

湖光岩玛珉湖人类世沉积物统一年代标尺的建立

王甜莉^{1,2}, 贺茂勇¹, 雷德文^{1,2}, 张路远¹, 陈旻³, 胡婧¹, 赵雪⁴, 徐海⁵, 谭亮成^{1,6*}

1. 中国科学院地球环境研究所 黄土科学全国重点实验室, 西安 710061
2. 中国科学院大学, 北京 100049
3. 南京大学 地球科学与工程学院 表生地球化学教育部重点实验室, 南京 210023
4. 西安地球环境创新研究院, 西安 710061
5. 天津大学 表层地球系统科学研究院, 天津 300072
6. 西安交通大学 全球环境变化研究院, 西安 710049

摘要: 建立人类世关键标志物和指标体系, 需要在全球不同地质生物载体中开展多指标综合研究。为满足多种指标测试, 往往需要采集多根平行岩芯。因此, 如何经济有效地统一不同岩芯的年代标尺成为一个重要问题。文章以我国人类世研究的重要地点之一广东湖光岩玛珉湖获取的6根平行岩芯为例, 对其中1根标准岩芯开展²¹⁰Pb-¹³⁷Cs年代学测试, 基于质量深度插值得到岩芯上部0—52 cm的非线性年代模型(沉积于1870—2020年), 同时对所获得的6根岩芯进行经济、快捷且无损的磁化率指标测试, 以磁化率曲线中的共性变化特征点为年代控制点, 结合质量深度插值或者以文章提出的更为简便的定点缩放法, 统一了其余岩芯过去约150年的年代框架。定点缩放法可理解为, 纵向拉伸或压缩标准岩芯, 使其年代控制点与目标岩芯的年代控制点重合, 无需质量深度数据即可使目标岩芯继承标准岩芯的非线性年代模式。该方法充分考虑了人类世沉积薄、年代精度要求高的特点, 比传统几何深度线性插值的方式更适用于人类世沉积物的年代学研究。

关键词: 玛珉湖; 人类世; 年代标尺; 多指标研究; 磁化率

Establishment of unified chronological framework for the Anthropocene sediments in Huguangyan Maar Lake

WANG Tianli^{1,2}, HE Maoyong¹, LEI Dewen^{1,2}, ZHANG Luyuan¹, CHEN Yang³, HU Jing¹, ZHAO Xue⁴, XU Hai⁵, TAN Liangcheng^{1,6*}

1. State Key Laboratory of Loess Science, Institute of Earth Environment, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710061, China
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China
3. Key Laboratory of Surficial Geochemistry, Ministry of Education, School of Earth Sciences and Engineering, Nanjing University, Nanjing 210023, China
4. Xi'an Institute for Innovative Earth Environment Research, Xi'an 710061, China
5. Institute of Surface-Earth System Science, School of Earth Science, Tianjin University, Tianjin 300072, China
6. Institute of Global Environment Change, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China

收稿日期: 2023-09-04; 录用日期: 2023-10-19; 网络出版: 2026-01-08

基金项目: 国家自然科学基金重大项目(41991252)

第一作者简介: 王甜莉, 28岁, 博士研究生, 环境科学专业, E-mail: 15620726045@163.com

通信作者: 谭亮成, E-mail: tanlch@ieecas.cn

引用格式: 王甜莉, 贺茂勇, 雷德文, 等. 2026. 湖光岩玛珉湖人类世沉积物统一年代标尺的建立 [J]. 地球环境学报, 17(1): 34-47. <https://cstr.cn/32259.14.JEE2023185>.

Citation: Wang T L, He M Y, Lei D W, et al. 2026. Establishment of unified chronological framework for the Anthropocene sediments in Huguangyan Maar Lake [J]. Journal of Earth Environment, 17(1): 34-47. <https://cstr.cn/32259.14.JEE2023185>.

Abstract: Background, aim, and scope At present, the primary marker and tracing proxy system of the Anthropocene epoch are under hot debate. Comprehensive multi-proxy research in diverse geological and biological archives is therefore urgently needed. Because the Anthropocene sediments are typically thin, single-core surface sediments rarely yield enough material for all analyses. Multiple cores are usually collected so that different proxies can be measured on separate cores or on homogenised slices of equivalent age. However, unifying the chronologies of multiple cores in an economical and efficient manner remains challenging. In this study, taking Huguangyan Maar Lake (one of the key study sites for the Anthropocene) as an example, we present a protocol that uses ^{210}Pb - ^{137}Cs dating supplemented by cross-comparisons of magnetic susceptibility to solve this problem. **Materials and methods** We collected six sediment cores from Huguangyan Maar Lake. One core (HGY20-1-3) was selected as the reference and dated by ^{210}Pb - ^{137}Cs . The high-resolution magnetic-susceptibility was measured non-destructively on all cores, and these continuous records were compared to identify readily identifiable, isochronous tie-points that lock the chronologies of the remaining cores to the reference record. **Results** The ^{137}Cs peak at 29.4 cm depth in HGY20-1-3 is assigned to AD 1964. Based on mass depth interpolation, the resulting nonlinear age-depth model indicates deposition from AD 1870 to 2020 for the upper 52 cm, with a mean geometric deposition rate of 0.27 cm/a before AD 1964, consistent with previous studies. The magnetic susceptibility sequences in all six cores vary in parallel within a range from $300 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$ to $1200 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$ and show a sharp excursion around the depth of 30 cm. **Discussion** We choose the depth of 30.4 cm (deposited in AD 1960.4) in HGY20-1-3 as an isochronous tie-point, correlated to the depth of 31.3 cm, 25.3 cm, 34.4 cm, 29.2 cm, and 29.9 cm in HGY20-1-7, HGY20-1-9, HGY20-1-18, HGY20-1-28 and HGY20-1-33. Previous studies often build linear age models directly from geometric depth and several tie-points, but for the thin Anthropocene sediments, which may have very limited identifiable isochronous tie-points, such models would diverge markedly from true ages. We therefore recommend building age models on mass depth; where mass depth is unavailable, we apply a “fixed-point scaling” method, i.e., stretching/compressing the target core until its dated tie-points coincide with those of the reference core (here HGY20-1-3), yielding an adjusted depth scale for final interpolation. The target core can then inherit the non-linear age model of the reference core. Based on the fixed-point scaling method, we unified the age models of all the Huguangyan sediment cores in this study. The results show that the age model of HGY20-1-7 agrees closely with that established by mass depth, thus validating the fixed-point scaling method. Because the ^{137}Cs chronology constrains the upper 52 cm of standard core with high confidence over the past 150 years, the resulting age models for the remaining cores are likewise considered reliable for this interval. The age-magnetic susceptibility sequences of the Huguangyan show that there was a sharp decrease around the 1960s and afterwards the magnetic susceptibility kept stable. We found this variation appears to have been largely caused by human activities. On one hand, the vegetation restoration activities during the period reduced soil erosion and therefore less magnetic susceptibility came into the lake. On the other hand, agriculture and industry activities increased organic matter supply in the lake, which may dilute the magnetic mineral concentration and result in the decrease of the magnetic susceptibility. **Conclusions** Collecting multiple cores and harmonizing their chronologies before composite sampling remains a bottleneck in high-resolution Anthropocene work. Traditional correlation of distinct proxy inflections followed by linear geometric-depth interpolation suffices when multiple tie-points exist, but collapses for thin Anthropocene sequences where very limited tie-points can be recognized. We therefore advocate building mass-depth age models, or where mass depth is unavailable, employing a newly proposed “fixed-point scaling” method that stretches the target core vertically until its dated inflection snaps to that of the reference core. Applied to Huguangyan Maar Lake, one standard core anchored to the AD 1964 ^{137}Cs peak and the basin-wide post-AD 1960 magnetic-susceptibility drop synchronized six parallel records, yielding a common 150-yr age model. Moreover, the basin-wide magnetic-susceptibility plunge of the 1960s mirrors reduced erosion and rising nutrients, encoding regional human impacts

and furnishing available geological evidence for Anthropocene research. *Recommendations and perspectives* This study provides an important chronological framework for the subsequent multi-proxy analysis in Huguangyan Maar Lake. As magnetic susceptibility testing is economical, fast, and non-destructive, we propose that age dating supplemented by cross-comparisons of magnetic susceptibility is a good way to unify chronological frameworks of different sediment cores, which could be widely applied in multi-proxy research in the Anthropocene.

