



论文

人类活动影响下的长江中游龙感湖近代湖泊沉积年代序列

吴艳宏^{①②*}, 刘恩峰^①, 邴海健^{①③}, 羊向东^①, 薛滨^①, 夏威岚^①^① 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 湖泊科学与环境国家重点实验室, 南京 210008;^② 中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所, 成都 610041;^③ 中国科学院研究生院, 北京 100049

* E-mail: yhwu@niglas.ac.cn

收稿日期: 2009-04-03; 接受日期: 2009-12-05

国家自然科学基金(批准号: 40772203)和中国科学院知识创新工程方向性项目(编号: KZCX2-YW-319)资助

摘要 龙感湖流域人类活动导致了用于计年的 ^{210}Pb 在沉积剖面上的分布状况受到影响, 直接影响到沉积年代的确定; 另一方面人类活动在沉积指标上有明显反映, 具有时标意义, 可以用于近代沉积物年代学研究, 以提高计年的准确性. 通过龙感湖 LS-1 孔和 LGL-1 孔上部 $^{210}\text{Pb}_{\text{exc}}$ 分布特征分析, 结合粒度等指标所指示的人类活动历史, 推算两孔上部平均沉积速率分别为 0.19 cm/a 和 0.23 cm/a. 两个孔的沉积物质量累积速率进一步表明: 在修建水库、闸坝等水利设施前龙感湖沉积通量的变化主要受到流域降水与径流等自然环境条件的影响, 而人类活动改变了湖泊流域的水系结构, 改变了自然的沉积过程, 使得入湖碎屑通量明显减少. 在人类活动改变水系结构前 1940 年代, 在长江中下游湖泊沉积中都出现了 ^{210}Pb 的高值时段, 与流域内这一时期降水偏少有关. 将这一 ^{210}Pb 蓄积的异常作为时标将有助于建立更可靠的近代湖泊沉积物年代序列.

关键词 ^{210}Pb

沉积年代

环境指标

人类活动

龙感湖

湖泊沉积物在湖泊环境变化研究中发挥着越来越重要的作用, 湖泊沉积物相关环境指标研究, 可以清楚地了解湖泊环境变化的过程、污染物累积的通量及其历史、湖泊环境背景及当前所处的相位, 以及湖泊环境变化的驱动力, 尤其是近代高强度的人类活动对湖泊环境所产生的影响. 而通过湖泊沉积物进行上述研究, 必须建立在精确的年代序列的基础上.

在近代湖泊沉积物年代学研究中 ^{210}Pb 和 ^{137}Cs 是被广泛采用的手段之一^[1-5]. ^{210}Pb (半衰期 22.3 年)是一种自然产生的放射性核素. 湖泊沉积物中 ^{210}Pb

比活度($^{210}\text{Pb}_{\text{tot}}$)由两部分组成: 补偿 ^{210}Pb ($^{210}\text{Pb}_{\text{sup}}$)和非补偿 ^{210}Pb ($^{210}\text{Pb}_{\text{exc}}$). 前者源自流域内的天然铀系产物 ^{226}Ra 的衰变子体, 后者来自大气沉降的 ^{222}Rn 衰变子体. ^{137}Cs 是人工核爆的产物. ^{210}Pb , ^{137}Cs 随大气沉降或经地表径流带入水体, 并吸附于细粒碎屑物质、有机质沉降在沉积物中. ^{137}Cs 定年是根据 ^{137}Cs 的时标意义来进行(北半球 1950 年代初初次出现和 1963 年出现峰值), 而 ^{210}Pb 定年是根据 ^{210}Pb 的半衰期采用适当的经验模式获得的沉积物的绝对年龄. 目前采用最多的 ^{210}Pb 年龄模式有 CIC 模式(恒定初始浓度

模式 Constant Initial Concentration)和 CRS 模式(恒定补给速率模式 Constant Rate of Supply). CIC 模式假定初始的 ^{210}Pb 浓度是恒定的, CRS 模式假定 ^{210}Pb 的大气沉降速率是恒定的, 而碎屑物质的沉积通量变化改变了沉积物中 ^{210}Pb 的浓度. ^{137}Cs 和 ^{210}Pb 计年的重要前提是当它们进入沉积物后, 不再受到扰动, ^{137}Cs 和 ^{210}Pb 只发生放射性衰变, 而不发生其他形式的迁移. 事实上表层沉积物的混合作用^[6,7]、生物和风浪等物理扰动作用^[8]、元素的沉积后迁移^[9]、湖泊初始生产力及碎屑物质通量的突变^[10]以及人类活动的干扰^[7]往往导致 $^{210}\text{Pb}_{\text{exc}}$ 垂向分布的异常, 从而影响计年结果.

