

青海湖表层底泥中放射性同位素¹³⁷Cs的来源*

曾奕^{1,2}, 张信宝³, 周卫健¹, 齐永青³

(1: 中国科学院地球环境研究所, 西安 710075)

(2: 中国科学院研究生院, 北京 100049)

(3: 中国科学院、水利部成都山地灾害与环境研究所, 成都 610041)

摘要:青海湖是我国环境研究中的一个热点地区, 近年来¹³⁷Cs 计年技术已在这一地区得到广泛的应用. 已报道的青海湖沉积物中¹³⁷Cs 垂直分布曲线显示, 剖面最表层0–1 cm 泥沙的¹³⁷Cs 浓度约60 Bq/kg, 大致为峰值浓度的2/3, 远超过近年来大气沉降¹³⁷Cs 所应带来的沉积水平. 为查明青海湖表层底泥中放射性同位素¹³⁷Cs 的来源, 深入理解湖泊沉积过程, 本文对青海湖沉积剖面的¹³⁷Cs 面积活度与¹³⁷Cs 本底值、湖泊表层底泥的¹³⁷Cs 浓度与入湖河流洪水沉积泥沙开展了比对研究. 结果表明核爆期间的大气直接沉降是青海湖东南湖湾表层沉积物中的¹³⁷Cs 主要来源, 约占4/5, 风沙和入湖径流河沙的间接输入的¹³⁷Cs 仅占1/5. 而最表层0–1 cm 的沉积物中¹³⁷Cs 很可能主要来源于底泥扰动, 在这样的情况下, 利用沉积岩芯开展青海湖环境研究时, 分辨率的选取需要慎重考虑这一因素.

关键词:青海湖; ¹³⁷Cs; 垂直分布; 迁移

On the source of radioisotope ¹³⁷Cs in the surface sediments of Lake Qinghai

ZENG Yi^{1,2}, ZHANG Xinbao³, ZHOU Weijian¹ & QI Yongqing³

(1: Institute of Earth Environment, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710075, P. R. China)

(2: Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, P. R. China)

(3: Institute of Mountain and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, P. R. China)

Abstract: The ¹³⁷Cs dating technique has been applied widely in Lake Qinghai, one of the highlighted areas of environmental studies in China. The investigated vertical profiles indicate the ¹³⁷Cs content in the upmost surface sediment (the upper 1 cm layer of the surface) is about 60 Bq/kg (2/3 of the peak value), which is much higher than the supposed content caused by ¹³⁷Cs from atmosphere in recent years. In order to investigate the source of ¹³⁷Cs isotope and understand the process of the sediments forming, this paper focused on comparative studies of ¹³⁷Cs inventory both in background samples and in the sediments of Lake Qinghai. Comparative studies of ¹³⁷Cs content in sediments on the surface and in sediments at the confluence of contributing streams of Lake Qinghai were also carried out. The results indicate that atmosphere precipitation during the nuclear explosion is the major source of ¹³⁷Cs in the sediments of Lake Qinghai, causing 4/5 content of the total ¹³⁷Cs in the sediments of Lake Qinghai, with just 1/5 content from source of dust sands and contributing streams indirectly. ¹³⁷Cs in the upmost sediments mainly comes from bottom sediments. In such case, when the sediment core was used to study the environment of the Lake Qinghai, precautions should be taken when seeking for high resolution.

Keywords: Lake Qinghai; ¹³⁷Cs; vertical distribution; transfer

¹³⁷Cs 是上个世纪大气层核试验产生的人工放射性同位素, 半衰期 30.17 a. 核试验产生的¹³⁷Cs 尘埃主要随降水沉降到地面或水面, 苏、美签订禁止大气层核试验的 1963 年沉降量最大. ¹³⁷Cs 沉降到地面后, 随即被土壤颗粒强烈吸附, 基本不被植物摄取和淋溶流失, 它其后的迁移主要伴随土壤、泥沙颗粒的运动, 一

* 国家自然科学基金(40599420)资助项目. 2006–11–20 收稿; 2007–01–14 收修改稿. 曾奕, 女, 1982 年生, 硕士研究生; E-mail: zengyi04@mails.gucas.ac.cn.