Key words: Maar Lake; Anthropocene; chronological framework; multi-proxy research; magnetic susceptibility

人类活动作为一种活跃的地质营力深刻改变了地球系统 (Zalasiewicz 等, 2008; Waters 等, 2016; 孙红月等, 2020; Syvitski 等, 2022; 张瑞华等, 2023), 引发了一系列全球性环境问题和生存危机 (Barnosky 等, 2011; Johnson 等, 2017; Steffen 等, 2018)。早在 17 世纪, 便有学者认识到人类存在的特殊性 (Thomas 等, 2020); 而后 19 世纪, 地学家们试图用一些新的名词突出人类活动对地球环境的干扰作用, 如 1854 年和 1873 年分别提出的“人类时代” (the Human Epoch) (Thomas 等, 2020) 和“人类代” (Anthropozoic Era) (Zalasiewicz 等, 2011); 1992 年, 科学记者 Andrew Revkin 甚至在地质年代学层次上意识到了人类活动对地球的影响, 提出人类正处于自己创造的地质时代 (a geological age of our own making) ——这个时代将来可能被地质学家们命名为“人类世” (Anthrocene) (Thomas 等, 2020), 如他所料, 21 世纪初与 Anthrocene 仅有两个字母之差的人类世 (Anthropocene) 一词应运而生。2000 年, 诺贝尔奖得主 Paul J. Crutzen 在墨西哥的国际地圈 - 生物圈计划 (International Geosphere Biosphere Programme) 会议上即兴提出“人类世” (Anthropocene) 一词, 并撰写文章列举了过去 3 个世纪以来地球环境因人类活动发生的变化, 提出全新世已于 18 世纪后半叶结束, 目前地球处于一个新的地质时期——人类世 (Crutzen 和 Stoermer, 2000; Crutzen, 2002)。该词提出后, 引起了包括地质学、地理学、环境科学、考古学、人类学, 甚至还有医学、法学等诸多行业的广泛关注 (Zalasiewicz 等, 2021)。早在 2004 年, 我国环境地质学家刘东生 (2004) 便呼吁《开展“人类世”环境研究, 做新时代地学的开拓者》, 而后, 国内一大批科研学者加入到我国乃至全球的人类世研究中 (Wang 等, 2019; Dong 等, 2021; Han 等, 2022, 2023; Jiang 等,

2022)。2009 年, 国际地层委员会 (International Commission on Stratigraphy) 专门设立了人类世工作组 (Anthropocene Working Group) 以研究人类世的界定问题; 2012 年以来, 以“人类世”为主题的国际性学术期刊相继诞生, 包括 2012 年 BioOne 推出的《Elementa: Science of the Anthropocene》, 2013 年 4 月 Elsevier 出版的《The Anthropocene》, 2014 年世界第五大学术商 SAGE 出版的《The Anthropocene Review》, 以及 2022 年 Spring 出版社推出的《Anthropocene Science》等, 关于人类世的文章也因此层出不穷 (Yin 和刘晓东, 2023)。

人类世备受关注的原因在于它不仅将人与自然紧密连接, 在地质历史上审视其作为新的地层单元的必要性, 也在人类历史上审视人类活动对地球的改造过程、影响及未来发展趋势。前者是从地层学角度出发, 试图划定一个全球通用的、以人类营力为主角的时代标尺, 关乎人类世的起始时间、标志物和“金钉子”的选定问题; 而后者则是从人文角度出发, 探究人与地球的可持续发展, 关乎人类社会的存亡问题 (Steffen 等, 2018; Thomas 等, 2020)。因此, 人类世的建立有着不同于其他地质时代的重要意义。另外, 人类世的出现衍生了一些新型交叉学科, 人类世作为一个非正式术语在地学领域之外的广泛应用也衍生了不同学科对人类世的不同定义 (Zalasiewicz 等, 2021), 模糊了人类世的时间属性。从这一角度考虑, 同样催促着地学界结合多方证据, 早日推动人类世的正式建立。过去 20 多年来, 以国际人类世工作组为代表的科学家们基于大量人文、经济和地层证据普遍认为全新世已经结束, 地球于 20 世纪中叶进入了以人类营力为主导的人类世 (Zalasiewicz 等, 2017; Waters 等, 2018), 并于 2019 年向第四纪地层委员会 (Subcommission on Quaternary Stratigraphy) 提交了正式建立人类世为

新的地质时代的提议, 于近期投票通过了将加拿大Crawford湖岩芯作为“金钉子”的决定。但是, 人类世的建立仍将是一个漫长且艰难的过程。

在建立流程方面, 国际人类世工作组关于界定人类世的研究结果, 需要依次交由第四纪地层委员会、国际地层委员会和国际地质联合会(International Union of Geological Sciences)审核, 每次审核的通过率至少要达到60%(Waters等, 2018)。在科学证据方面, 人类世尚未建立统一的关键标志物及代用指标体系, 限制了人类世研究的进一步发展。传统地层学多以生物物种的灭绝或出现为标志划定地质时代(Waters等, 2018), 新生代以来还考虑了物理化学指标所反映的气候环境突变信号, 如以格陵兰冰芯中的*d*-excess(氘盈余)、 $\delta^{18}\text{O}$ (氧同位素)和粉尘浓度突变信号定义了全新世(Walker等, 2008)。然而, 人类世的界定很难依此惯例。在人类文明发展的不同阶段, 人类向环境中释放了多种持久广泛的活动信号。早在更新世时期, 人类对火的使用留下了黑炭、多环芳烃等记录(Roebroeks和Villa, 2011; Glikson, 2013); 全新世早期, 随着农业和驯养放牧的起源和传播, 人类开启了刀耕火种的农业发展模式(Dong等, 2020); 至全新世中期时, 以亚洲地区为主的森林开垦和农作物种植活动导致大气 CO_2 和 CH_4 浓度显著增加(Ruddiman, 2003, 2013; Lewis和Maslin, 2015), 沉积物中的孢粉种类也发生了变化(Lewis和Maslin, 2015), 同时, 农业的发展促进了定居文化群落的发展, 在我国出现了以石器和陶片等具有时代特征的文化产物(Certini和Scalenghe, 2011); 全新世中晚期时, 冶炼和采矿技术的发明和传播对周边环境产生了显著影响, 在全球不同冶金中心出现了局地或区域尺度的重金属污染(Nriagu, 1979; Marx等, 2016; Wagreich和Draganits, 2018); 而后, 农作物、陶器、金属工艺品等的生产推动了人口迁移、文化交流和贸易往来, 14世纪末期以来的大航海时代进一步促进了跨大陆交流。欧洲殖民扩张期间, 传染病借机肆虐, 导致美洲土著农业人群急剧减少, 农业活动减弱, 大气 CO_2 浓度有所下降(Lewis和Maslin, 2015)。工业革命以来, 人类改造地球环境的过程进一步加剧, 大量化石

燃料的使用向大气中释放了 CO_2 、NO和 SO_2 等气体, 以及飞灰颗粒物(如Spherical Carbonaceous Particles, SCPs), 改变了全球C、N和S循环, 加剧了全球温室效应(Crutzen和Stoemer, 2000; Holtgrieve等, 2011; Lewis和Maslin, 2015; 李新周等, 2023); 二战后, 人口激增、工业化和全球化背景下的人类活动对地球环境产生了更为显著、空前的影响, 不仅体现在全球能源消耗、大气温室气体、有机和无机污染物、土地利用、生态环境等的急剧增加或衰退(Steffen等, 2015; Waters等, 2016), 还体现在一些“新型材料”和核爆污染的出现(Waters等, 2018)。自近年来倾向于将1950年定为人类世的起始时间后, 先后涌现出了将微塑料(Zalasiewicz等, 2016)、SCPs(Rose, 2015; Swindles等, 2015)、黑炭(Han等, 2018)、人工放射性核素(^{239}Pu 、 ^{129}I 或 ^{14}C)(Zalasiewicz等, 2017; Sanchez-Cabeza等, 2021)、重金属元素(Bibi等, 2020)、持久性有机污染物(Persistent Organic Pollutants, POPs)(Galuszka等, 2020; Dong等, 2021; 王棋等, 2021)等作为人类世关键标志物的提议。因此, 当前学术界迫切需要在全球不同环境单元、不同地质生物载体中开展多种指标的综合研究, 建立关键标志物和代用指标体系, 为人类世的最终建立提供基础条件。

湖泊沉积物是开展人类世环境重建的重要载体(程夏丽等, 2025), 在多指标综合研究的科研需求下, 往往需要采集多根岩芯以满足其对测试量的需求。特别是, 人类世存在时间短, 其表层沉积物厚度较薄, 如若以0.5 cm为间隔(半径为3 cm的岩芯管)分样, 顶部的样品量通常不足1 g, 甚至不足0.5 g, 还不足以进行单个指标的测试(如 ^{239}Pu 、 ^{240}Pu 测试量是0.5—3.0 g), 有时需要将多根岩芯混合取样。不管是利用不同岩芯测试独立指标, 还是将样品混合后进行指标测试, 都需要面临一个重要问题: 如何统一不同岩芯的年代标尺? 单独对每个岩芯进行年代学测试, 耗费经济和物力, 并不实际。前人的研究中通常利用常规指标(如磁化率、粒度、元素)的特征拐点交叉比对, 建立不同岩芯的年代(吴旭东等, 2011; Bao等, 2021; Ma等, 2021; Xue等, 2023)。本研究以我国曾被提议作为人类世“金钉子”候选剖面的湖

光岩玛珥湖为例, 同样以此方法在该湖泊选取一根岩芯进行年代学测试, 然后以经济、快捷且无损的磁化率指标为基准, 交叉对比其余岩芯与已知年代岩芯的磁化率序列, 通过特征峰谷值建立其余岩芯的年代标尺。但不同点是, 前人研究中往往借助多个年代控制点, 再根据平均沉积速率和几何深度插值得到年代模式, 每两个年代控制点之间的年代为线性变化。而本研究在所采集的岩芯中仅识别出一个特征值, 提议利用平均沉积速率和深度通过非线性方式得到的年代更为合理。该方法可为今后解决人类世综合研究和其他全球对比研究的年代学问题提供思路。