长江中下游地区湖泊众多, 也是人类活动较集中和强烈的地区. 20 世纪 50 年代以来, 该地区湖泊面临两大问题: 淤塞和消亡的湖泊容量问题和富营养化等环境问题. 了解湖泊淤塞和消亡的过程, 需要了解湖泊的沉积速率, 解决富营养化等环境问题也必须基于对环境演化历史了解, 需要构建沉积年代序列, 以通过湖泊沉积环境指标来了解环境现状的由来, 弥补测资料的不足. 因此, 多年来对于长江中下游湖泊的 ^{137}Cs 和 ^{210}Pb 沉积年代学、沉积速率研究已经广泛开展^[8,11~16], 认识到由于种种原因获得可靠的年代序列非常困难.

在长江中游地区, 20 世纪 50 年代以来最显著的人类活动是湖泊上游修建了大量水库; 湖泊下游修建闸坝, 使湖泊与长江隔绝; 湖滩地修建堤坝, 以围湖造田. 这些人类活动势必在湖泊沉积物中有所反映, 也对湖泊沉积的 ^{137}Cs 和 ^{210}Pb 计年结果产生影响.

本文将通过长江中游龙感湖钻孔沉积物的元素地球化学、粒度指标和 ^{137}Cs 、 ^{210}Pb 分析, 探讨人类活动对沉积速率的影响, 提出建立长江中游湖泊近代沉积年代序列的合理模式.

1 研究区概述

龙感湖(29°52'~30°05'N, 115°55'~116°17'E)位于安徽宿松和湖北黄梅境内, 20 世纪 50 年代初, 湖泊面积 578.95 km², 后由于围垦湖泊面积缩小到 316.2 km². 现湖面高程 12.1 m 时, 平均水深 3.78 m, 该湖为过水性湖泊, 主要靠湖北部的河流补给, 纳二郎河和太白湖来水, 大部湖水经由黄大湖、泊湖注入长江, 另有部分由小池入长江^[13,17,18].

2 采样和分析方法

2007 年 10 月和 2008 年 3 月用重力采样器分别在龙感湖大湖面采沉积物柱状样 39 cm(LS-1)和 38 cm(LGL-1)(图 1), 沉积物均为灰黑色粉砂质泥, 按 1 cm 间隔分样, 进行 ^{210}Pb 以及其他指标分析.

用于 ^{210}Pb 和 ^{226}Ra 测定的样品低温(<40℃)烘干后称重, 采用 EG&G Ortec 公司生产的高纯锗探测器(Ortec HPGe GWL)与 Ortec919 型谱控制器构成的多道γ谱分析系统测定总 ^{210}Pb ($^{210}\text{Pb}_{\text{tot}}$)和 ^{226}Ra 比活度. 用于年代分析的非补偿 ^{210}Pb ($^{210}\text{Pb}_{\text{exc}}$)为 $^{210}\text{Pb}_{\text{tot}}$ 与 ^{226}Ra 比活度的差值.

用于粒度分析的样品, 加 5% 盐酸去除无机碳酸盐, 加 5% NaOH 溶液去除有机质, 洗至中性后加入分散剂, 用超声波振荡离散 15 分钟后, 用 Marlven 激光粒度仪测量粒度组成.

元素分析的样品用硝酸-氢氟酸-高氯酸湿法溶解后, 用美国 LEEMAN LABS ROFILE 电感耦合等离子体原子发射光谱仪(ICP-AES)测定各元素含量, 标准采用美国 SPEXTM 标准溶液, 水系沉积物 GSD-9 和 GSD-11 为参考物质.

3 结果

在 LS-1 和 LGL-1 孔中 ^{226}Ra 比活度基本相同且自下而上变化均不大, 表明两个采样点沉积物的物源相对稳定(图 2). LS-1 的 35.5 cm 和 LGL-1 的 37.5 cm 以下 ^{226}Ra 和 ^{210}Pb 达到平衡. $^{210}\text{Pb}_{\text{tot}}$ 和 $^{210}\text{Pb}_{\text{exc}}$ 在

