

文章编号: 1671-1505(2025)01-0184-11 DOI:10.7605/gdxb.2024.06.091

太湖梅堰孔沉积记录揭示的全新世以来环境演变*

罗文菁¹ 吴立¹ 马春梅² 朱诚² 路曙光¹

1 安徽师范大学地理与旅游学院, 安徽芜湖 241002

2 南京大学地理与海洋科学学院, 江苏南京 210023

摘要 以太湖东南岸梅堰孔湖相沉积岩心为研究对象, 在 AMS ¹⁴C 测年数据建立可靠年代序列的基础上, 利用元素地球化学指标重建太湖地区全新世以来气候变化, 并进行盐度与有孔虫分析以探究太湖东南岸是否受到海侵影响。结果表明: 11—9.1 cal. ka BP 太湖地区气候由湿润逐渐转向干旱; 9.1—6.1 cal. ka BP 气候整体湿润, 其中 8.8—7.1 cal. ka BP 阶段是最湿润时期; 6.1—2.0 cal. ka BP 降水最少, 气候偏干; 2.0—0 cal. ka BP 降水逐渐增多, 气候湿润。整个全新世阶段太湖东南岸受海侵影响的可能性较低。区域对比结果表明, 中晚全新世太湖流域沉积记录与邻近地区其他研究结果具有较高的相似性, 具体表现为中全新世气候趋于干旱, 2.0 cal. ka BP 以来气候湿润。进一步将太湖流域环境代用指标与太阳辐射和厄尔尼诺频次记录综合分析, 发现研究区气候受控于太阳辐射和厄尔尼诺频次变化, 且二者存在不同的主导和耦合阶段。太阳辐射通过直接和间接作用影响着太湖地区早中全新世气候, 2.0 cal. ka BP 以来气候呈现厄尔尼诺态, 厄尔尼诺频次增强平衡了太阳辐射减弱对季风区降水的影响, 成为太湖地区气候的主控因子。

关键词 太湖 全新世 Rb/Sr 气候变化 太阳辐射 厄尔尼诺

第一作者简介 罗文菁, 女, 2000 年生, 硕士研究生, 主要研究方向为湖泊沉积与第四纪环境演变。
E-mail: luobox111@163.com。

通讯作者简介 吴立, 男, 1985 年生, 教授、博士生导师, 主要研究方向为自然地理与第四纪环境演变。
E-mail: jedi-wuli@163.com。

中图分类号: P534.63⁺2 文献标志码: A

Environment evolution since the Holocene revealed by lacustrine sediments of Meiyuan borehole in Taihu Lake, eastern China

LUO Wenjing¹ WU Li¹ MA Chunmei² ZHU Cheng² LU Shuguang¹

1 School of Geography and Tourism, Anhui Normal University, Anhui Wuhu 241002, China

2 School of Geography and Ocean Science, Nanjing University, Nanjing 210023, China

Abstract In this study, we investigate the Meiyuan borehole located on the southeastern shore of Taihu Lake. Based on a reliable chronological sequence established by AMS¹⁴C dating, we use elemental geochemistry, including Rb and Sr concentrations and the Rb/Sr ratio, to reconstruct Holocene climate changes. Additionally, foraminifera analysis is employed to explore whether the Taihu Lake region was af-

* 国家自然科学基金项目 (编号: 42271173, 41771221) 和安徽省“十四五”规划重点项目 (编号: 2022BFAFZ01365) 联合资助。
[Co-funded by the National Natural Science Foundation of China (Nos. 42271173, 41771221) and the Key Project of the 14th Five-Year Plan of Anhui Province (No. 2022BFAFZ01365)]