部分 ^{137}Cs 随泥沙被径流和风带入湖泊、水库和海洋沉积。湖泊沉积物中 ^{137}Cs 的深度分布和核尘埃大气沉降量的变化趋势一致,典型深度分布剖面为^[1,2]: ^{137}Cs 始现于1954年左右的层位,浓度急剧增加至1963年层位后逐渐降低,剖面中1963年 ^{137}Cs 蓄积峰明显,是国内外公认的湖泊沉积 ^{137}Cs 断代标志^[3-6]。1986年前苏联切尔诺贝利地面核事故产生的 ^{137}Cs 核尘埃对欧洲的影响较大,对东亚影响不大^[7,8]。

20世纪80年代以来,万国江^[5,9,10]首先将 ^{137}Cs 湖泊沉积断代法引入国内以后,这一方法在我国得到了广泛应用^[11-14]。沈吉、张恩楼^[15,16]2000年7月在青海湖东南湖湾采集了长114 cm的沉积物岩芯,测定了 ^{137}Cs 的深度分布(图1)。由图可见, ^{137}Cs 峰值浓度约90 Bq/kg,出现于剖面深度5-6 cm的层位;剖面最表层0-1 cm泥沙的 ^{137}Cs 浓度约60 Bq/kg,大致为峰值浓度的2/3。日本东京核尘埃沉降监测资料^[8]表明(图2),1963年的 ^{137}Cs 年沉降量约2000 Bq/m²,1970年以后的年沉降量多低于100 Bq/m²,仅为1963年的1/20;前苏联切尔诺贝利地面核事故发生的1986年,年沉降量有所增加,约200 Bq/m²,也仅为峰值的10%。显然,青海湖1970年以后沉积的泥沙中的 ^{137}Cs 主要不是直接来源于核试验产生的核尘埃。其他的可能来源有湖泊周边河流的入库泥沙,沉降到湖面的风尘沉积和因湖泊底泥的扰动被翻动到表层的下部层位高 ^{137}Cs 浓度泥沙,但主要来源尚不明确。

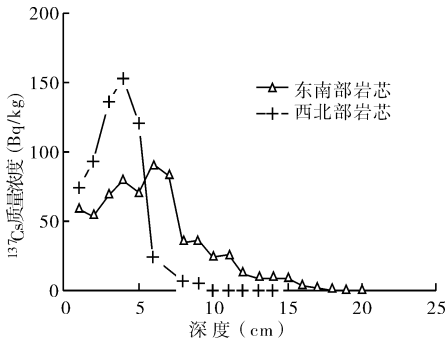


图1 青海湖沉积物中 ^{137}Cs 的测试结果^[15-17]

Fig. 1 Two ^{137}Cs profiles of the sediments in Lake Qinghai

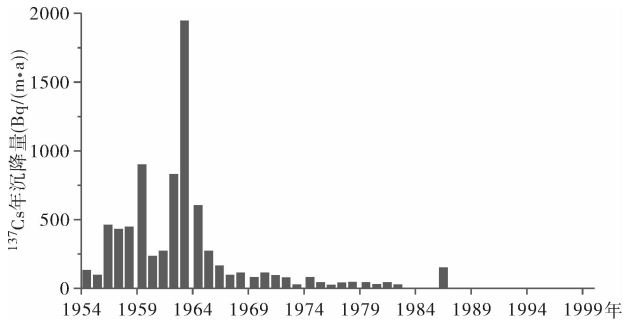


图2 日本东京1954-1999年期间 ^{137}Cs 年沉降量^[8]

Fig. 2 The annual ^{137}Cs deposition flux record of Tokyo, Japan

查明青海湖表层底泥中 ^{137}Cs 的主要来源,有助于深入认识青海湖沉积过程,了解湖泊底泥沉积后的迁移过程,并为进一步调查青海湖沉积泥沙的来源、湖泊污染物的输入途径提供了条件。2005年8月下旬,我们采集了湖边无侵蚀草地土壤,最大入湖河流布哈河的洪水沉积泥沙和湖泊底泥的样品,测定了 ^{137}Cs 含量,以期通过湖泊沉积剖面的 ^{137}Cs 面积活度与 ^{137}Cs 本底值、湖泊表层底泥的 ^{137}Cs 浓度与入湖河流洪水沉积泥沙的对比,探讨青海湖湖泊最表层底泥中 ^{137}Cs 主要来源。本文是该研究的初步报道。