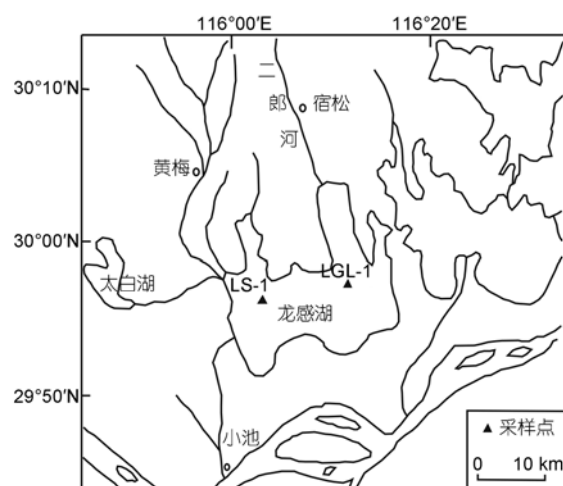


图 1 采样位置

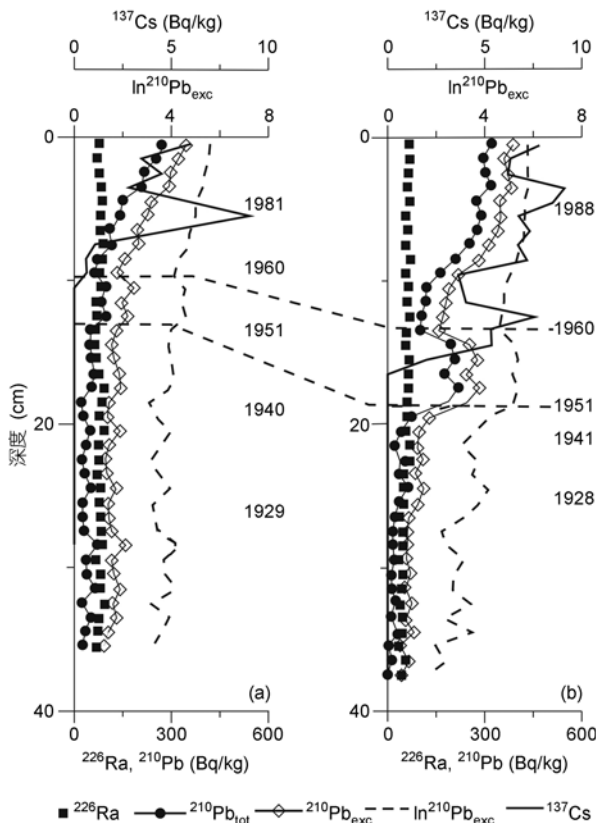


图2 LS-1孔(a)和LGL-1孔(b)放射性核素随深度分布

两个采样点有相似的变化趋势, 即由下而上波动上升, 在LS-1的12.5~9.5 cm段和LGL-1的18.5~13.5 cm出现 $^{210}\text{Pb}_{\text{tot}}$ 和 $^{210}\text{Pb}_{\text{exc}}$ 的高值段, 这一高值段以下 $^{210}\text{Pb}_{\text{tot}}$ 和 $^{210}\text{Pb}_{\text{exc}}$ 自下而上呈缓慢上升趋势, 在这一高值段以上, $^{210}\text{Pb}_{\text{tot}}$ 和 $^{210}\text{Pb}_{\text{exc}}$ 均突然降低, 此后明显上升直至表层达到最高值. 另外一个明显的特点是, 高值段后 $^{210}\text{Pb}_{\text{exc}}$ 的对数值($\ln^{210}\text{Pb}_{\text{exc}}$)在两个孔中近乎呈线性上升形态. 将沉积物采样深度转化为质量深度后, 两个孔 $^{210}\text{Pb}_{\text{tot}}$ 和 $^{210}\text{Pb}_{\text{exc}}$ 变化的相似性更加直观(图3), 且 $^{210}\text{Pb}_{\text{tot}}$ 和 $^{210}\text{Pb}_{\text{exc}}$ 的高值段所出现的质量深度完全一致. 在LS-1孔9.5 cm和LGL-1孔15.5 cm处开始检测到 ^{137}Cs , 但两个孔中 ^{137}Cs 比活度都不高, 且波动明显(图2).

沉积物的粒度组成方面, LGL-1和LS-1孔均以细颗粒物为主, 泥质(<4 μm)和粉砂(4~32 μm)级颗粒占到80%左右(图4). LS-1孔9.5 cm以上泥质颗粒含量减少而砂级(32~64 μm)颗粒有明显增加. LGL-1孔在13.5 cm以上粉砂级颗粒明显增加而砂级颗粒减