1 研究区域与样品采集

湖光岩玛珥湖位于广东省湛江市西南部的雷琼新生代火山区, 是一个封闭的淡水湖, 湖水主要依赖雨水和地下水补给。该湖由东边和西边两个湖盆组成, 东边湖盆小, 西边湖盆大 (图 1)。湖面东西向长 1.9 km, 南北向最长达 1.4 km; 湖水面积超 2.3 km², 最大水深 22 m (谢曼曼等, 2015; Zeng 等, 2017); 湖周基岩由玄武质火山碎屑岩和湛江组角砾状岩块组成 (刘嘉麒等, 2000)。该区域地处亚热带地区, 常年湿热, 根据湛江气象站监测数据 (1951—2015 年), 该地年降水量约 1600 mm, 88% 的降雨发生在东亚夏季风季节 (4—10 月); 年均温 23.2 °C, 最低温 15.6 °C (1 月)。

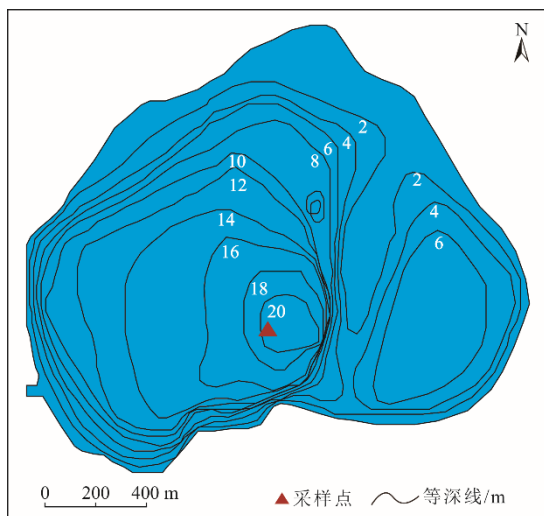


图 1 湖光岩等深线及采样点位置

Fig. 1 Bathymetric map of Huguangyan Maar Lake showing isobaths and sampling site

2020 年 12 月末, 用奥地利 UWITEC 湖泊重力采样器在湖光岩西边湖盆相近位置 (21°09'N, 110°17'E; 水深 19.3 m 处, 图 1) 采集了 6 根平行沉积岩芯。在现场对样品进行编号, 以 0.5 cm 为间隔连续分样后带回实验室 4 °C 恒温保存。本研究的岩芯包括: (1) HGY20-1-3, 岩芯长 78 cm, 距顶部 0—2 cm 疑似棕黄色藻类, 2—25 cm 为黑色沉积物, 25—40 cm 为浅黑色沉积物, 40—78 cm 为青灰色; (2) HGY20-1-7, 岩芯长 85 cm, 距顶部 0—3 cm 疑似棕黄色藻类, 3—29 cm 为黑色沉积物, 29—43 cm 为浅黑色沉积物, 43—85 cm 为青灰色; (3) HGY20-1-9, 岩芯长 73 cm, 距顶部 0—3 cm 疑似棕黄色藻类, 3—28 cm 为黑色沉积物, 28—43 cm 为浅黑色沉积物, 43—73 cm 为青灰色; (4) HGY20-1-18, 岩芯长 120 cm, 距顶部 0—3 cm 疑似棕黄色藻类, 3—39 cm 为黑色沉积物, 39—61 cm 为浅黑色沉积物, 61—120 cm 为青灰色; (5) HGY20-1-28, 岩芯长 104 cm, 距顶部 0—3 cm 疑似棕黄色藻类, 3—32 cm 为黑色沉积物, 32—47 cm 为浅黑色沉积物, 47—104 cm 为青灰色; (6) HGY20-1-33, 岩芯长 104.5 cm, 距顶部 0—3 cm 疑似棕黄色藻类, 3—23 cm 为黑色沉积物, 23—55 cm 为浅黑色沉积物, 55—104.5 cm 为青灰色。

2 实验方法

2.1 年代测试

随机选取 HGY20-1-3 为标准柱进行年代测试。利用冷冻干燥机处理岩芯样品, 称取冷冻干燥后的样品重量, 进而计算得到岩芯的质量深度。将岩芯上部 52 cm, 以 1 cm 为间隔取得样品 50 个, 在中国科学院南京地理与湖泊研究所利用高纯锗伽马能谱仪测试沉积物的 ¹³⁷C 和 ²¹⁰Pb 活度, 测试误差小于 10%。

2.2 指标测试

以 0.5 cm 为间隔, 对上述 6 根岩芯样品进行无损磁化率测试。其中, HGY20-1-33 仅测试了表层 76 cm 的样品, 该时段已满足了本研究需求。除 HGY20-1-9 和 HGY20-1-28 在南京大学表生地球化学实验室测试外, 其余样品在中国科学院地球环境研究所完成, 测试仪器为英制 Bartington MS2 磁化率仪, 单量程精度 0.1%, 每个样品测试低频磁化率 (文中统一为磁化率) 3 次, 取其平均值。

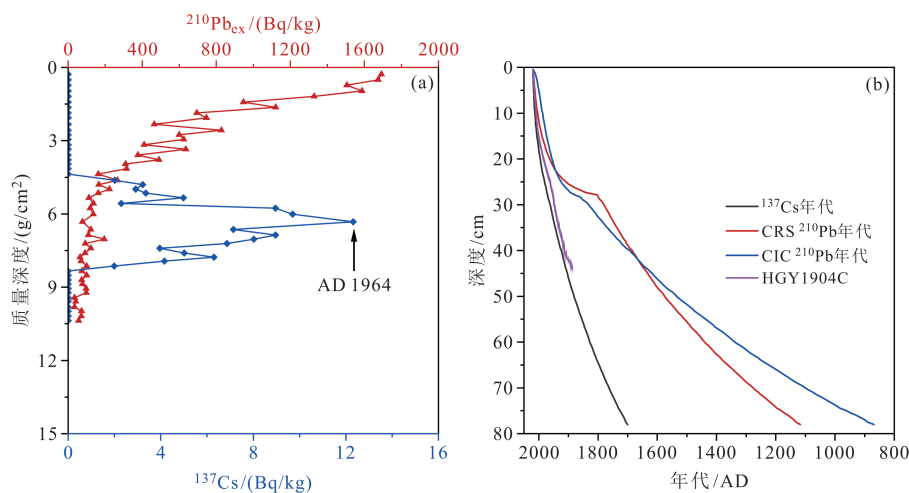
3 结果与讨论

3.1 标准柱的年代标尺

^{210}Pb 与 ^{137}Cs 组合定年是过去百年尺度湖泊沉积计年的重要手段(万国江, 1997), 在我国西北地区的青海湖(Xu等, 2006)、赛里木湖(蓝江湖等, 2019)、喀拉库勒湖(Yan等, 2019), 西南的洱海(Li等, 2017), 以及东部的湖光岩(Han等, 2016, 2022)等均取得了较好的年代结果。本研究中, 标准柱HGY20-1-3的 ^{137}Cs 活度呈现单峰模式(图2a), 与全球大气 ^{137}Cs 沉降模式相似(Xu等, 2009; Lan等, 2020)。自1952年核武器国家在北半球广泛开展大气核试验以来(Hancock等, 2014; Waters等, 2018), 北半球大气中的 ^{137}Cs 浓度迅速上升, 于1963年《Limited Test Ban Treaty》(《部分核禁试条约》)实施前达到峰值(Gabrieli等, 2011)。考虑到大气中的 ^{137}Cs 沉降至湖泊底部需要1年左右的时间, 一般将湖泊沉积物中的 ^{137}Cs 峰值定为1964年(Lan等, 2020)。因此, 本研究将HGY20-1-3几何深度29.4 cm处(质量深度7.37 g/cm²)的 ^{137}Cs 活度峰值(12.3 Bq/kg)定为1964年; 另外, 默认岩芯顶部年龄为采样时间2020年, 根据质量深度内插和外推得到了整根岩芯的 ^{137}Cs 年代模式(图2b)。HGY20-1-3的 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 活度沿质量深度呈指数增长, 利用稳定输入通量模式(Constant Rate

of Supply, CRS)和常量初始浓度模式(Constant Input Concentration, CIC)建立了岩芯的两种 ^{210}Pb 年代模式。但这两种年代模式并不吻合, 而且其与 ^{137}Cs 年代模式也有较大差别(图2b)。经分析后, 最终选用 ^{137}Cs 年龄建立HGY20-1-3的年代模式, 原因有二: (1) ^{137}Cs 定年取决于 ^{137}Cs 活度的峰型和峰值所在的位置, 当峰型与全球大气 ^{137}Cs 沉降模式相似时, 峰值通常可作为一个可靠时标信号(Lan等, 2020); 而 ^{210}Pb 定年不仅依赖于 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 的变化趋势, 同时还取决于 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 的活度值大小, 受控因素更加复杂(万国江等, 2004; Yu等, 2017)。(2) 更重要的是, HGY20-1-3岩芯的 ^{137}Cs 年代模式与Han等(2022)发表的HGY1904C(与HGY20-1-3的采样位置接近)的年代模式有较高的吻合性, 而CRS和CIC ^{210}Pb 年代模式与之相差较大(图2b), 说明 ^{137}Cs 年代结果更具可靠性。

根据 ^{137}Cs 年代模式, HGY20-1-3岩芯底部(距顶部78 cm)年龄为1700年(图2b), 岩芯的质量沉积速率和几何沉积速率分别为0.01—0.08 g/(cm²·a)和0.02—0.60 cm/a, 1964年之前的几何沉积速率均值(0.27 cm/a)与鲁海燕等(2010)曾基于 ^{137}Cs 年代计算的该时段的几何平均沉积速率(0.29 cm/a)近乎一致。需要注意的是, ^{137}Cs 年龄通常用来重建过去100—150年的年代模式, 即HGY20-1-3上半部分(0—52 cm, 沉积于



(a) HGY20-1-3 沉积物中的 ^{137}Cs (蓝色)和 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ (红色)活度, ^{137}Cs 峰值处为1964年; (b) HGY20-1-3的3种年代学模式及其与HGY1904C年代学模式对比(Han等, 2022)。

(a) ^{137}Cs (blue) and $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ (red) activities in HGY20-1-3 with a ^{137}Cs peak in AD 1964; (b) three age models of HGY20-1-3 and their comparisons with that of HGY1904C (Han et al., 2022).