1 样品采集与测试

青海湖位于青藏高原东北部(99°36' - 100°16'E, 36°32' - 37°15'N),处于我国东部季风区、西北部干旱区和西南部高寒区的交汇地带,是我国最大的内陆咸水湖,面积4400 km²,流域面积达29660 km²,湖水容积7.39 × 10¹⁰ m³,平均水深21.7 m,现代沉积速率为1.0 - 1.4 mm/a。青海湖入湖径流呈明显的不对称分布,湖北岸、西北岸和西南岸河流多、流域面积大、支流多;湖东南岸和南岸河流少,流域径流包括布哈河、沙柳河、哈尔盖河和乌哈乌兰河,它们均集中在青海湖北边,布哈河是最主要的径流,其流域面积为14337 km²,年径流量7.85 × 10⁸ m³,约占入湖径流总量的60%左右。

2005年8月,我们在青海湖流域内采集了 ^{137}Cs 本底值土壤样品、湖泊底泥样品和布哈河洪水沉积的泥沙样。 ^{137}Cs 本底值土壤样品,采集于南岸湖边无侵蚀草地(图3)。草地宽阔平坦,地面略向湖泊倾斜,坡度2.5°。植被以禾本科草本植物为主,覆盖度80%左右,草地局部植物丛生现象明显,草丛间有少量裸地出露。据调查,上世纪50年代以来取样草地一直为牧场,从未耕种。网格法(5 m × 5 m)取样,用荷兰Eijkelka-

mp 公司的 P05.02 型土壤钻(内径 8.0 cm)采集了 36 个土芯全样(BD01 - BD36), 取样深度 30 cm. 此外, 还在网格中心的位置采集了一个分层剖面样 BD37, 分层厚度 3 cm.

湖泊底泥样品, 乘船采集于青海湖渔场至海心山一线(图 3), 用内径 5.9 cm 的无扰动式重力钻采集底泥土芯, 取样深度 25 cm 左右. 湖泊底泥剖面全样 5 个(QHH01 - QHH05); 分层剖面样一个(QHH06), 分层厚度 3 cm; 此外还在 QHH04 样处, 采取了 3 个孔的底泥土芯, 将这几个孔的 0 - 4 cm 表层底泥混合为一个样(QHH04B).

布哈河入湖泥沙样, 取样前数日发生洪水, 取样时洪水刚退, 沿河滩地沉积了厚 5 - 20 cm 不等的洪水沉积泥沙. 我们在公路桥以上 500 m 内的沿河滩地, 用小土样铲, 采集了 5 个滩地洪水沉积表层 0 - 3 cm 泥沙样品(BHH01 - BHH05).

样品风干、研磨、过筛(2 mm)、称重后供测试用. 英国爱克塞特大学地理与考古系同位素实验室协助进行了全部样品的 ^{137}Cs 含量测定, 测定仪器为配备 n 型高纯锗探头(LOAX HPGe)的低能量、低本底 γ 能谱仪. 样品测重 > 100 g, 测试时间 > 26000 s, 测试误差为 $\pm 5\%$. 湖泊底泥和洪水沉积泥沙样品测定了粒度, 在中国科学院地球环境研究所用 Mastersize-s-2000 激光粒度仪测定.