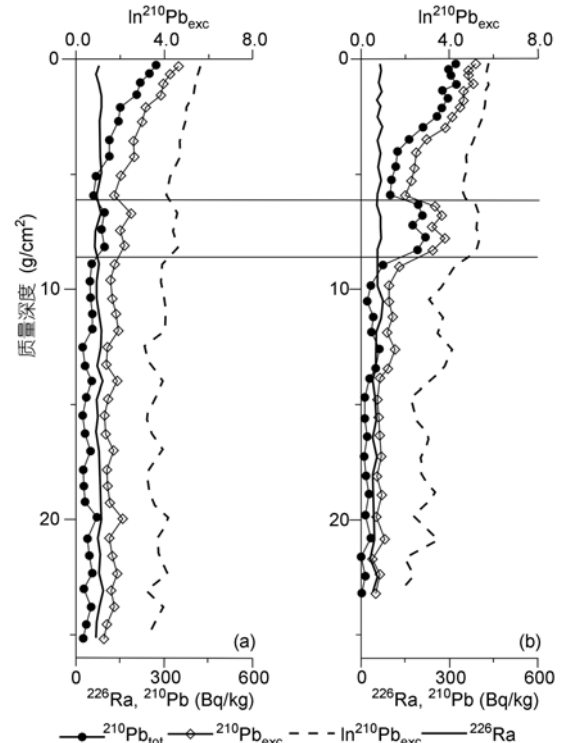


图3 LS-1孔(a)和LGL-1孔(b)放射性核素随质量深度分布

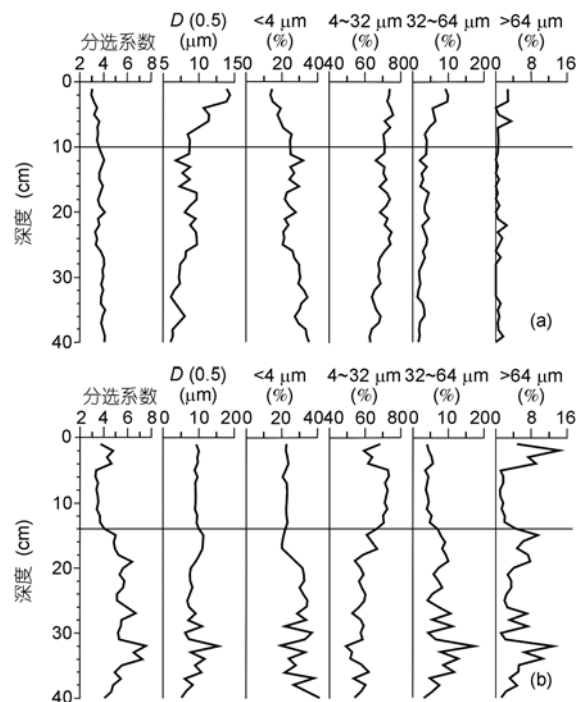


图4 LS-1孔和LGL-1孔粒度指标变化

(a) LS-1孔, (b) LGL-1孔

少, 表层 $>64\ \mu\text{m}$ 的粗颗粒有所增加. LGL-1 孔的中值粒径在 10 左右波动, 自下而上变化不大, 而在 LS-1 孔中 9.5 cm 以上明显呈上升趋势. 两个采样点的分选系数都呈现出自下而上波动下降的趋势, 特别是在 LS-1 孔的 9.5 cm 以上和 LGL-1 孔的 13.5 cm 以上, 分选系数都下降到整个剖面的最低段. LGL-1 孔表层 4 cm 分选系数略有上升.

LS-1 孔自底部向上, Al 和 Pb, Co, Ni, Cu, Zn 等重金属元素浓度呈下降趋势, 直到 9.5 cm 各元素浓度突然上升. LGL-1 孔各元素浓度自下表现为 3 个增长阶段, 分别为 31.5 cm 以下、31.5~13.5 cm 和 13.5 cm 以上, 13.5 cm 处的增长幅度小于 LS-1 孔 9.5 cm 处的增长幅度(图 5).