收稿日期: 2024-02-20 改回日期: 2024-04-20

ected by transgressions. The results show that from 11.0–9.1 cal. ka BP, the climate of Taihu Lake Basin gradually changed from humid to dry; from 9.1–6.1 cal. ka BP, the general climate was generally humid, with the wettest period occurring during 8.8–7.1 cal. ka BP; from 6.1–2.0 cal. ka BP, the climate was generally dry with the lowest precipitation; from 2.0–0 cal. ka BP, the precipitation gradually increased and the climate was humid. During the whole Holocene period, the eastern area of Taihu Lake was unlikely to have been influenced by transgressions. Regional comparisons show that the Rb/Sr record in Taihu Lake are consistent with environmental proxies record in neighboring regions during the middle and late Holocene, which is characterized by gradually drying climate in the Middle Holocene and wet climate since 2.0 cal. ka BP. To further explore the climate dynamics, we compared the environmental proxy index with the 30° solar radiation in the northern hemisphere, ENSO frequency records and Holocene mean sea level records. We found that the climate of Taihu Lake Basin was controlled by the solar radiation and ENSO changes, with distinct phases of dominance and coupling between the two factors. Solar radiation affected the early and middle Holocene climate of Taihu Lake Basin through direct and indirect effects. Since 2.0 cal. ka BP, the climate has exhibited an El Niño-like state, with an intensified ENSO frequency balancing the effects of weakened solar radiation on precipitation in the monsoon region. As a result, ENSO frequency became the main controlling factor of the climate in the Taihu Lake Basin. The results will provide a reliable basis for understanding the relationship between monsoon and climate change in the lower reaches of the Yangtze River since the Holocene.

Key words Taihu Lake, Holocene, Rb/Sr indexes, climate change, solar radiation, El Niño

About the first author LUO Wenjing, born in 2000, a master degree candidate, majors in lake sediments and Quaternary environmental evolution. E-mail: luobox111@163.com.

About the corresponding author WU Li, born in 1985, professor, doctoral supervisor, is engaged in research on physical geography and Quaternary environmental evolution. E-mail: jedi-wuli@163.com.

1 概述

《政府间气候变化专门委员会第六次评估报告》指出，全球 CO₂ 浓度不断升高，已达到过去 2 Ma 以来最高峰，近 10 年来地球表面平均温度对比于 1850—1900 年已升高 1.1 °C，全球变暖现象毋庸置疑。由全球变暖引起的高温、强降水等极端天气对社会经济造成巨大损失（IPCC, 2023），人们迫切希望利用科学方法来解决现代气候问题、预测未来气候变化。要深入了解现代和未来全球气候变化，就必须加强对过去长时间尺度的气候变化及其驱动机制的理解（胡洁等，2022）。然而，历史资料记录的气候信息存在时间上的局限性，为了获取更长尺度、更精确的古气候变化信息，学者们重点关注石笋（Cheng *et al.*, 2019）、孢粉（Liu *et al.*, 2023; Zhang *et al.*, 2023）、冰心（姚檀栋和 Thompson, 1992）和湖泊沉积物（Lin *et al.*, 2022）等的研究，并取得了丰硕的成果。

湖泊沉积对气候变化极其敏感，且具有沉积连

续和分辨率高的优点，能够较好地储存环境变迁信息，是重建古气候的重要载体（王苏民和李建仁，1991；沈吉，2009）。太湖流域属于长江下游地区，气候受东亚季风影响显著，前人研究表明（Wang and Liu, 2000；赵宝成等，2007；Chen *et al.*, 2018），该地区拥有相对完整的地层沉积序列，其湖泊沉积对东亚季风变化敏感，记录了流域大范围的气候变迁信息，因此太湖流域是重建过去长时间尺度气候变化较为理想的研究区。近年来，学者对太湖地区开展了广泛深入的古气候环境演变研究，主要集中在新石器文化分布及其对全新世海平面波动的响应、古气候重建工作等（景存义，1989；Stanley and Chen, 1996；Innes *et al.*, 2014；袁悦等，2019；Qiu *et al.*, 2022）。其中，古气候重建工作大多围绕孢粉环境代用指标的研究展开（Innes *et al.*, 2014；陆福志等，2015；Yao *et al.*, 2017；李冰等，2018；Lu *et al.*, 2019），且获得了较为详细的全新世以来植被与气候变化信息。而通