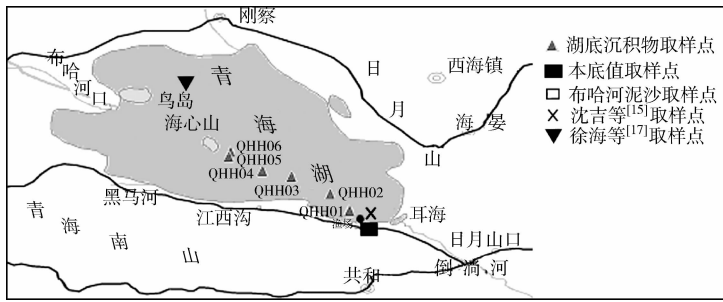


图 3 青海湖采样位置示意图

Fig. 3 The sketch map of sampling sites in Lake Qinghai

2 结果与讨论

2.1 湖泊底泥中的 ^{137}Cs

本次研究得到的孔 QHH06 的 ^{137}Cs 深度分布曲线(图 4)与以前的报道有一些差异. 沈吉, 徐海剖面给出了青海湖东南湖湾处底泥中 ^{137}Cs 的深度分布(图 1): 5 - 6 cm 层位的 ^{137}Cs 峰值浓度约 90 Bq/kg, 随着深度的增加和减少, 浓度均呈降低的趋势, 深度 15 cm 以下的底泥基本不含 ^{137}Cs . 我们的底泥剖面分层厚度为 3 cm, 深度 0 - 3 cm 表层底泥的 ^{137}Cs 浓度最高, ^{137}Cs 浓度随深度的增加呈减少的趋势, 深度 12 cm 以下底泥无 ^{137}Cs 检出, 由于分层过粗, 我们的剖面未能显示出 1963 年的 ^{137}Cs 蓄积峰, 蓄积峰应在 0 - 3 cm 的表层底泥层位中.

显然, 我们取样孔位处的 1963 年 ^{137}Cs 蓄积峰深度要小于沈吉、徐海的剖面^[7,8,15,17], 这表明东南湖湾处的沉积速率可能大于湖泊中部 QHH06 处.

分层剖面样孔和 4 个全样孔的取样深度均为 25 cm 左右, 远大于湖泊底泥 ^{137}Cs 最大可能分布深度, 因此剖面的 ^{137}Cs 面积活度可以表征 ^{137}Cs 的累积沉降量. 剖面的 ^{137}Cs 面积活度用下式计算:

$$R = WC/S \quad (1)$$

式中, R 为剖面的 ^{137}Cs 面积活度 (Bq/m^2); W 为底泥剖面样品总重 (kg); C 为样品的 ^{137}Cs 活度 (Bq/kg); S 为取样钻面积 (m^2).

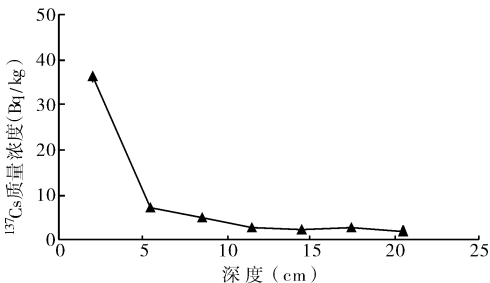


图 4 QHH06 孔 ^{137}Cs 深度分布

Fig. 4 The ^{137}Cs profile of the QHH06 sediment core

5个湖泊底泥剖面全样中(表1),除QHH02孔外,其余4个孔底泥土芯样品的¹³⁷Cs浓度、粒度的区别不大,¹³⁷Cs浓度 $8.13 \pm 0.68 - 14.47 \pm 1.03$ Bq/kg,平均粒径 $0.012 - 0.016$ mm,¹³⁷Cs面积活度在 $1007.37 (\pm 83.74) - 1861.31 (\pm 133.02)$ Bq/m²之间,平均 1396.70 ± 91.49 Bq/m². QHH02孔的¹³⁷Cs浓度高 20.59 ± 0.66 Bq/kg;粒度也粗,平均粒径 0.040 mm;¹³⁷Cs面积活度 3250.40 ± 103.41 Bq/m²,远高于其他4个孔. QHH02孔的¹³⁷Cs面积活度高、粒度粗,可能是该孔位于堆积区所致. 0-4 cm表层底泥样QHH04B的¹³⁷Cs浓度分别 58.94 ± 1.39 Bq/kg,与沈吉、张恩楼剖面0-1 cm的最表层底泥的¹³⁷Cs浓度 60 Bq/kg相近,低于该剖面0-4 cm底泥的¹³⁷Cs平均浓度. 这与三者的样品粒度差异有关,也可能反映了青海湖湖泊底泥¹³⁷Cs分布的实际情况,还可能是实验室之间的测试系统误差.

表1 青海湖沉积物¹³⁷Cs及粒度测试结果
Tab.1 ¹³⁷Cs and grainsize of sediments in Lake Qinghai

样品编号	¹³⁷ Cs 质量浓度 (Bq/kg)	¹³⁷ Cs 面积浓度 (Bq/m ²)	平均粒径 (mm)
QHH01	14.47 ± 1.03	1861.31 ± 133.02	0.016
QHH02	20.59 ± 0.66	3250.40 ± 103.41	0.040
QHH03	10.31 ± 0.77	1300.26 ± 97.22	0.012
QHH04	9.52 ± 0.54	1417.87 ± 80.77	0.016
QHH05	8.13 ± 0.68	1007.37 ± 83.74	0.014
QHH04B	58.94 ± 1.39	1470.9 ± 104.23	0.014