4 讨论

4.1 人类活动的湖泊沉积记录

如前文所述, 20 世纪 50 年代以来长江中游最显

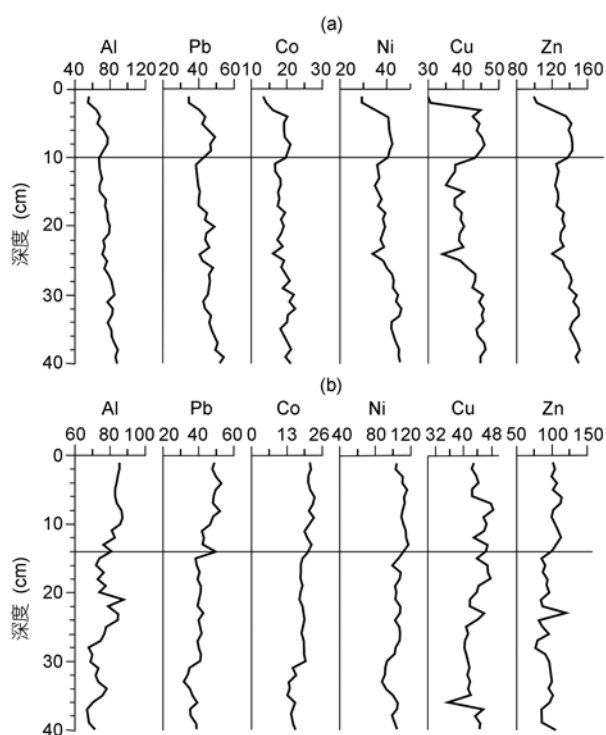


图 5 LS-1 孔和 LGL-1 孔主要元素浓度变化

(a) LS-1 孔, (b) LGL-1 孔. Al 的浓度单位为 mg/g, 其余元素为 mg/kg

著的人类活动是湖泊上游修建了大量水库; 湖泊下游修建闸坝, 使湖泊与长江隔绝; 湖滩地修建堤坝, 以围湖造田. 在龙感湖流域, 二郎河上游于 1955 年建成钓鱼台水库¹⁾; 另一支主要来水太白湖的上游, 1959 年开始修建荆竹水库和永安水库^[15]. 龙感湖的主要流出是东流注入大官湖、黄湖、泊湖, 最后经华阳闸和杨湾闸注入长江, 华阳闸和杨湾闸的建成时间是 1956 年¹⁾. 龙感湖大规模的围湖造田也始于 20 世纪 50 年代初, 分别兴建了华阳农场和龙感湖农场, 并从全国各地迁入人口, 修建湖堤, 开垦荒地^[17,18].

上游修建水库等水利设施, 使入湖流量减少, 水动力条件减弱, 地表径流的输沙量减少, 这一特征在沉积速率上有所反映. 假设 LGL-1 孔 18.5~13.5 cm 和 LS-1 孔 12.5~9.5 cm 的 ^{210}Pb 高值段出现时间相同, 两孔上部沉积速率明显不同, LGL-1 孔在龙湖湾与龙感湖大湖面衔接处, 物源更多来自二郎河流域, LS-1 孔位于龙感湖西部湖区, 更多接收来自太白湖的水沙, 经过太白湖上游水库和太白湖的调蓄, 碎屑量相对较少, 因而沉积速率相对较低. 湖泊下游修建闸坝后, 与长江的联系受到阻隔, 原本是过水性的湖泊变为只在洪水期泄洪的相对静水的湖泊, 水流对碎屑物质的分选作用减弱, 沉积物的分选系数下降, 这一特点在 LGL-1 孔和 LS-1 孔上部均有表现, 尤其是 LGL-1 孔下降更为明显. 流域内的大规模开垦荒地, 使沉积物粒度变粗, LGL-1 孔中粉砂级颗粒明显增加, LS-1 孔中上部砂级颗粒和中值粒径增大.

LGL-1 孔和 LS-1 孔的重金属元素 Pb, Co, Ni, Cu 和 Zn 分布与沉积物的粉砂级颗粒含量成正比, 尤其是在 LGL-1 孔中, Cu 浓度与 4~32 μm 粒级含量相关性较高($R=0.80$, $n=40$). 因此重金属元素 Pb, Co, Ni, Cu 和 Zn 等浓度的变化, 也指示了人类活动的强度, 人类活动造成沉积物中粒度组成变化的同时, 也造成了上部重金属浓度的上升.

4.2 人类活动影响下龙感湖沉积年代确定

在 LS-1 孔 9.5 cm 和 LGL-1 孔 15.5 cm 处开始检测到 ^{137}Cs , 而在此深度以上, 虽然在 LS-1 孔中出现了 ^{137}Cs 的峰值, 但考虑到 ^{137}Cs 总体上比活度较低, 因此 ^{137}Cs 峰值时标在本研究中未被采用. 同时, LGL-1 孔中, 没有出现明确的峰值, 且表层的 ^{137}Cs

1) 安徽宿松县县志编撰委员会. 宿松县志. 整理稿, 未出版

比活度为整个剖面的最高值, 表明了龙感湖风浪、生物等各种扰动因素对 ^{137}Cs 的分布产生了较大的影响. 可以说, 20 世纪 50 年代初期, 北半球湖泊沉积出现 ^{137}Cs 时标是可用的, 而 1963 年等峰值时标不宜应用于龙感湖上部年代学研究.

人类活动在沉积环境指标上的明显反映, 给出了事件性定年的依据. 如果 LS-1 孔 9.5 cm 和 LGL-1 孔 13.5 cm 处粒度和重金属元素浓度的显著变化对应于龙感湖流域水库和闸坝的修建, 时间上应在 20 世纪 50 年代末.

注意到在这一深度以上, LS-1 和 LGL-1 孔

$^{210}\text{Pb}_{\text{exc}}$ 与深度呈指数相关, R 分别达到 0.98($n=10$)和 0.93($n=14$), 利用 ^{210}Pb 计年 CIC 模式, LS-1 孔上部沉积速率为 0.19 cm/a, LGL-1 孔上部沉积速率为 0.26 cm/a, 根据这一沉积速率 LS-1 孔 9.5 cm 和 LGL-1 孔 13.5 cm 分别对应于 1960 AD 和 1957 AD, 与龙感湖流域水库和闸坝的修建时间相近, 事件性定年和 ^{210}Pb 计年结果相互印证.