过Rb/Sr指标重建太湖地区古气候变化的研究较少(吴永红等, 2015)。与此同时, 太湖地区古气候演变研究仍存在争议, 即便来自同一区域的古气候重建, 不同指标的结果也存在较大差异甚至相反的趋势, 例如, 吴永红等(2015)对太湖北部TH-004 钻孔元素地球化学指标的研究表明, 晚全新世该地区气候冷暖交替, 1.5—0 cal. ka BP 期间气候趋于冷干; 陆福志等(2015)对太湖西部地区LTD-12 号钻孔基于孢粉分析表明, 4.4—0 cal. ka BP, 气候从略湿向干旱转变; 而 Yao 等(2017)对太湖流域西侧高淳剖面基于孢粉、炭屑及腐殖化度等多指标分析表明 4.4—0 cal. ka BP 气候湿润, 这些差异可能是不同的环境代用指标对气候敏感性不同所造成的。因此, 本区亟需更多古气候重建记录来理解太湖流域复杂的气候变化模式。

鉴于此, 本研究将通过太湖东南部湖相沉积中 Rb、Sr 元素的分析, 结合 Rb/Sr 代用指标重建整个全新世以来气候环境演变过程, 弥补该区域 Rb/Sr 环境代用指标研究的不足, 并对气候变化的可能驱动因素进行探讨。此外, 本研究在关键地层处进行了元素和有孔虫分析以探究太湖东南部是否存在海侵现象。

2 研究区概况

太湖流域地处 $30^{\circ}55'40'' \sim 31^{\circ}32'58''N$ 和 $119^{\circ}52'32'' \sim 120^{\circ}32'10''E$, 位于江苏和浙江两省的交界地带, 是长江三角洲的重要组成部分(图 1)。太湖湖泊面积约 2427.9 km^2 , 平均水深为 1.89 m , 最大水深 2.6 m , 为典型的浅水型湖泊(吴永红等, 2015)。太湖流域属于亚热带季风气候, 全年温和湿润, 年平均温度为 $16 \sim 18^{\circ}\text{C}$, 年降水量大于 1000 mm , 降水丰富加之地势低洼, 导致太湖流域历史上经常发生洪涝和海侵等自然灾害。流域水系复杂, 河网密集, 湖沼众多, 主要有洮湖、滆湖、淀山湖及阳澄湖等(张根福等, 2014), 主要进出河流 50 多条, 地表、地下水资源量丰富, 水资源总量为 $106.0 \times 10^8 \text{ m}^3$, 流域内水文交换现象强烈。太湖地区也是长江流域较早有人类定居和种植水稻的地区之一(Long, 2022)。