2.2 湖边草地的¹³⁷Cs本底值

草地土壤的¹³⁷Cs深度分布非常典型,0-3 cm表层土壤的¹³⁷Cs浓度最高,达 18.46 ± 0.98 Bq/kg,面积浓度为 760.47 ± 40.39 Bq/m²,¹³⁷Cs浓度随着深度的增加而衰减(图5),深度15 cm以下土层基本不含¹³⁷Cs. 草地土壤的¹³⁷Cs面积活度计算方法同湖泊底泥,用公式(1)计算. 采样地36个孔的¹³⁷Cs面积活度在 $0 - 4626.38 (\pm 223.94)$ Bq/m²之间,变幅较大,这可能与采样地部分地段为丛状草地有关. 草丛间的地面易于遭受雨滴溅蚀和风蚀,¹³⁷Cs面积活度低于本底值,个别侵蚀强烈处含¹³⁷Cs土层侵蚀殆尽,无¹³⁷Cs检出. 雨滴溅蚀和产生的泥沙多堆积于临近的草丛,草丛处的¹³⁷Cs面积活度往往大于本底值. 所采样方36个孔¹³⁷Cs面积活度平均值 1176.55 ± 76.11 Bq/m²,取此值为区域本底值.

2.3 布哈河洪水泥沙的¹³⁷Cs

布哈河滩地洪水沉积泥沙5个样品的平均粒径 $0.016 - 0.035$ mm,略细于QHH02样的 0.040 mm,略粗于其它4个湖泊底泥全样的 $0.012 - 0.016$ mm. 5个样品的¹³⁷Cs浓度介于 $3.09 (\pm 0.35) - 9.22 (\pm 0.78)$ Bq/kg(表2),有粒度越粗,¹³⁷Cs浓度越低的趋势. 平均粒径为 0.026 mm;平均浓度 5.46 ± 0.37 Bq/kg.

2.4 关于底泥中¹³⁷Cs的主要来源

湖泊底泥的¹³⁷Cs面积活度 1396.70 ± 91.49 Bq/m²,草地¹³⁷Cs本底值的面积活度 1176.55 ± 76.11 Bq/

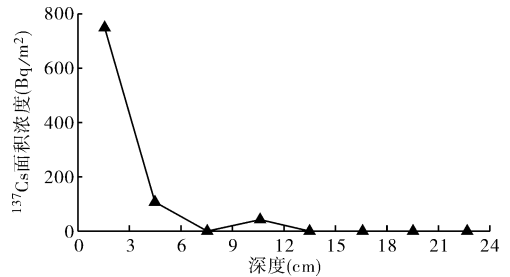


图5 本底样中¹³⁷Cs深度分布
Fig.5 Depth distribution of ¹³⁷Cs content in reference site

表2 布哈河洪水沉积物¹³⁷Cs及粒度测试结果
Tab.2 ¹³⁷Cs and grainsize of sediments in Buha River

样品	¹³⁷ Cs 质量浓度 (Bq/kg)	平均粒径 (mm)
BHH01	6.04 ± 0.33	0.030
BHH02	5.82 ± 0.20	0.028
BHH03	9.22 ± 0.78	0.016
BHH04	3.09 ± 0.24	0.035
BHH05	3.12 ± 0.30	0.023

m^2 , 后者略低, 为前者的 84.2%. 湖泊中 ^{137}Cs 的来源主要有两种, 一是核爆期间大气直接沉降, 一是入湖河流泥沙和核爆期后沉降于湖面的风尘的间接带入, 草地本底值可代表该区域核爆期间大气直接沉降的 ^{137}Cs 的量. 由此大致推测, 青海湖东南部湖泊底泥中的 ^{137}Cs 主要来源于上世纪 50 - 70 年代核爆期间湖面的直接沉降, 只有约 1/5 来源于入库河流泥沙和核爆期后沉降于湖面的风尘的间接带入.