LS-1 孔 9.5 cm 和 LGL-1 孔 13.5 cm 以下, $^{210}\text{Pb}_{\text{exc}}$ 的分布与深度没有呈现出指数相关特征(图 2, 3), 利用 CRS 模式获得两孔下部沉积年代序列和质量累积速率(表 1).

表 1 1LS-1 和 LGL-1 孔质量累积速率和年代序列

LS-1				LGL-1			
深度(cm)	质量深度(g/cm ²)	质量累积速率(g/(cm ² ·a))	年代(AD)	深度(cm)	质量深度(g/cm ²)	质量累积速率(g/(cm ² ·a))	年代(AD)
0.5	0.27	0.052	2007	0.5	0.19	0.051	2007
1.5	0.64	0.069	2002	1.5	0.49	0.075	2003
2.5	1.05	0.077	1996	2.5	0.78	0.077	1999
3.5	1.54	0.095	1991	3.5	1.07	0.075	1995
4.5	2.10	0.105	1986	4.5	1.38	0.081	1992
5.5	2.72	0.118	1981	5.5	1.74	0.093	1988
6.5	3.51	0.151	1975	6.5	2.09	0.090	1984
7.5	4.24	0.138	1970	7.5	2.50	0.108	1980
8.5	5.06	0.156	1965	8.5	2.95	0.118	1976
9.5	5.94	0.167	1960	9.5	3.48	0.138	1972
10.5	6.68	0.326	1956	10.5	4.06	0.151	1969
11.5	7.43	0.364	1954	11.5	4.72	0.171	1965
12.5	8.16	0.284	1951	12.5	5.26	0.140	1961
13.5	8.89	0.512	1949	13.5	5.91	0.170	1957
14.5	9.63	0.518	1948	14.5	6.34	0.082	1954
15.5	10.39	0.445	1946	15.5	6.80	0.074	1953
16.5	11.07	0.374	1945	16.5	7.25	0.083	1952
17.5	11.82	0.381	1943	17.5	7.78	0.065	1950
18.5	12.53	0.901	1941	18.5	8.29	0.072	1949
19.5	13.31	0.664	1940	19.5	9.00	0.188	1946
20.5	13.99	0.364	1939	20.5	9.85	0.298	1943
21.5	14.75	0.485	1937	21.5	10.51	0.493	1941
22.5	15.48	0.701	1936	22.5	11.21	0.247	1939
23.5	16.27	0.513	1935	23.5	11.88	0.282	1936
24.5	17.01	0.302	1933	24.5	12.58	0.140	1933
25.5	17.80	0.531	1931	25.5	13.45	0.168	1928
26.5	18.54	0.523	1929	26.5	13.91	0.254	1924
27.5	19.24	0.420	1928	27.5	14.73	0.601	1922
28.5	19.99	0.172	1925	28.5	15.62	0.451	1921
29.5	20.80	0.270	1921	29.5	16.42	0.222	1918
30.5	21.55	0.231	1918	30.5	17.25	0.296	1915
31.5	22.36	0.139	1913	31.5	18.08	0.270	1912
32.5	23.08	0.285	1909	32.5	18.92	0.120	1907
33.5	23.78	0.127	1905	33.5	19.84	0.275	1902
34.5	24.53	0.158	1900	34.5	20.85	0.079	1894
35.5	25.16	0.176	1896	35.5	21.64	0.224	1885
				36.5	22.44	0.125	1880
				37.5	23.19	0.209	1875

年代序列显示 LGL-1 孔 18.5~13.5 cm 和 LS-1 孔 12.5~9.5 cm 的 ^{210}Pb 的高值段出现的时间基本一致, 对应于 20 世纪 40 年代末到 50 年代初, 这一时期在两个孔中都检测到 ^{137}Cs (图 2), 表明所获年代序列基本可信. 在龙感湖西北部湖湾大源湖在同一时期也出现了 ^{210}Pb 的高值^[13,18], 在长江中下游其他湖泊如巢湖^[16]、固城湖^[19]、太白湖^[15]、洞庭湖^[8,14]、鄱阳湖^[8]等都出现了这一时期的 ^{210}Pb 高值, 这一普遍的现象没有引起前人的关注, 如果得到其他地区更多数据验证可推广为一个有效的时标. 万国江等^[10]将沉积剖面中 $^{210}\text{Pb}_{\text{exc}}$ 沉积通量的突发增大归结为湖泊生产力的变化. 长江中下游地区这一时期的 ^{210}Pb 高值是什么原因引起的? 众多研究表明, 在 20 世纪 40、50 年代, 长江中下游湖泊生产力并不高^[20], 质量累积速率的变化或许能解释 ^{210}Pb 增高的原因.