图2 HGY20-1-3岩芯的年代学模式

Fig. 2 The age model of HGY20-1-3

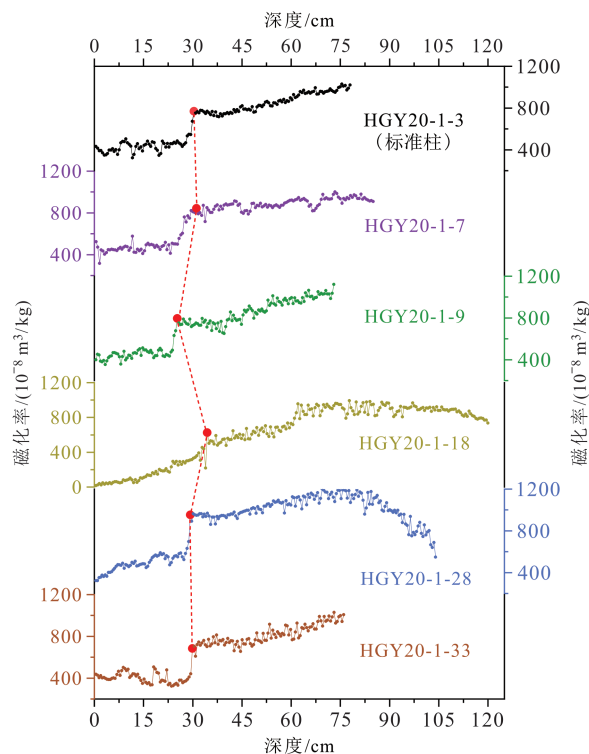
1870—2020年)的年代是可靠的,下半部分(52—78 cm,沉积于1700—1870年)的年代虽有待验证,但并不影响本研究的重点:提供一种统一多根岩芯年代标尺的方法。

3.2 统一其余岩芯的年代标尺

磁化率指示沉积物中磁性矿物的多寡,是黄土(Zhou等,1990;An等,2001;Guo等,2002;朱迎雪等,2025)、湖泊(刘建宝等,2011;郁科科等,2020;程夏丽等,2025)以及海陆交互相地区(江志霖等,2024)等地质载体中重建古环境变化的重要指标之一。湖泊沉积物中的磁化率通常受控于流域内侵蚀强度、径流搬运能力、水化学特征以及人类活动类型和活动强度的变化(刘建宝等,2011;郁科科等,2020;Yang等,2022);但同一湖泊中的磁性矿物物源稳定,其在同一水域的迁移转化和沉积过程近乎相同(Yu等,2017)。因此,平行岩芯柱中的磁化率沉积序列通常呈现相似的变化特征。加之,磁化率的测试方法快捷、经济且无损,是辅助年代比对工作的理想指标(Bao等,2021;Ma等,2021;Xue等,2023)。当获取到多根岩芯的磁化率序列后,可以通过平行比对,将特征变化点(如峰值、谷值、突然升高或降低点)作为年代控制点,统一不同岩芯的年代框架。

湖光岩6根岩芯的磁化率主要在 $(300—1200) \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$ 范围内变化,其平均值因岩芯底部沉积时段不同而稍有差别,分别为 $696 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$ (HGY20-1-3)、 $751 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$ (HGY20-1-7)、 $729 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$ (HGY20-1-9)、 $620 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$ (HGY20-1-18)、 $865 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$ (HGY20-1-28)、 $656 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$ (HGY20-1-33,前76 cm)。不同岩芯的磁化率地层变化趋势和幅度基本一致(图3),说明测试结果是可靠的。所有岩芯磁化率在约30 cm左右均存在一个突变,可以作为一个年代控制点,具体选取在HGY20-1-7的31.1 cm、HGY20-1-9的25.3 cm、HGY20-1-18的34.4 cm、HGY20-1-28的29.2 cm和HGY20-1-33的29.9 cm深处,对应于标准柱HGY20-1-3的30.4 cm深处,沉积年代为1960.4年(图3)。

在以往根据常规指标交叉定年的研究中,通常识别有多个年代控制点,再根据几何深度插值得到相对可靠的年代序列,每两个控制点之间为



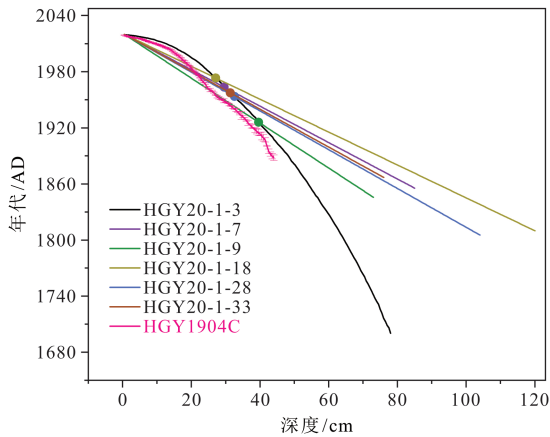
红色虚线连接不同岩芯相对应的特征变化值(红色圆点)。

The red dotted line connects corresponding change points (red dots) in different cores.

图3 湖光岩不同岩芯与标准柱HGY20-1-3的磁化率序列对比

Fig. 3 Magnetic susceptibility comparisons between standard core HGY20-1-3 and other cores

线性年代(Ma等,2021;Xue等,2023)。但本研究认为这种线性年代模式并不适用于所有人类世的沉积物研究,一是因为人类世的沉积序列比较短,可以识别出来的年代控制点可能很有限;二是因为湖泊沉积物存在压实作用,真实的深度-年代序列为非线性变化,根据年代控制点建立的线性年代与实际年代之间的偏差很难满足人类世研究对于年代标尺的高精度要求。如本研究中,根据磁化率交叉比对仅识别出一个年代控制点(1960.4年),另外默认每根岩芯的顶部为一个年代控制点(2020年),根据几何深度插值得到了所有岩芯的年代结果,其均呈现为直线变化,与标准柱HGY20-1-3的年代模式相差较大,并不合理(图4)。相比于几何深度,质量深度考虑了沉积物的压实作用。因此,为了获取更为准确的非线性年代模式,最为简单直接的方法是在线性插值时选用质量深度而非几何深度(Xu等,2006)。但实际中为了省时省



对比岩芯为 HGY1904C, 带误差棒 (Han 等, 2022); 圆点为年代控制点。

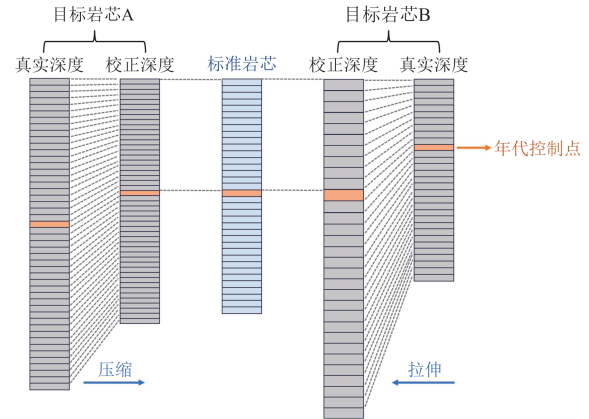
The comparison core is HGY1904C with error bars (Han et al., 2022), and the dots present age control points.