青海湖 0 - 1 cm 层位的底泥, 是核爆期后近些年来的沉积物, 根据沈吉、张恩楼的剖面^[15,16], 青海湖东南湖湾最表层底泥(0 - 1 cm)的 ^{137}Cs 浓度 60 Bq/kg 左右, 最近徐海等^[17]在青海湖西北部采集了一个湖泊底泥的分层剖面样, 最表层底泥(0 - 1 cm)的 ^{137}Cs 浓度 75 Bq/kg 左右. 布哈河 5 个洪水沉积泥沙中, 与湖泊底泥的粒度相当、粒度最细的 BHH03 样品的 ^{137}Cs 浓度最高, 9.22 ± 0.78 Bq/kg, 也远低于上述报道中最表层底泥(0 - 1 cm)中 ^{137}Cs 浓度. 严平等^[18]在青海湖南侧的共和盆地收集了风尘沉积物, 并测定了 ^{137}Cs 浓度, 平均值为 3.48 ± 0.21 Bq/kg, 最大值也仅为 5.17 Bq/kg, 和布哈河洪水沉积泥沙的 ^{137}Cs 浓度无甚差异, 也远低于湖泊最表层底泥的 ^{137}Cs 浓度, 也就是说, 核爆期过后河水带入泥沙和风中 ^{137}Cs 的浓度都远低于湖泊最表层底泥的 ^{137}Cs 浓度.

以上的分析表明, 入湖河流泥沙和湖面沉降的风尘, 不可能是青海湖最表层底泥(0 - 1 cm)中 ^{137}Cs 的主要来源. 最表层底泥中的 ^{137}Cs 主要源于 ^{137}Cs 浓度较高的下部层位泥沙, 这一方面可能是因为 ^{137}Cs 自身的迁移, 另一方面可能是因为湖泊底泥的扰动将次表层的底泥泥沙翻动到底泥表层. 放射性核素沉积下来以后本身会通过间隙水以分子扩散的形式迁移, 这种自身的迁移可以使沉积物中 ^{137}Cs 蓄积峰值减少, 表层浓度增高, 尾部拖长, 因此不可否认, ^{137}Cs 的扩散性对增高表层沉积物中 ^{137}Cs 浓度有一定贡献. 但是, 另一方面, 湖泊沉积物中 ^{137}Cs 绝大部分处于固定态, 仅少量处于选择性吸附态和交换态, 交换态的 Cs^+ 、选择性吸附态的 Cs^+ 和固定态的 Cs^+ 在 Cs^+ 的总吸附量中所占的比例各为 3%、21% 和 76%^[12]. 所以自身迁移的 Cs^+ 数量有限, 多数 ^{137}Cs 能较好地保存在相应的沉积物中. 仅核素自身迁移这一个原因, 也是很难使表层沉积物达上文所报道的浓度. 因此生物、人类的活动和湖流运动、风浪作用造成的扰动可能才是表层浓度偏高的主要原因. 据访问渔场渔工, 青海湖冬季湖面封冻, 湖中的青海鲤鱼等鱼类沉到湖底过冬, 这可能是青海湖底泥扰动的原因之一.

3 结语

本文借鉴 ^{137}Cs 核示踪技术的研究方法, 在青海湖流域采集了 ^{137}Cs 本底值土壤样品、湖泊底泥样品和布哈河洪水沉积的泥沙样进行了细致的分析, 然后结合最表层泊底泥及风沙中 ^{137}Cs 浓度的已有资料进行了对比研究, 主要得到了以下结论:

(1) 青海湖湖泊底泥的 ^{137}Cs 面积活度 1396.70 ± 91.49 Bq/ m^2 , 草地 ^{137}Cs 本底值的面积活度 1176.55 ± 76.11 Bq/ m^2 . 这表明上世纪 50 - 70 年代核爆期间的人工核尘埃 ^{137}Cs 直接沉降是湖泊底泥中的 ^{137}Cs 主要来源, 约占 4/5, 入湖径流带入泥沙和风尘所间接带入的 ^{137}Cs 仅占 1/5.

(2) 青海湖近年来的最表层沉积物中 ^{137}Cs 含量较高, 在排除通常所讨论的各种影响因素(大气沉降、入湖河流泥沙和湖面沉降的风尘)之后, 可以认为最表层底泥中的 ^{137}Cs 主要源于 ^{137}Cs 浓度较高的下部层位泥沙. 湖泊底泥的扰动将次表层的底泥泥沙翻动到底泥表层, 导致最表层底泥中的 ^{137}Cs 浓度远高于入湖泥沙.