3 材料与方法

3.1 样品采集

利用人工钻在平望镇梅堰社区进行钻孔岩心采

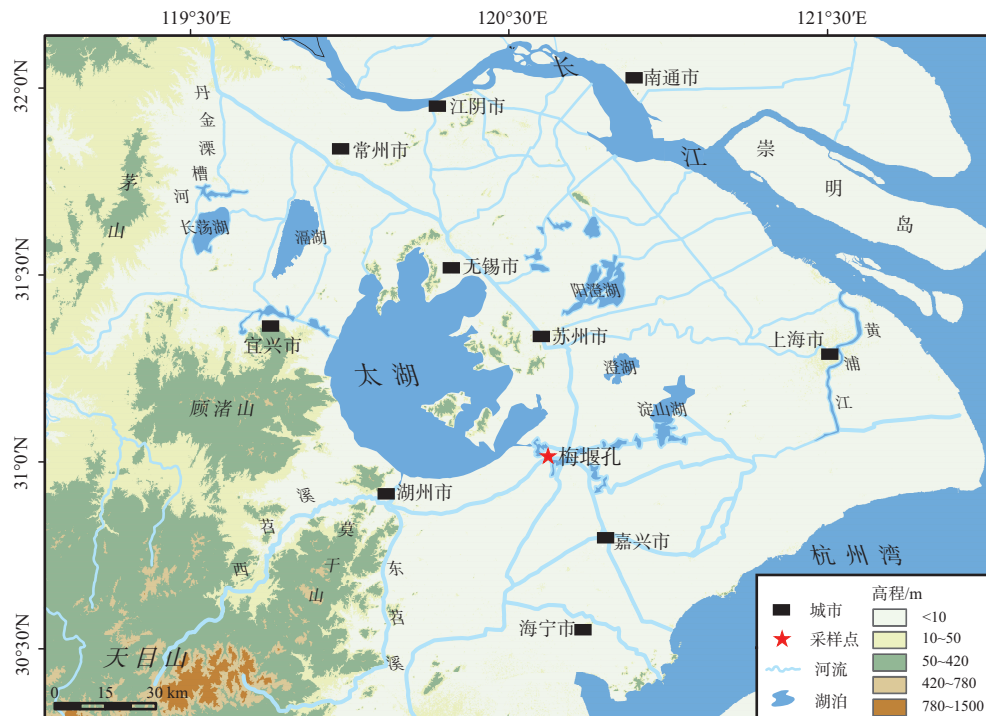


图 1 太湖流域与梅堰孔地理位置

Fig. 1 Location of Taihu Lake Basin and Meiyuan borehole, eastern China

取, 得到 1 根连续、新鲜的湖相沉积岩心, 采样位置为 30°58'N、120°34'E。采样点位于太湖东南岸(图 1), 是古太湖湖泊沉积范围的一部分, 有青灰色湖相淤泥层发育, 其中, 深度 0~50 cm 为耕土层, 深度 50~90 cm 为灰黑色黏土质粉砂层, 深度 90~233 cm 为青灰色淤泥层, 深度 233~375 cm 为灰黑色淤泥层, 深度 375~450 cm 为黑色泥炭层。所采集岩心总长度为 617 cm, 岩心采集运输至实验室后立刻采用低温保存。本研究选取深度范围 0~399 cm 作为研究对象, 并按照 3 cm 间距进行分样, 共获得 130 个样品, 将所采得的样品放入密封袋中以防止样品遭到污染, 保证后期处理所得数据的可信度。

3.2 实验方法

为建立沉积年代序列, 在梅堰孔岩心深度 163 cm、302 cm、460 cm 采取了 3 个含碳沉积物全样样品, 测年的材料为全样总有机质, 由中国科学院广州地球化学研究所 AMS ^{14}C 制样实验室和北京大学核物理与核技术国家重点实验室联合完成 AMS ^{14}C 年代测定工作。Rb 和 Sr 元素含量测定方法是将样品经过自然风干, 去除其中植物根系干扰后, 取适量样品置于玛瑙研钵中充分研磨、过 200 目筛, 并取不少于 5 g 样品在高压下压成圆片, 最后在南京大学现代分析中心利用 X 射线荧光 (XRF) 光谱仪进行测试测定 Rb 和 Sr 含量, 误差小于 0.01。此外, 本研究选取 73 个样品送至南京师范大学环境演变与生态建设江苏省重点实验室进行与含盐量有关的元素测试与分析; 同时, 在采样点距地表 128~452 cm 深度采取 9 块沉积样品进行有孔虫鉴定分析, 由同济大学海洋与地球科学学院赵泉鸿老师完成。

4 结果分析与讨论

4.1 实验结果与年代序列建立

实验结果表明, 太湖梅堰孔岩心中 Rb 元素变

化范围为 35~139 $\mu\text{g/g}$, 平均值为 84.021 $\mu\text{g/g}$, 标准差为 24.972, 变异系数为 0.297; Sr 元素变化范围为 73~138 $\mu\text{g/g}$, 平均值为 109.345 $\mu\text{g/g}$, 标准差为 13.555, 变异系数为 0.124; Rb/Sr 的变化范围为 0.44~1.45, 平均值为 0.779, 标准差为 0.259, 变异系数为 0.333。