图 4 湖光岩不同岩芯的线性年代模型及其与前人发表的年代模式对比

Fig. 4 Linear age models of different sediment cores and their comparisons with previously published age model

力, 并非所有的岩芯柱都有质量深度数据。针对此情况, 本研究建议可以通过一种定点缩放的方式统一不同岩芯的年代模式, 简称为定点缩放法, 具体步骤是: (1) 以标准柱的年代控制点为目标点, 等比例拉伸或压缩目标岩芯, 使得目标岩芯上的年代控制点达到与目标点相同的深度, 即可得到一个新的深度序列 (图 5), 可称之为校正深度; (2) 将标准柱的年代插值到这一校正深度上, 便可得到目标岩芯的校正深度 - 年代序列, 再换算到真实的几何深度上, 得到最终的年代模型。如此, 标准柱基于质量深度建立的非线性年代模式便可转化到目标岩芯中。也可以认为, 是以目标岩芯上的年代控制点为锚点, 将标准柱的年代模式压缩或拉伸使其相对应的年代控制点通过这一锚点, 便得到目标岩芯的年代序列 (图 6)。例如, 本研究中, HGY20-1-7 和 HGY20-1-18 需要压缩, HGY20-1-9、HGY20-1-28 和 HGY20-1-33 需要拉伸, 使其年代控制点对应深度与标准柱一致。当存在多个年代控制点时, 每两个控制点之间即可通过此方法得到年代模型, 最后一个控制点之后的岩芯可以依照前一段岩芯所用的比例进行拉伸或压缩。

利用定点缩放法建立了湖光岩其余岩芯的年代模式, 均与标准柱 HGY20-1-3 以及 Han 等 (2022) 发表的 HGY1904C 的年代模式相似 (图 7)。其中



拉伸和压缩的对象为目标岩芯, 本研究中的 HGY20-1-7 和 HGY20-1-18 可以看作目标岩芯 A, HGY20-1-9、HGY20-1-28 和 HGY20-1-33 可以看作目标岩芯 B; 图 6 相同但拉伸和压缩的对象为标准岩芯。The object of stretching and compressing is the target core, and HGY20-1-7 and HGY20-1-18 in this study are treated as target core A, while cores HGY20-1-9, HGY20-1-28 and HGY20-1-33 are treated as target core B. Fig. 6 is the same but the object of stretching and compressing is the standard core.

图 5 利用定点缩放法获取目标岩芯校正深度的演示过程
Fig. 5 Demonstration process of obtaining the adjusted depth of target core using fixed-point scaling method

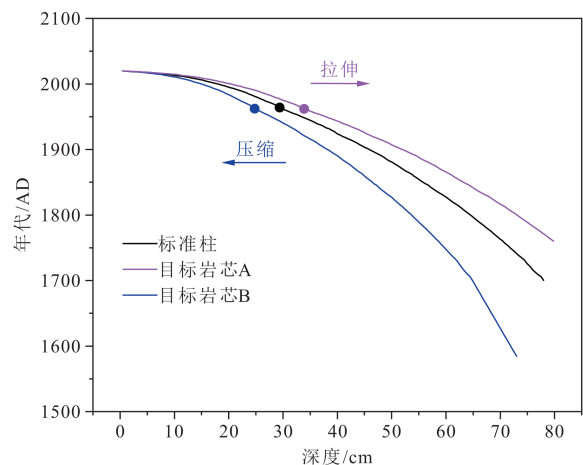
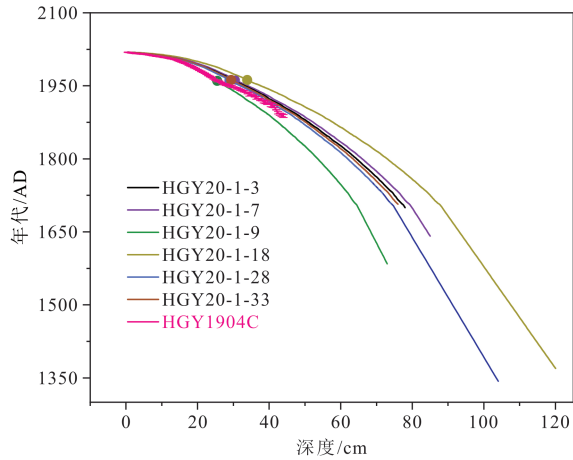


图 6 定点缩放法在年代模式上的体现

Fig. 6 The embodiment of fixed-point scaling in the age model

HGY20-1-7 的年代模式与通过质量深度插值的年代模式相似 (图 8), 而且表层与年代控制点之间的年代序列近乎吻合, 说明利用定点缩放法建立的年代是可靠的。从图 7 可以看出, 部分岩芯 (如 HGY20-1-18 和 HGY20-1-28) 的底部年龄远老于 HGY20-1-3, 鉴于 ^{137}Cs 年代学结果对 HGY20-1-3 上部 0—52 cm (1870—2020 年) 的年代控制更为可信, 本研究仅采纳各岩芯过去约 150 年的年代结



对比岩芯为 HGY1904C, 带误差棒 (Han 等, 2022); 圆点为年代控制点。

The comparison core is HGY1904C with error bars (Han et al., 2022), and dots present age control points.

图 7 湖光岩不同岩芯的非线性年代模型 (本研究采用) 及其与前人发表的年代模式对比

Fig. 7 Non-linear age models of different sediment cores (used in this study) and their comparisons with previously published age model

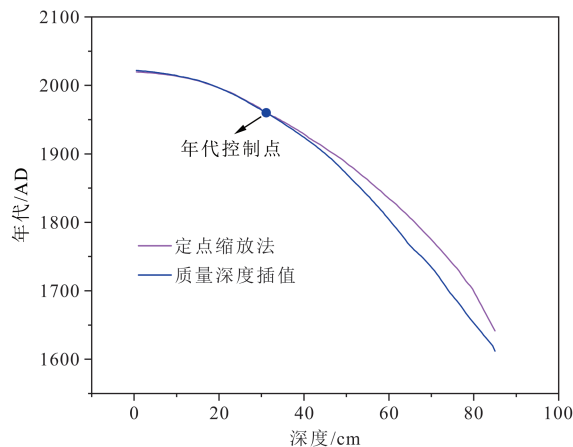


图 8 岩芯 HGY20-1-7 基于定点缩放法建立的年代模式与基于质量深度线性插值的年代模式对比

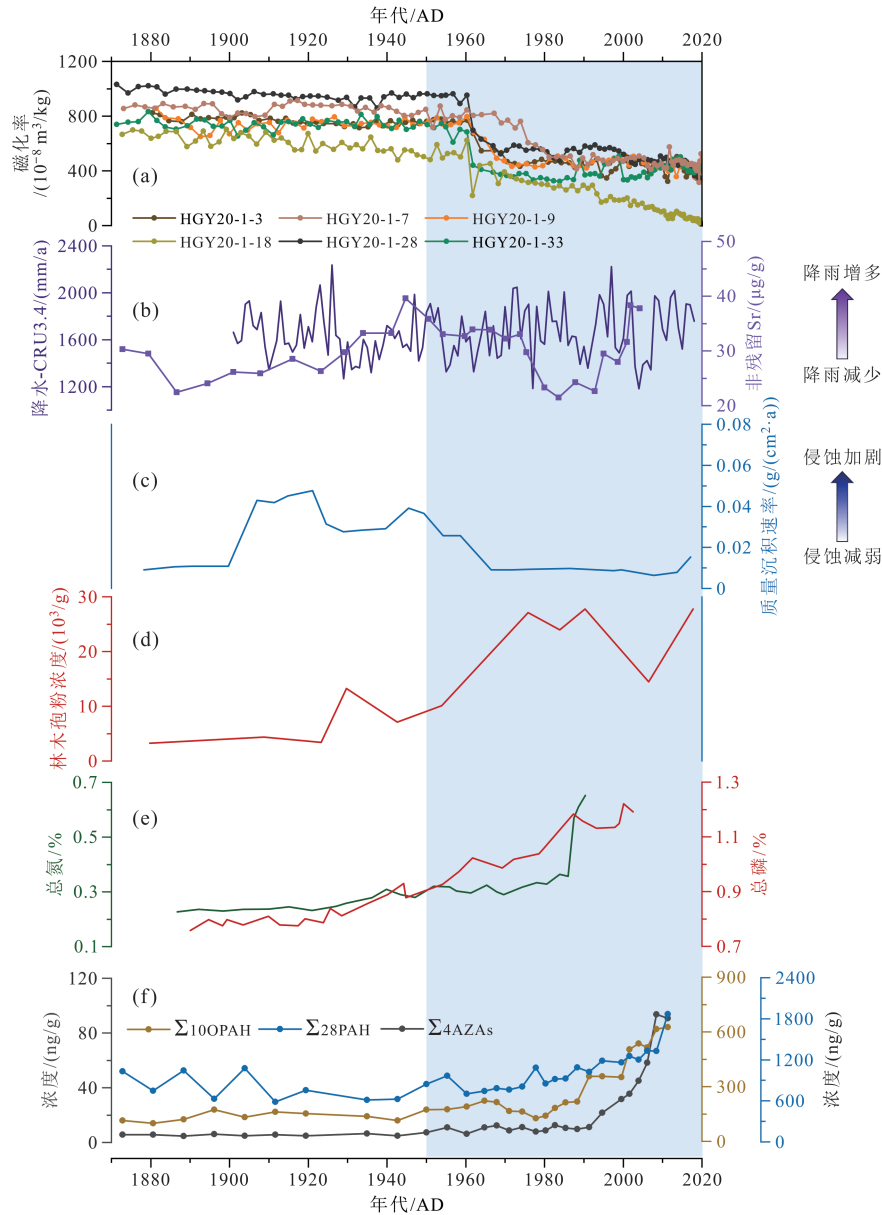
Fig. 8 The comparisons between the age model of HGY20-1-7 established by the fixed-point scaling method and that based on mass depth interpolation

果, 更深时段不予讨论。

3.3 磁化率指示的人类活动

如前所述, 由于 ^{137}Cs 年龄常用于过去百年尺度的沉积物计年, 本研究可关注自 1870 年以来湖光岩沉积物中的磁化率垂向变化 (图 9a), 结果显示其在 1960—1970 年迅速下降, 之后稳定在低值