两孔质量累积速率变化基本同步(图 6), 较高的质量累积速率出现在 1940 年代前后, 对照长江中下游地区夏季降水变率^[15,21], 这一时期是夏季降水相对较多的时期, 表明自然状态下, 降水的增加带来了更多的入湖碎屑物质. 20 世纪 50 年代初开始, 流域上游修建水库, 更多的碎屑物质在水库中沉积下来, 水库沉积速率非常高^[22], 而入湖碎屑物质减少; 另一方面, 1950 年前后流域降水偏少, 因而碎屑物质输入减少, 造成单位质量沉积物 ^{210}Pb 浓度上升, 这是导致这一时期出现 ^{210}Pb 高值的原因. 20 世纪 50 年代后期以来, 随

着上游水库的建成, LS-1 和 LGL-1 孔维持了较低的沉积速率, 但变化并不同步, LGL-1 孔质量累积速率的下降始于 20 世纪 50 年代初, 而 LS-1 孔质量累积速率的下降始于 20 世纪 50 年代中后期, 这可能与钓鱼台水库、荆竹水库等水库的修建时间差别有关. LS-1 孔更多受来自太白湖流域物源影响, LGL-1 孔更多受来自二郎河物源影响, 因而前者沉积速率的减小晚于后者. 20 世纪 50 年代后期以来质量累积速率减小的趋势与太白湖^[15]的结果相一致, 但与大源湖的结果^[13,18]并不吻合, 这是由于大源湖为相对封闭的湖湾, 所接受的入湖物质来自周围较小的入湖河流, 并未经水库的调蓄, 其小流域内开垦种植等人类活动的增强, 导致了沉积速率的增加.

5 结论

(1) 湖泊上游修建水库使得入湖碎屑物质减少, 湖泊沉积速率降低; 湖泊下游修建闸坝使得湖泊与长江的联系割断, 原为过水性的湖泊变为相对静水的环境, 造成沉积物颗粒物分选性变差, 分选系数下降. 这些变化导致了用于计年的 ^{210}Pb 在沉积剖面上的分布状况改变, 影响到沉积年代的确定, 用传统 ^{210}Pb 计年方法可能带来较大误差. 另一方面, 人类活动在沉积指标上有明显反映, 具有时标意义, 可以用于近代沉积物年代学研究, 以提高计年的准

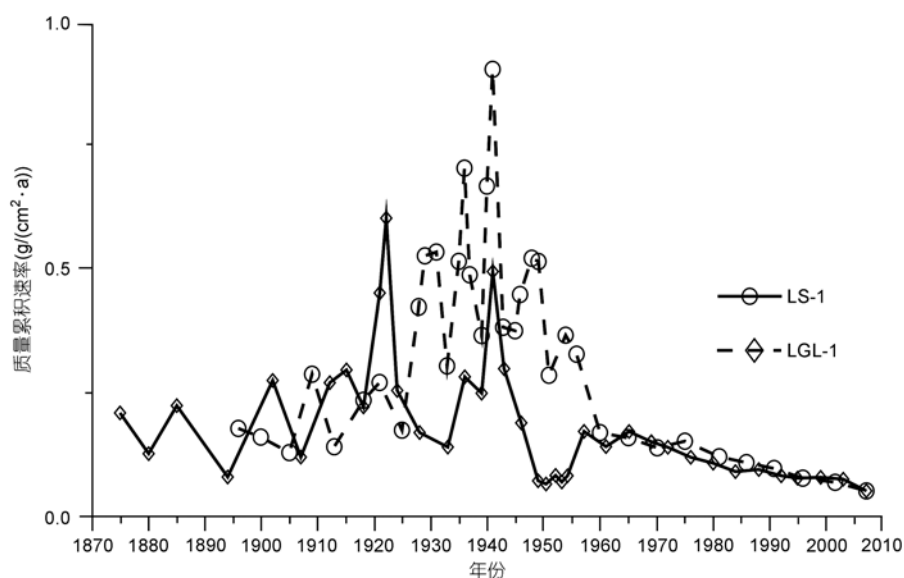


图 6 LS-1 孔和 LGL-1 孔质量累积速率变化

确性.

(2) LS-1 孔和 LGL-1 孔上部 $^{210}\text{Pb}_{\text{exc}}$ 呈指数分布, 利用 ^{210}Pb 的 CIC 模式获得两孔上部平均沉积速率分别为 0.19 和 0.23 cm/a. 据此沉积速率推算, 沉积物粒度等指标反映的人类活动时间与实际发生时间相吻合, 与 ^{137}Cs 时标亦相吻合. 整个孔的沉积物质量累积速率进一步表明: 在修建水库、闸坝等水利设施前龙感湖沉积通量的变化主要受到流域降水与径流等

自然环境条件的影响, 而人类活动改变了湖泊流域的水系结构, 改变了自然的沉积过程, 使得入湖通量明显减少.

