\text{CO}_2$  主要来自于水体中的溶解碳, 因此所测得的其  $^{14}\text{C}$  年龄反映了湖水多年的平均年龄。从  $^{14}\text{C}$  测年结果来看, 东平湖湖水多年的硬水效应约为 484 a。

湖水的  $^{14}\text{C}$  年龄为  $2345 \pm 28$  a B.P., 明显高于沉水植物的  $^{14}\text{C}$  年龄。据监测, 东平湖湖心 4 月份的湖水 pH 值为 9.11, 明显大于 8 月份的 8.05, 10 月份的 7.91 和 12 月份的 7.83[23], 这是因为东平湖区春季干旱降水少, 湖水以地下水补给为主, 致使湖水的  $^{14}\text{C}$  年龄偏高。表层沉积物碳库效应年龄与组成沉积物有机碳来源的综合信息有关[13], 从  $^{14}\text{C}$  年龄结果来看, 表层沉积物碳库效应约为 1284 a, 高于多年沉水植物、低于湖水的碳库效应。

东平湖近现代沉积物(47 cm 以上)的  $^{14}\text{C}$  年代与  $^{210}\text{Pb}$  测年结果对比可明显看出碳库效应的存在。且随着深度增加碳库效应有增大的趋势(表 1), 如果考虑误差的话, 深度 13 cm、28 cm、38 cm 处的沉积物碳库效应年龄分别约为 980 a、1300 a、1900 a。这种碳库效应的变化可能与黄河泛滥以及人类活动有关。

**Table 1.**  $^{14}\text{C}$  and  $^{210}\text{Pb}$  dating results of Lake Dongping  
**表 1.** 东平湖  $^{14}\text{C}$  测年与  $^{210}\text{Pb}$  年代

深度(cm)	$^{14}\text{C}$ 测年材料	$^{14}\text{C}$ (a B.P.)	$^{210}\text{Pb}$ 年代
-	沉水植物	$484 \pm 20$	2011
-	湖水样	$2345 \pm 28$	2011
0	表层沉积物	$1284 \pm 49$	2011
13	TOC	$980 \pm 70$	1962
28	TOC	$1300 \pm 50$	1935
38	TOC	$1900 \pm 120$	1905
47	-	-	1855
72	TOC	$2820 \pm 35$	
119	TOC	$5220 \pm 40$	
144	TOC	$5115 \pm 35$	

1855年黄河在兰考铜瓦厢决口夺大清河北流入海,安山湖所在的汶河下游淤塞而成的东平湖常在黄河大汛时河水倒灌入湖,也带来了“老碳”沉积物。1935年黄河在鄄城和范县决口,河水南泛经淮河入海,1938年国民党又在花园口炸堤,河水南流入洪泽湖10a,东平湖失去黄河水源及其沉积物,碳库效应也相应减弱。1958年东平湖滞洪区改建为东平湖水库,黄河水一般不再能够进入东平湖,只有在黄河下游发生大洪水时才作为滞洪区使用,这样人为断绝了黄河水源的东平湖沉积物碳库效应应进一步减小。

从东平湖历史时期(47 cm以下)形成的沉积物的 $^{14}\text{C}$ 年代来看,其碳库效应也非常显著。导致沉积物碳库效应变化的原因更为复杂,黄河、古济水、流域“老碳”、湖泊硬水效应以及人类活动等都可能引起碳库效应变化的重要因素,尤以黄河泛滥为最。据研究,东平湖始见于唐代记载[18]。考虑到东汉王景治河以后黄河安流千年,后世学者一般就认为东平湖形成于唐代。笔者倒以为东平湖形成时代可能在唐朝以前,因为唐代初有东平湖记载时其面积已经很大,号称“小洞庭”了,而这么大一块湖面的形成必与重大的气候水文事件相关,不可能无故出现。但为什么史书不见任何记载呢?这可能与唐以前朝代的社会分裂有关。清代著名学者胡渭认为“魏晋南北朝,河之利害不可得闻,唐自长寿以来,时有决溢,见之于史,而无大变迁,故不志《河渠》”;虽强调“王景之功不可误”,但又明确指出:“肃、代以后,强藩跋扈,并帝制自为,次道云‘纵有河事,不闻朝廷’是也。而愚更有说焉。河灾羨溢,首尾亘千里之外,非一方可治,当四分五裂之际,尔诈我虞,唯魏、滑同患,故田弘正从薛平之请,协力共治,否则动多掣肘,纵有溢决,亦迁城邑以避之而已。此河功所以罕纪也。据史所书谓唐少河患,亦未为笃论。”北大学者辛德勇[24](2012)最近也撰文指出,王景治河后黄河下游河道千年安流并非事实,期间黄河也经常发生洪水,只是洪水并未导致河道变迁而已。北魏孝明帝时期就有崔楷治河议的记载:北魏孝明帝熙平三年(公元516年),黄河连年泛滥,弥漫冀、定等数州,崔楷特向皇帝提出治河的建议并被采纳,虽最后半途而废,但表明南北朝时期黄河洪水还是很频繁的。频繁泛滥的洪水导致东平湖地区的水系改变,并形成湖泊也是很有可能的。如是,则东平湖大约形成于公元516年左右。据此计算,119 m处的沉积物碳库效应可达3700 a左右。