范围。前人研究表明, 湖光岩沉积物中的磁性矿物主要是磁铁矿, 而且其在沉积物中的次生变化并不明显 (韩玉林等, 2010; 吴旭东等, 2011)。吴旭东等 (2011) 进一步对比湖光岩沉积物中的磁化率、烧失量和粒度变化特征, 发现这些磁铁矿主要是外源性矿物, 并提出全新世以来湖光岩沉积物中的磁化率与有机质含量具有负相关性, 可以通过水动力学响应于当地的气候干湿状况; 但这一关系在本研究时段并未有明显体现, 湖光岩磁化率与基于沉积物中非残留 Sr 所反映的降水变化 (Zeng 等, 2012), 以及研究地区的 CRU3.4 降水变化并不相同 (图 9b)。考虑到流域侵蚀强度是影响我国众多湖泊磁化率变化的一个重要因素 (郁科科等, 2020; Yang 等, 2022), 对比分析了湖光岩磁化率与 Xue 等 (2023) 根据沉积物质量沉积速率建立的流域土壤侵蚀强度 (图 9c), 发现后者同样在 1950—1970 年减弱, 并在之后保持稳定, 可能是导致该湖泊磁化率变化的一个重要原因。而且, Xue 等 (2023) 的研究表明, 湖光岩流域侵蚀强度主要受控于由降水量和人类活动双重驱动的植被覆盖度变化; 19 世纪晚期以来, 得益于适宜的气候环境和湛江市的护林活动, 湖光岩沉积物中的孢粉记录显示该地区的林木密度逐渐增加 (图 9d), 特别是中华人民共和国成立后, 湛江市开展了包括育种、育苗和植树造林在内的植被恢复工程, 使得该地区的林地面貌逐渐恢复 (湛江市麻章区编委, 2013), 土壤侵蚀程度日益减弱, 冲刷进入湖泊中的磁性矿物也随之减少。另一方面, 湖光岩的其他重建记录显示, 中华人民共和国成立以来受农业施肥、工业活动和城市化进程的影响, 湖泊中的总磷和总氮显著增加 (图 9e), 指示湖泊富营养化日益加剧 (Zeng 等, 2012; 马丽, 2022), 而且湖泊中的持久性有机物, 如含氧多环芳烃 (Oxygenated Polycyclic Aromatic Hydrocarbons, OPAH)、多环芳烃 (Polycyclic Aromatic Hydrocarbons, PAH) 和氮杂芳烃 (Azaarenes, AZAs) 也急剧增长 (图 9f) (Han 等, 2016), 这些有机物质可以对磁化率产生稀释效应, 也会导致沉积物中的磁化率减少, 这在云南剑湖已有类似的研究报道 (Yang 等, 2022)。综上, 湖光岩磁化率在 20 世纪中叶以来的急剧下降可能主要与人类活动有关。



(a) 本研究的磁化率沉积序列; (b) 研究地区的 CRU3.4 降水数据与湖光岩沉积物中的非残留-Sr 浓度 (Zeng 等, 2012), 后者指示降水变化; (c) 湖光岩的质量沉积速率 (Xue 等, 2023), 指示流域侵蚀强度; (d) 湖光岩沉积物中的林木孢粉浓度 (Xue 等, 2023); (e) 湖光岩沉积物中的总氮和总磷含量 (Zeng 等, 2012; 马丽, 2022); (f) 湖光岩沉积物中的持久性有机污染物浓度 (Han 等, 2016)。蓝色阴影标注了 1950 年以来的沉积时段。

(a) Magnetic susceptibility sequence in this study; (b) CRU3.4 precipitation data in the study area and non-residual-Sr concentration in Huguangyan sediment (Zeng et al., 2012), with the latter indicating precipitation variations; (c) mass accumulation rate in Huguangyan Maar Lake (Xue et al., 2023), indicating watershed erosion intensity; (d) arboreal pollen concentration in Huguangyan Maar Lake (Xue et al., 2023); (e) total nitrogen and total phosphorus content in Huguangyan Maar Lake (Zeng et al., 2012; Ma L, 2022); (f) the concentrations of persistent organic pollutants in Huguangyan Maar Lake (Han et al., 2016). The blue shading highlights the sediment interval deposited since AD 1950.

图 9 湖光岩沉积物的磁化率序列与区域气候以及其他重建记录对比

Fig. 9 Sedimentary sequence of magnetic susceptibility in Huguangyan Maar Lake compared to regional climate change and other constructions in the lake

4 结论

在全球不同环境单元、不同地质生物载体中开展多种指标的综合研究是当前人类世研究的重要内容之一, 也是建立人类世关键标志物和代用

指标体系的关键数据支撑。但由于人类世沉积厚度薄, 如以 20 世纪中叶为起点, 其存在时间仅 70 余年, 所以对指标序列的年代精度要求较高; 加之较薄的沉积厚度, 导致单根岩芯钻孔往往无法

满足多种指标对测试量的需求。因此,如何统一平行岩芯的年代标尺,合理开展混合取样是首要解决的难题。借助常规指标的特征拐点进行跨岩芯比对并统一年代,先前已在部分黄土和湖泊研究中成功应用(吴旭东等,2011; Bao等,2021; Ma等,2021; Xue等,2023)。本研究沿用并优化这一方法,利用 ^{210}Pb - ^{137}Cs 定年和质量深度插值获得了标准柱(HGY20-1-3)上部0—52 cm较为可靠的非线性年代框架(1870—2020年);同时,对所获取的6根岩芯辅以经济、快捷且无损的磁化率测试,将其在约30 cm深度共同出现的急剧变化点(对应标准柱30.4 cm深处,年代为1960.4年)作为年代控制点,结合质量深度插值或本研究提出的更为简便的定点缩放法(纵向拉伸或压缩标准岩芯,使其年代控制点与目标岩芯的年代控制点重合,无需质量深度数据,即可使目标岩芯继承标准岩芯的非线性年代模式特征),统一了其余岩芯在过去约150年的年代框架。利用定点缩放法获得的HGY20-1-7的年代模式与通过质量深度插值的年代模式相似,而且表层与年代控制点之间的年代序列近乎吻合,验证了该方法的可靠性。相比于先前研究主要基于几何深度进行线性年代插值的方法,定点缩放法对特征拐点数量的要求更低,即使是1个特征拐点,也可以得到更真实合理的统一年代框架。该方法可为今后解决人类世多指标综合研究和其他全球对比研究的年代学问题提供思路。

此外,6根岩芯的年代-磁化率序列显示磁化率在20世纪60年代显著下降,并在此后稳定在低值。这一变化无法用水文气候变解释,反而与流域侵蚀强度、湖泊富营养化和有机污染物变化相似,指示20世纪中叶以来人类活动对湖光岩流域环境的破坏作用。农业活动导致土壤侵蚀加剧,更少的磁性矿物进入湖泊;而且农业施肥、工业活动和城市化过程中的有机污染物输入,对磁化率产生稀释效应,也导致沉积物中的磁化率减少。这可为我国人类世研究提供地质证据,而且本研究建立的年代标尺可为后续利用湖光岩岩芯开展微塑料、放射性核素、重金属、同位素等综合对比研究提供年代学基础。

致谢:湖光岩管理局以及中国科学院广州地

球化学研究所胡建芳老师在湖泊沉积物采样中给予了极大帮助,中国科学院地球环境研究所韩永明、程鹏、田绒,以及西安地球环境创新研究院张通等参与了采样工作,宝鸡文理学院郁科科教授在论文撰写中提供了帮助,在此一并表示感谢。

参考文献

- 程夏丽,安福元,李善禄,等. 2025. 察尔汗盐湖沉积中磁化率、Rb/Sr值的异常相关性及其环境意义[J]. 地球环境学报, 16(2): 166-177, 205. [Cheng X L, An F Y, Li S L, et al. 2025. The abnormal correlation of magnetic susceptibility and Rb/Sr ratio in Qarhan Salt Lake and its environmental significance [J]. Journal of Earth Environment, 16(2): 166-177, 205.]
- 韩玉林,谈晓冬,陈忠,等. 2010. 湖光岩玛珥湖表层沉积物磁性粒度特征及其来源[J]. 科学通报, 55(3): 261-267. [Han Y L, Tan X D, Chen Z, et al. 2010. Magnetic granulometry of recent sediments from the Huguang Maar and its implication for provenience [J]. Chinese Science Bulletin, 55(3): 261-267.]
- 江志霖,毛龙江,王婷,等. 2024. 杭嘉湖平原ZK3钻孔沉积物粒度端元分析及其气候-海平面响应[J]. 地球环境学报, 15(2): 306-316, 341. [Jiang Z L, Mao L J, Wang T, et al. 2024. Grain size end-member analysis in sediments from ZK3 borehole and its responses to climate-sea level in Hangjiahu Plain, China [J]. Journal of Earth Environment, 15(2): 306-316, 341.]
- 蓝江湖,徐海,郁科科,等. 2019. 中亚东部晚全新世水文气候变化及可能成因[J]. 中国科学:地球科学, 49(8): 1278-1292. [Lan J H, Xu H, Yu K K, et al. 2019. Late Holocene hydroclimatic variations and possible forcing mechanisms over the eastern Central Asia [J]. Science China Earth Sciences, 62(8): 1288-1301.]
- 李新周,刘晓东,马红艳. 2023. 人类活动对轨道尺度全球季风区降水影响的模拟研究[J]. 地球环境学报, 14(5): 557-572. [Li X Z, Liu X D, Ma H Y. 2023. Regulation of human activities on orbital-scale precipitation in global monsoon regions [J]. Journal of Earth Environment, 14(5): 557-572.]
- 刘东生. 2004. 开展“人类世”环境研究,做新时代地学的开拓者:纪念黄汲清先生的地学创新精神[J]. 第四纪研究, 24(4): 369-378. [Liu T S. 2004. Demand of Anthropocene study in the new stage of geoscience: in honor of late geologist Huang Jiqing for his innovative spirit [J]. Quaternary Sciences, 24(4): 369-378.]
- 刘嘉麒, Negendank J F W, 王文远, 等. 2000. 中国玛珥湖的时空分布与地质特征[J]. 第四纪研究, 20(1): 78-86. [Liu J Q, Negendank J F W, Wang W Y, et al. 2000. The