将得到的 AMS ^{14}C 数据经通用的校正程序 CALIB 8.20 版本进行树轮校正获得梅堰孔岩心沉积年代序列(表 1)。从线性回归结果看, 梅堰孔岩心的自然沉积年代与沉积速率之间有良好的线性关系 ($R^2=0.9647$), 根据年代校正结果推算出不同层位的沉积速率(图 2), 沉积速率最大的阶段是 163~302 cm, 沉积速率为 0.056 cm/a; 沉积速率最小的阶段是 302~460 cm, 沉积速率为 0.027 cm/a; 整个剖面的平均沉积速率是 0.036 cm/a。梅堰孔岩心的地层连续且无明显的沉积间断和地层倒置现象, 反映出沉积环境比较稳定, 而引起不同层位沉积速率差异的原因可能与当时沉积环境的变化有关, 因此, 测定得出的年代序列具有较高的可信度。

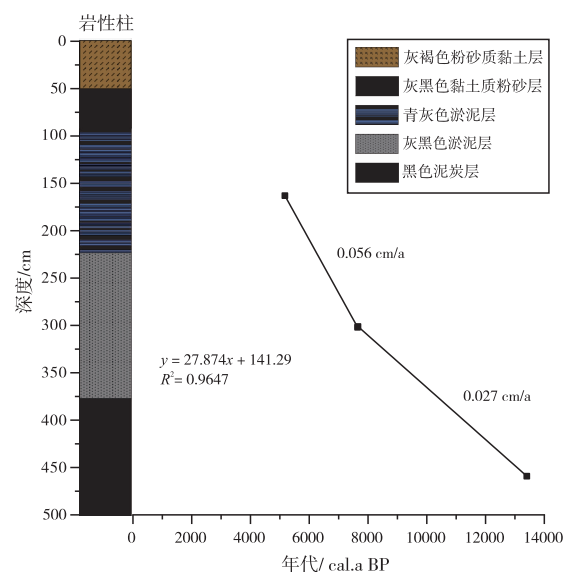


图 2 太湖梅堰孔沉积物年代-深度模式

Fig. 2 Age-depth model of sediments in Meiyuan borehole in Taihu Lake, eastern China

表 1 太湖梅堰孔 AMS ^{14}C 测年数据及校正日历年代

Table 1 Determined and calibrated AMS ^{14}C ages of Meiyuan borehole in Taihu Lake, eastern China

实验编号	测年材料	深度/cm	^{14}C 年代/a BP	2σ 树轮校正年代/BP	中值年代/cal. a BP
GZ3664	总有机质	163~166	4479±28	5036(94.9%)5289	5171
GZ3665	总有机质	302~305	6816±31	7584(100%)7691	7645
GZ3666	总有机质	460~463	11520±43	13309(100%)13475	13391

4.2 古气候重建

已有研究表明 (Chen *et al.*, 2008), 湖泊沉积物中 Rb、Sr 两种元素的比值可以较好地反映流域降水量的变化, Sr 元素相对于 Rb 元素更易迁移, 降水量的增加使得 Sr 被雨水冲刷淋失从而汇聚于湖泊中, 导致湖泊中 Sr 富集, 含量升高, Rb 附着于黏土碎屑中被保留。因此, 湖泊沉积物中较低的 Rb/Sr 值指示了降水量增加的湿润气候, 高值则反映了降水量相对减少的偏干气候 (舒强等, 2009)。在中国北部岱海 (Jin *et al.*, 2006)、黄旗海流域 (申洪源等, 2006) 和山西省公海 (Liu *et al.*, 2014) 湖泊沉积物中 Rb/Sr 低值皆表示温暖湿润气候, 然而, 上述研究对象均是水文封闭型内陆湖泊, 太湖流域水系湖荡众多, 湖底较浅, 多为水文开放型湖泊。太湖流域降水多且集中在夏季, 大量的雨水冲刷加之东部地区地势低洼, 使得太湖东部地区常遭水淹, 洪涝灾害频繁, 因此, 易迁移的 Sr 元素会在低平的出水口被地表水冲刷带走, 而不会在湖泊沉积物中富集 (Liu *et al.*, 2021)。结合长江中下游浅水型湖泊的自然地理环境 (Li *et al.*, 2014, 2021; 金院等, 2023), 作者认为太湖梅堰孔 Rb/Sr 呈现高值, 指示降水丰富的湿润气候, Rb/Sr 呈现低值时则指示了降水量减少的偏干气候。