公元944年,黄河在滑州决口,河水东漫梁山,形成梁山泊。公元1077至1168年,黄河数次决入梁山泊,使梁山泊进一步扩大并绵延数百里,安山湖并入其中。84~73 cm段沉积岩性与粒度值与其前有较大差别(图2),对应于该时期的黄河泛滥沉积。但其上72 cm处的 $^{14}\text{C}$ 年龄为 $2820 \pm 35 \text{ a B.P.}$ ,显然是受碳库效应的影响。若以公元1168年计,其碳库效应约为2038 a。

从沉积岩性来看,120 cm以下主要为河流相沉积,可能是古济水流经时的沉积物。《尚书·禹贡》有云:大野既潏,东原底平。表明大禹治水(古济水)以后,大野泽已经停聚深水,东原(东平古称东原)一带也获得治理。也可推知大禹时代东平湖地区就发育有古济水(济水发源于河南济源王屋山,是中国古代独流入海的一条大河,与黄河、长江、淮河并称为“四渎”。其经河南荥阳荥泽后分南济和北济流入大野泽,再从大野泽东北方梁山、东平一带流出,经泰山西南绕至泰山西北,然后北流入渤海),形成有河流沉积。这与岩性及粒度值反映也是相符的(图2)。144 cm处的河流沉积物 $^{14}\text{C}$ 年代为 $5115 \pm 35 \text{ a B.P.}$ ,由于河流沉积为动水环境,碳库效应年龄难以确定。

总的来看,利用 $^{14}\text{C}$ -AMS测年建立精确可靠的沉积物年代有一定的困难。就东平湖而言,由于东平湖的形成和演化与黄河和大汶河等水系密切相关,如东平湖就是历史上由大野泽、梁山泊和安山湖在黄河泛滥的作用下演变而来,并最终于1855年黄河在兰考铜瓦厢决口改道最终形成。黄河改道决溢的影响,带来的大量冲积物对沉积物层位真实年龄的测定带来困难,甚至出现年龄倒转;东平湖沉积物有机质含量相对较低[25],对 $^{14}\text{C}$ -AMS测年也带来一定误差;一般来说,当新形成的有机质含量占98%以上时,可以获得较为可靠的年代结果,而当受到较老有机质含量较大影响,由于“老碳效应”,测年的 $^{14}\text{C}$ 年龄并不能代表样品最后沉积时的年代,造成测年结果偏老,而且沉积物碳库效应在时间序列上也并非恒

定。可见,运用多种测年手段与方法对沉积物定年具有重要意义。

## 6. 结论

1) 公元 516 年前后,频繁泛滥的洪水导致东平湖地区的水系改变致东平湖成湖。

2) 由于历史时期黄河泛滥、古济水、流域老碳以及人类活动等多重因素的影响,东平湖沉积物碳库效应随着深度有明显变化,深度 0 cm、13 cm、28 cm、38 cm、72 cm、119 cm 处的沉积物碳库效应年龄分别约为 1284、980 a、1300 a、1900 a、2045 a、3700 a,湖泊的多年硬水效应是 484 a。

3)  $^{14}\text{C}$  测年技术是目前非常成熟的一个测年方法,但碳库效应的存在影响了沉积物  $^{14}\text{C}$  测年的准确性,尤其是碳库效应在时间序列上也并非恒定,因此利用  $^{14}\text{C}$  定年需要非常小心。采用简单线性回归技术获得的碳库效应年龄可能并不一定反映沉积物真实年龄,运用多种可能的方法测定沉积物年龄,并相互比较验证,来确定不同沉积时段的碳库效应年龄,以建立准确的年代框架,为古环境变迁信息解读提供可靠的年代基础。

## 致谢

中国科学院南京地理与湖泊研究所王苏民研究员、羊向东研究员、吴艳宏研究员、张恩楼研究员、潘红玺副研究员、王荣博士参加了野外采样工作,室内分析得到了夏威夷副研究员、刘恩峰博士等的帮助,特此感谢。