- distribution and geological characteristics of Maar lakes in China [J]. *Quaternary Sciences*, 20(1): 78–86.]
- 刘建宝, 陈发虎, 陈建徽, 等. 2011. 山西宁武公海湖泊岩芯的环境磁学特征及中世纪暖期湿润气候探讨 [J]. *科学通报*, 56(31): 2580–2590. [Liu J B, Chen F H, Chen J H, et al. 2011. Humid Medieval Warm Period recorded by magnetic characteristics of sediments from Gonghai Lake, Shanxi, North China [J]. *Chinese Science Bulletin*, 56(31): 2580–2590.]
- 鲁海燕, 曹军骥, 韩永明, 等. 2010. 湖光岩玛珉湖沉积记录的近250年重金属元素污染历史 [J]. *海洋地质与第四纪地质*, 30(1): 47–53. [Lu H Y, Cao J J, Han Y M, et al. 2010. History of heavy elements in the last 250 years recorded by sediments in Huguangyan Maar Lake (Huguangyan) [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 30(1): 47–53.]
- 马丽. 2022. 湖光岩玛珉湖沉积物记录的450年以来的人类活动历史 [D]. 合肥: 中国科学技术大学. [Ma L. 2022. The history of human activities recorded in the sediments from Huguangyan Maar Lake during the past 450 years [D]. Hefei: University of Science and Technology of China.]
- 孙红月, 贾飞飞, 李鑫, 等. 2020. 大靖河径流变化特征及其对气候变化和人类活动的响应 [J]. *地球环境学报*, 11(4): 364–375. [Sun H Y, Jia F F, Li X, et al. 2020. The variation characteristics of runoff in Dajing River and its response to climate change and human activities [J]. *Journal of Earth Environment*, 11(4): 364–375.]
- 万国江, 陈敬安, 胥思勤, 等. 2004. $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 沉积通量突发增大对湖泊生产力的指示: 以程海为例 [J]. *中国科学 (D辑: 地球科学)*, 34(2): 154–162. [Wan G J, Chen J A, Xu S Q, et al. 2004. The significance of abrupt increase of $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ sedimentary flux on lake productivity: take Chenghai as an example [J]. *Science in China (Series D: Earth Sciences)*, 34(2): 154–162.]
- 万国江. 1997. 现代沉积的 ^{210}Pb 计年 [J]. *第四纪研究*, 17(3): 230–239. [Wan G J. 1997. ^{210}Pb dating for recent sedimentation [J]. *Quaternary Sciences*, 17(3): 230–239.]
- 王棋, 李俊, 袁国礼. 2021. 人类世的地球化学标志: 沉积物中的持久性有机污染物 [J]. *第四纪研究*, 41(6): 1697–1713. [Wang Q, Li J, Yuan G L. 2021. The geochemical marker of Anthropocene: sedimentary persistent organic pollutants [J]. *Quaternary Sciences*, 41(6): 1697–1713.]
- 吴旭东, 沈吉, 汪勇. 2011. 广东湛江湖光岩玛珉湖全新世磁化率变化特征及其环境意义 [J]. *热带地理*, 31(4): 346–352. [Wu X D, Shen J, Wang Y. 2011. Magnetic susceptibility of Huguangyan Maar Lake since the Holocene and its environmental significance [J]. *Tropical Geography*, 31(4): 346–352.]
- 谢曼曼, 孙青, 王宁, 等. 2015. 1200年来湖光岩玛珉湖高分辨率元素地球化学记录 [J]. *第四纪研究*, 35(1): 152–159. [Xie M M, Sun Q, Wang N, et al. 2015. High resolution elements geochemical record during the past 1200 years in Huguangyan Maar Lake [J]. *Quaternary Sciences*, 35(1): 152–159.]
- 郁科科, 王乐, 盛恩国, 等. 2020. 六盘山朝那湫湖泊沉积物磁化率的环境指示意义 [J]. *生态学杂志*, 39(8): 2501–2508. [Yu K K, Wang L, Sheng E G, et al. 2020. Environmental implication of magnetic susceptibility of lacustrine sediments in Lake Chaonaqiu, Liupan Mountain [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 39(8): 2501–2508.]
- Yin Z Y, 刘晓东. 2023. “人类世”的提出与争议 [J]. *第四纪研究*, 43(4): 1146–1156. [Yin Z Y, Liu X D. 2023. “The Anthropocene”: its proposition and controversies [J]. *Quaternary Sciences*, 43(4): 1146–1156.]
- 湛江市麻章区地方志编纂委员会. 2013. 湛江市麻章区志 [M]. 广州: 广东人民出版社. [Local Chronicles Compilation Committee of Mazhang District, Zhanjiang City. 2013. Records of Mazhang District, Zhanjiang City [M]. Guangzhou: Guangdong People's Publishing House.]
- 张瑞华, 金钊, 杨思齐, 等. 2023. 1985—2015年洛川塬土地利用/覆被变化及人类活动影响: 以陕西省洛川县为例 [J]. *地球环境学报*, 14(1): 74–85. [Zhang R H, Jin Z, Yang S Q, et al. 2023. Land use/land cover change and impacts of human activities in Luochuan tableland in 1985—2015: a case study of the Luochuan County of Shaanxi Province, China [J]. *Journal of Earth Environment*, 14(1): 74–85.]
- 朱迎雪, 刘植, 郭雪莲, 等. 2025. 中欧黄土中古土壤 S_5 的磁性特征对比 [J]. *地球环境学报*, 16(4): 473–483. [Zhu Y X, Liu Z, Guo X L, et al. 2025. Comparison of the magnetic properties of paleosol S_5 between Chinese and Serbian loess [J]. *Journal of Earth Environment*, 16(4): 473–483.]
- An Z S, Kutzbach J E, Prell W L, et al. 2001. Evolution of Asian monsoons and phased uplift of the Himalaya-Tibetan Plateau since Late Miocene times [J]. *Nature*, 411(6833): 62–66.
- Bao K S, Zhang Y F, Zaccone C, et al. 2021. Human impact on C/N/P accumulation in lake sediments from northeast China during the last 150 years [J]. *Environmental Pollution*, 271: 116345. DOI: 10.1016/j.envpol.2020.116345.
- Barnosky A D, Matzke N, Tomiya S, et al. 2011. Has the Earth's sixth mass extinction already arrived? [J]. *Nature*, 471(7336): 51–57.
- Bibi M, Wagneich M, Iqbal S. 2020. Trace metals as markers for historical anthropogenic contamination: evidence from the Peshawar Basin, Pakistan [J]. *Science of the Total Environment*, 703: 134926. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.134926.