(3) 在人类活动改变水系结构前的 20 世纪 40 年代末到 50 年代初, 在长江中下游湖泊沉积中都出现了 ^{210}Pb 的高值时段, 与流域内这一时期降水偏少有关. 将这一 ^{210}Pb 蓄积的异常作为时标将有助于建立更可靠的近代湖泊沉积物年代序列.

致谢 感谢审稿人提出的修改意见.

参考文献

- 1 Wan G J, Santschi P H, Sturm M, et al. Natural (^{210}Pb , ^7Be) and fallout (^{137}Cs , $^{239,240}\text{Pu}$, ^{90}Sr) radionuclides as geochemical tracers of sedimentation in Greifensee, Switzerland. *Geochem Geol*, 1987, 63: 181—196
- 2 万国江. ^{137}Cs 及 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 方法湖泊沉积计年研究新进展. *地球科学进展*, 1995, 10: 188—192
- 3 万国江. 现代沉积的 ^{210}Pb 记年. *第四纪研究*, 1997, 3: 230—239
- 4 Appleby P G, Oldfield F. The calculation of lead-210 dates assuming a constant rate of supply of unsupported ^{210}Pb to the sediment. *Catena*, 1978, 5: 1—8
- 5 Krishnaswamy S, Lal D, Martin J M, et al. Geochronology of lake sediments. *Earth Planet Sci Lett*, 1971, 11: 407—414
- 6 Dominik J, Mangini A, Muller G. Determination of recent deposition rates in Lake Constance with radioscopic methods. *Sedimentology*, 1981, 28: 653—677
- 7 Miguel M, Bolivar J P, Carcia-Tenorio R. Mixing, sediment accumulation and focusing using ^{210}Pb and ^{137}Cs . *J Paleolimnol*, 2003, 29: 1—11
- 8 Xiang L, Lu X X, Higgitt D L, et al. Recent lake sedimentation in the middle and lower Yangtze basin inferred from ^{137}Cs and ^{210}Pb measurements. *J Asian Earth Sci*, 2002, 21: 77—86
- 9 Benoit G, Rozan T F. ^{210}Pb and ^{137}Cs dating methods in lakes: A retrospective study. *J Paleolimnol*, 2001, 25: 455—465
- 10 万国江, 陈敬安, 胥思勤, 等. $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 沉积通量突发增大对湖泊生产力的指示——以程海为例. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2004, 34: 154—162
- 11 Rose N L, Boyle J F, Du Y, et al. Sedimentary evidence for changes in the pollution status of Taihu in the Jiangsu region of eastern China. *J Paleolimnol*, 2004, 32: 41—51
- 12 Yi C, Appleby P G, Boyle J F, et al. The sedimentary record of a significant flooding event in Lake Taihu on the Yangtze delta China. *J Coastal Res*, 2004, 43: 89—100
- 13 吴艳宏, 王苏民, 夏威夷, 等. 近代湖泊沉积物球状碳颗粒(SCP)定年. *科学通报*, 2005, 50: 703—707
- 14 Du Y, Cai S, Zhang X, et al. Interpretation of the environmental change of Dongting Lake, middle reach of Yangtze River, China, by ^{210}Pb measurement and satellite image analysis. *Geomorphology*, 2001, 41: 171—181
- 15 刘恩峰, 羊向东, 沈吉, 等. 近百年来湖北太白湖沉积通量变化与流域降水量和人类活动的关系. *湖泊科学*, 2007, 19: 407—412
- 16 姚书春, 薛滨, 李世杰, 等. 长江中下游湖泊沉积速率的测定及其环境意义——以洪湖、巢湖、太湖为例. *长江流域资源与环境*, 2006, 15: 569—573
- 17 羊向东, 王苏民, 沈吉, 等. 近 0.3 ka 来龙感湖流域人类活动的湖泊环境响应. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2001, 31: 1031—1038
- 18 Wu Y, Luecke A, Wang S. Assessment of nutrient sources and paleoproductivity during the past century in Longgan Lake, middle reaches of the Yangtze River, China. *J Paleolimnol*, 2008, 39: 451—462
- 19 姚书春, 薛滨, 朱育新, 等. 长江中下游湖泊沉积物铅污染记录——以洪湖、固城湖和太湖为例. *第四纪研究*, 2008, 28: 659—666
- 20 羊向东, 沈吉, 董旭辉, 等. 长江中下游浅水湖泊历史时期营养态演化及湖泊生态响应. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2005, 35(增刊 II): 45—54
- 21 Gong D Y, Zhu J H, Wang S W. Flooding 1990s along the Yangtze River, has it concern of global warming? *J Geogr Sci*, 2001, 11: 43—44
- 22 Dai X, Dearing J A, Yu L, et al. The recent history of hydro-geomorphological processes in the upper Hangbu river system, Anhui Province, China. *Geomorphology*, 2009, doi: 10.1016/j.geomorph.2008.11.016