## 基金项目

国家自然科学基金项目(41072258, 40772209)。

## 参考文献 (References)

- [1] Hall, B.L. and Henderson, G.H. (2001) Use of uranium-thorium dating to determine past  $^{14}\text{C}$  reservoir effects in lakes: Examples from Antarctica. *Earth and Planetary Science Letters*, **193**, 565-577.
- [2] Butler, K., Prior, C.A. and Flenley, J.R. (2004) Anomalous radiocarbon dates from Easter Island. *Radiocarbon*, **46**, 395-405.
- [3] Vasilchuk, A.K. (2004) Radiocarbon dating of pollen and spores from ice wedges of the Yamal and Kolyma regions. *Biology Bulletin of the Russian Academy of Sciences*, **31**, 182-192.
- [4] Lian, O.B. and Roberts, R.G. (2006) Dating the quaternary: Progress in luminescence dating of sediments. *Quaternary Science Reviews*, **25**, 2449-2468.
- [5] 张兰生, 方修琦, 任国玉 (2000) 全球变化. 高等教育出版社, 北京, 12-14.
- [6] 张虎才, 雷国良, 常凤琴等 (2007) 柴达木盆地察尔汗贝壳堤剖面年代学研究. *第四纪研究*, **27**, 511-521.
- [7] 张家富, 周力平, 姚书春等 (2007) 湖泊沉积物的  $^{14}\text{C}$  和光释光测年——以固城湖为例. *第四纪研究*, **27**, 522-528.
- [8] 王宏, 李凤林, 范昌福等 (2004) 环渤海海岸带  $^{14}\text{C}$  数据集(I). *第四纪研究*, **24**, 601-613.
- [9] Shen, J., Liu, X.Q., Wang, S.M., et al. (2005) Palaeoclimate changes in the Qinghai lake area during the last 18000 years. *Quaternary International*, **136**, 131-140.
- [10] Henderson, A.G. and Holmes, J.A. (2009) Palaeolimnological evidence for environmental change over the past millennium from Lake Qinghai sediments: A review and future research prospective. *Quaternary International*, **194**, 134-147.
- [11] Yu, S.Y., Shen, J. and Cloman, S.M. (2007) Modeling the radiocarbon reservoir effect in lacustrine systems. *Radiocarbon*, **49**, 1241-1254.
- [12] 吴艳宏, 王苏民, 周力平等 (2007) 岱海  $^{14}\text{C}$  测年的现代碳库效应研究. *第四纪研究*, **27**, 507-510.
- [13] Wu, Y.H., Wang, S.M. and Hou, X.H. (2006) Chronology of holocene lacustrine sediments in Co Ngoin, Central Tibetan Plateau. *Science in China (Series D)*, **36**, 713-722.

- [14] Fontes, J.C., Gasse, F. and Gibert, E. (1996) Holocene environmental changes in Lake Bangong basin (West Tibet), Part 1: Chronology and stable isotope of carbonates of a Holocene lacustrine core. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, **120**, 25-47.
- [15] 汪勇, 沈吉, 刘兴起等 (2010) 青海湖全新世硬水效应随时间变化性及其对沉积物  $^{14}\text{C}$  年龄的校正. *湖泊科学*, **22**, 458-464.
- [16] Chen, S.Y. and Chen, Y.Y. (2011) Vertical variation of phosphorus forms in core sediments from Dongping Lake, China. *Procedia Environmental Sciences*, **10**, 1797-1801.
- [17] Chen, Y.Y., Chen, S.Y., Ma, C.M., *et al.* (2014) Palynological evidence of natural and anthropogenic impacts on aquatic environmental changes over the last 150 years in Dongping Lake, North China. *Quaternary International*.
- [18] 山东省黄河位山工程局东平湖志编纂委员会编 (1993) 东平湖志. 山东大学出版社, 济南.
- [19] 王苏民, 窦鸿生 (1998) 中国湖泊志. 科学出版社, 北京.
- [20] 喻宗仁, 窦素珍, 赵培才等 (2004) 山东东平湖的变迁与黄河改道的关系. *古地理学报*, **6**, 469-479.
- [21] Chen, Y.Y., Chen, S.Y., Liu, J.Z., *et al.* (2013) Environmental evolution and hydrodynamic process of Dongping Lake over the past 150 years, China. *Environmental Earth Sciences*, **68**, 69-75.
- [22] 陈诗越, 王苏民, 陈影影等 (2009) 东平湖沉积物  $^{210}\text{Pb}$ 、 $^{137}\text{Cs}$  垂直分布及年代学意义. *第四纪研究*, **29**, 981-987.
- [23] Wu, A.Q., Chen, S.Y., Zhang, J., *et al.* (2012) Assessment of eutrophication types of lakes and ecological risk of heavy metals in riparian soils in lower reaches of the Yellow River, China. *Energy Education Science and Technology Part A: Energy Science and Research*, **30**, 303-308.
- [24] 辛德勇 (2012) 由元光河决与所谓王景治河重论东汉以后黄河长期安流的原因. *文史*, **1**, 1-39.
- [25] Chen, Y.Y., Chen, S.Y., Yu, S.Y., *et al.* (2014) Distribution and speciation of phosphorus in sediments of Dongping Lake, North China. *Environmental Earth Sciences*.