- Certini G, Scalenghe R. 2011. Anthropogenic soils are the golden spikes for the Anthropocene [J]. *The Holocene*, 21(8): 1269–1274.
- Crutzen P J. 2002. Geology of mankind [J]. *Nature*, 415(6867): 23. DOI: 10.1038/415023a.
- Crutzen P J, Stoermer E F. 2000. The “Anthropocene” [J]. *IGBP Global Change Newsletter*, 41: 17–18.
- Dong M T, Chen W, Chen X, et al. 2021. Geochemical markers of the Anthropocene: perspectives from temporal trends in pollutants [J]. *Science of the Total Environment*, 763: 142987. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.142987.
- Dong Y J, Wu N Q, Li F J, et al. 2020. Anthropogenic modification of soil communities in northern China for at least two millennia: evidence from a quantitative mollusk approach [J]. *Quaternary Science Reviews*, 248: 106579. DOI: 10.1016/j.quascirev.2020.106579.
- Gabrieli J, Cozzi G, Vallelonga P, et al. 2011. Contamination of Alpine snow and ice at Colle Gnifetti, Swiss/Italian Alps, from nuclear weapons tests [J]. *Atmospheric Environment*, 45(3): 587–593.
- Gałuszka A, Migaszewski Z M, Rose N L. 2020. A consideration of polychlorinated biphenyls as a chemostratigraphic marker of the Anthropocene [J]. *The Anthropocene Review*, 7(2): 138–158.
- Glikson A. 2013. Fire and human evolution: the deep-time blueprints of the Anthropocene [J]. *Anthropocene*, 3: 89–92.
- Guo Z T, Ruddiman W F, Hao Q Z, et al. 2002. Onset of Asian desertification by 22 Myr ago inferred from loess deposits in China [J]. *Nature*, 416(6877): 159–163.
- Han Y M, An Z S, Arimoto R, et al. 2022. Sediment soot radiocarbon indicates that recent pollution controls slowed fossil fuel emissions in southeastern China [J]. *Environmental Science & Technology*, 56(3): 1534–1543.
- Han Y M, An Z S, Cao J J. 2018. The Anthropocene: a potential stratigraphic definition based on black carbon, char, and soot records [J]. *Encyclopedia of the Anthropocene*, 1: 171–178.
- Han Y M, An Z S, Lei D W, et al. 2023. The Sihailongwan Maar Lake, northeastern China as a candidate global boundary stratotype section and point for the Anthropocene series [J]. *The Anthropocene Review*, 10(1): 177–200.
- Han Y M, Wei C, Huang R J, et al. 2016. Reconstruction of atmospheric soot history in inland regions from lake sediments over the past 150 years [J]. *Scientific Reports*, 6: 19151. DOI: 10.1038/srep19151.
- Hancock G J, Tims S G, Fifield L K, et al. 2014. The release and persistence of radioactive anthropogenic nuclides [J]. *Geological Society, London, Special Publications*, 395(1): 265–281.
- Holtgrieve G W, Schindler D E, Hobbs W O, et al. 2011. A coherent signature of anthropogenic nitrogen deposition to remote watersheds of the Northern Hemisphere [J]. *Science*, 334(6062): 1545–1548.
- Jiang H, Han Y M, Guo M L, et al. 2022. Sedimentary records of human activities in China over the past two millennia and implications for the Anthropocene: a review [J]. *Science of the Total Environment*, 851: 158149. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.158149.
- Johnson C N, Balmford A, Brook B W, et al. 2017. Biodiversity losses and conservation responses in the Anthropocene [J]. *Science*, 356(6335): 270–275.
- Lan J H, Wang T L, Chawchai S, et al. 2020. Time marker of ¹³⁷Cs fallout maximum in lake sediments of Northwest China [J]. *Quaternary Science Reviews*, 241: 106413. DOI: 10.1016/j.quascirev.2020.106413.
- Lewis S L, Maslin M A. 2015. Defining the anthropocene [J]. *Nature*, 519(7542): 171–180.
- Li K, Liu E F, Zhang E L, et al. 2017. Historical variations of atmospheric trace metal pollution in Southwest China: reconstruction from a 150-year lacustrine sediment record in the Erhai Lake [J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 172: 62–70.
- Ma H, Wang Y L, Jin C S, et al. 2021. Relative paleointensity correction of radiocarbon reservoir effect for lacustrine sediments on the northeast Tibetan Plateau [J]. *Quaternary Geochronology*, 65: 101193. DOI: 10.1016/j.quageo.2021.101193.
- Marx S K, Rashid S, Stromsoe N. 2016. Global-scale patterns in anthropogenic Pb contamination reconstructed from natural archives [J]. *Environmental Pollution*, 213: 283–298.
- Nriagu J O. 1979. Global inventory of natural and anthropogenic emissions of trace metals to the atmosphere [J]. *Nature*, 279(5712): 409–411.
- Roebroeks W, Villa P. 2011. On the earliest evidence for habitual use of fire in Europe [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 108(13): 5209–5214.
- Rose N L. 2015. Spheroidal carbonaceous fly ash particles provide a globally synchronous stratigraphic marker for the Anthropocene [J]. *Environmental Science & Technology*, 49(7): 4155–4162.
- Ruddiman W F. 2003. The Anthropogenic greenhouse era began thousands of years ago [J]. *Climatic Change*, 61(3): 261–293.
- Ruddiman W F. 2013. The Anthropocene [J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 41(1): 45–68.
- Sanchez-Cabeza J A, Rico-Esenaro S D, Corcho-Alvarado J A,

- et al. 2021. Plutonium in coral archives: a good primary marker for an Anthropocene type section [J]. *Science of the Total Environment*, 771(13): 145077. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.145077.
- Steffen W, Broadgate W, Deutsch L, et al. 2015. The trajectory of the Anthropocene: the Great Acceleration [J]. *The Anthropocene Review*, 2(1): 81–98.
- Steffen W, Rockström J, Richardson K, et al. 2018. Trajectories of the Earth System in the Anthropocene [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 115(33): 8252–8259.
- Swindles G T, Watson E, Turner T E, et al. 2015. Spheroidal carbonaceous particles are a defining stratigraphic marker for the Anthropocene [J]. *Scientific Reports*, 5: 10264. DOI: 10.1038/srep10264.
- Syvitski J, Ángel J R, Saito Y, et al. 2022. Earth's sediment cycle during the Anthropocene [J]. *Nature Reviews Earth & Environment*, 3(3): 179–196.
- Thomas J A, Williams M, Zalasiewicz J. 2020. *The Anthropocene: a multidisciplinary approach* [M]. Cambridge: Polity Press: 1–40.
- Wagreich M, Draganits E. 2018. Early mining and smelting lead anomalies in geological archives as potential stratigraphic markers for the base of an early Anthropocene [J]. *The Anthropocene Review*, 5(2): 177–201.
- Walker M, Johnsen S, Rasmussen S O, et al. 2008. The Global Stratotype Section and Point (GSSP) for the base of the Holocene Series/Epoch (Quaternary System/Period) in the NGRIP ice core [J]. *Episodes*, 31(2): 264–267.
- Wang T L, Tan L C, Xu H, et al. 2019. The selection of a primary marker for the Anthropocene [J]. *Science Bulletin*, 64(22): 1643–1645.
- Waters C N, Zalasiewicz J, Summerhayes C, et al. 2016. The Anthropocene is functionally and stratigraphically distinct from the Holocene [J]. *Science*, 351(6269): aad2622. DOI: 10.1126/science.aad2622.
- Waters C N, Zalasiewicz J, Summerhayes C, et al. 2018. Global Boundary Stratotype Section and Point (GSSP) for the Anthropocene series: where and how to look for potential candidates [J]. *Earth-Science Reviews*, 178(3): 379–429.
- Xu H, Ai L, Tan L C, et al. 2006. Geochronology of a surface core in the northern basin of Lake Qinghai: evidence from ^{210}Pb and ^{137}Cs radionuclides [J]. *Chinese Journal of Geochemistry*, 25(4): 301–306.
- Xu H, Liu X Y, An Z S, et al. 2009. Spatial pattern of modern sedimentation rate of Qinghai Lake and a preliminary estimate of the sediment flux [J]. *Chinese Science Bulletin*, 55(7): 621–627.
- Xue H P, Zhou X, Tu L Y, et al. 2023. Climate-vegetation-erosion interactions revealed by the sediments of Huguangyan Maar Lake, southern China [J]. *Catena*, 231: 107276. DOI: 10.1016/j.catena.2023.107276.
- Yan D N, Xu H, Lan J H, et al. 2019. Solar activity and the westerlies dominate decadal hydroclimatic changes over arid Central Asia [J]. *Global and Planetary Change*, 173: 53–60.
- Yang R, Wu D, Li Z H, et al. 2022. Holocene-Anthropocene transition in northwestern Yunnan revealed by records of soil erosion and trace metal pollution from the sediments of Lake Jian, southwestern China [J]. *Journal of Paleolimnology*, 68(1): 91–102.
- Yu K K, Xu H, Lan J H, et al. 2017. Climate change and soil erosion in a small alpine lake basin on the Loess Plateau, China [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 42(8): 1238–1247.
- Zalasiewicz J, Waters C N, Ellis E C, et al. 2021. The Anthropocene: comparing its meaning in geology (chronostratigraphy) with conceptual approaches arising in other disciplines [J]. *Earth's Future*, 9(3): e2020EF001896. DOI: 10.1029/2020EF001896.
- Zalasiewicz J, Waters C N, Ivar do Sul J A, et al. 2016. The geological cycle of plastics and their use as a stratigraphic indicator of the Anthropocene [J]. *Anthropocene*, 13: 4–17.
- Zalasiewicz J, Waters C N, Summerhayes C P, et al. 2017. The working group on the Anthropocene: summary of evidence and interim recommendations [J]. *Anthropocene*, 19: 55–60.
- Zalasiewicz J, Williams M, Haywood A, et al. 2011. The Anthropocene: a new epoch of geological time? [J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 369(1938): 835–841.
- Zalasiewicz J, Williams M, Smith A, et al. 2008. Are we now living in the Anthropocene? [J]. *GSA Today*, 18(2): 4–8.
- Zeng Y, Chen J A, Yang Y Q, et al. 2017. Huguangyan Maar Lake (SE China): a solid record of atmospheric mercury pollution history in a non-remote region [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 147: 1–8.
- Zeng Y, Chen J A, Zhu Z J, et al. 2012. The wet Little Ice Age recorded by sediments in Huguangyan Lake, tropical South China [J]. *Quaternary International*, 263: 55–62.
- Zhou L P, Oldfield F, Wintle A G, et al. 1990. Partly pedogenic origin of magnetic variations in Chinese loess [J]. *Nature*, 346(6286): 737–739.