(3) 由于所处地理环境特殊, 青海湖一直是古环境研究中的一个热点区域. 由于湖泊底泥很可能受扰动的影响, 在利用沉积岩芯开展古环境研究时, 分辨率的选取需要慎重考虑这一因素.

4 参考文献

- [1] Ritchie J C, McHenry J R, Gill A C. Dating recent reservoir sediments. *Limnology and Oceanography*, 1973, **18**: 254 - 263.
- [2] Walling D E, He Qingping. Interpretation of caesium - 137 profiles in lacustrine and other sediments; the role of catchment-derived inputs. *Hydrobiologia*, 1992, **235/236**(1): 219 - 230.
- [3] Ritchie J C, McHenry J R. A comparison of three methods for measuring recent rates of sediment accumula-

- tion. *Water Resources Bulletin*, 1985, **21**(1): 99 – 103.
- [4] Walling D E, He Q. Use of fallout ¹³⁷Cs in investigations of overbank sediment deposition on river floodplains. *Catena*, 1997, **29**: 263 – 282.
- [5] 万国江, Santschi P H, Sturm M 等. 放射性核素和纹层纪念对比研究瑞士格莱芬湖近代沉积速率. 地球化学, 1986, (3): 259 – 270.
- [6] 张淑蓉, 徐翠华, 钟志兆等. 用²¹⁰Pb 和¹³⁷Cs 法测定洱海沉积物的年代和沉积速率. 辐射防护, 1993, **13**(6): 453 – 457, 465.
- [7] Shcherbak, Yuri M. Ten Years of the Chernobyl Era; The environmental and health effects of nuclear power's greatest calamity will last for generations. *Scientific American*, 1996, **4**: 44 – 49.
- [8] Japan Meteorological Agency. Bulletin of the Radioactivity vol. 83. Tokyo: JMA, 2001: 21.
- [9] 万国江, Santschi P, Farrenkothén K 等. 瑞士 Greifen 湖新近沉积物中的¹³⁷Cs 分布及其计年. 环境科学学报, 1985, **5**(3): 360 – 365.
- [10] 万国江, Santschi P H. 瑞士 Greifen 湖沉积物中放射性核素累计预测研究. 地理科学, 1987, **7**(4): 358 – 363.
- [11] 万国江, 林文祝, 黄荣贵等. 红枫湖沉积物¹³⁷Cs 垂直剖面的计年特征及侵蚀示踪. 科学通报, 1990, **35**(19): 1487 – 1490.
- [12] 徐经意, 万国江, 王长生等. 云南省泸沽湖、洱海现代沉积物中²¹⁰Pb、¹³⁷Cs 剖面及其沉积学意义. 湖泊科学, 1999, **11**(2): 110 – 116.
- [13] 叶崇开. ²¹⁰Pb 法和¹³⁷Cs 法对比研究鄱阳湖近代沉积速率. 沉积学报, 1991, **9**(1): 106 – 114.
- [14] 储国强, 顾兆炎, 许 冰等. 东北四海龙湾玛珥湖沉积物纹层计年与¹³⁷Cs、²¹⁰Pb 测年. 第四纪研究, 2005, **25**(2): 202 – 207.
- [15] 沈 吉, 张恩楼, 夏威岚. 青海湖近千年来气候环境变化的湖泊沉积记录. 第四纪研究, 2001, **21**(6): 508 – 513.
- [16] 张恩楼, 沈 吉, 王苏民等. 青海湖近 900 年来气候环境演化的湖泊沉积记录. 湖泊科学, 2002, **14**(1): 32 – 38.
- [17] XU Hai, AI Li, TAN Liangcheng *et al.* Geochronology of a surface core in the northern basin of Lake Qing-Hai: Evidence from ²¹⁰Pb and ¹³⁷Cs radionuclides. *Chinese Journal of Geochemistry*, 2006, **25**(4): 301 – 306.
- [18] 严 平, 董光荣. 青海共和盆地降尘观测与¹³⁷Cs 测定的初步结果. 环境科学, 2001, **22**(20): 64 – 68.
- [19] 吴艳宏, 王苏民, 侯新花. 青藏高原中部错鄂全新世湖泊沉积物年代学研究. 中国科学(D 辑), 2006, **36**(8): 713 – 722.
- [20] 窦明晓. 红枫湖沉积物中¹³⁷Cs 的扩散性研究. 地质地球化学, 1993, **5**: 94 – 95.