根据 Rb、Sr 和 Rb/Sr 变化趋势 (图 3), 可以将全新世以来太湖地区的气候变化划分为以下几个阶段:

第 I 阶段 (11.0—9.1 cal. ka BP): Rb/Sr 值整体呈下降趋势, 表明研究区降水减少, 气候由湿润逐渐转向干旱。Rb/Sr 于 9.5 cal. ka BP 处于极低值, 指示了该时段经历了 1 个气候极干事件, 董哥洞石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录 (Wang *et al.*, 2005) 也在此阶段捕捉到了这一弱季风事件。

第 II 阶段 (9.1—6.1 cal. ka BP): Rb 元素变化较为稳定, Sr 含量波动频繁但变化趋势不明显, Rb/Sr 于 7.8 cal. ka BP 达到整个全新世阶段最高值后开始逐渐下降, 指示了早全新世降水增加, 气候整体湿润。8.8—7.1 cal. ka BP 阶段应是太湖地区气候最湿润时期, 与中国长江中下游地区全新世温暖湿润期较为一致, 如 Xu 等 (2020) 对长江三角洲地区元素地球化学和粒度指标记录的研究表明

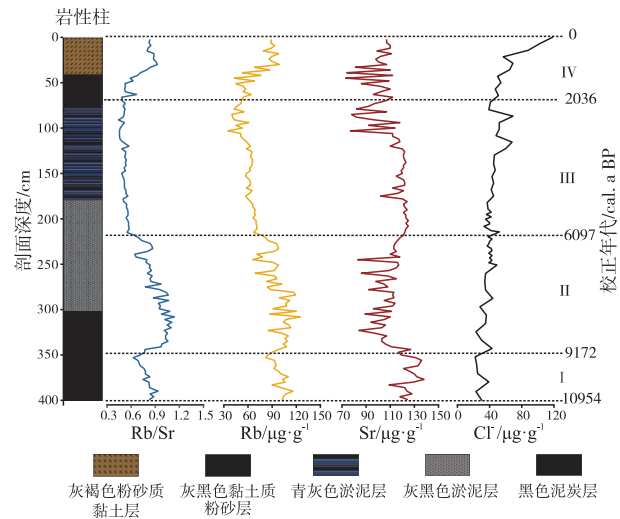


图 3 太湖梅堰孔岩心地球化学元素指标变化曲线

Fig. 3 Change curves of geochemical element index of Meiyan borehole in Taihu Lake, eastern China

9.5—7.0 cal. ka BP 阶段气候温暖湿润。然而, 过于湿润的气候会抑制古文明的发展, 降水量过大导致海水倒灌, 河湖扩张, 人类生存环境受到制约, 局限于地势较高地区 (张瑞虎, 2005; Wang *et al.*, 2022), 太湖流域至今为止发现较少早全新世时期的新石器文化遗址可能与本阶段过于潮湿的气候有关 (陆福志等, 2015)。

第 III 阶段 (6.1—2.0 cal. ka BP): Rb 含量变化较上一阶段起伏大, Sr 含量前期稳定, 后期略有波动, Rb/Sr 整体处于极低值且稳定, 表明此时研究区降水量最低, 气候干旱。长江中下游地区开展了大量全新世以来的古气候重建工作 (Ke *et al.*, 2023; 吴立等, 2023), 如 Liu 等 (2021) 利用湖泊沉积物中 Rb/Sr、CIA 等代用指标进行分析, 发现长江下游南漪湖干早期为 8.0—2.0 cal. ka BP, 其中 6.0—2.0 cal. ka BP 气候最为干旱。Huang 等 (2018) 通过大九湖泥炭多指标所重建的区域降水变化, 及 Liu 等 (2019) 利用孢粉分析技术重建大九湖泥炭水位变化结果皆显示长江中下游地区中全新世气候最为干旱, 这与本研究的结果相同。同时, 良渚文化遗址中发现的大量古水井也同样证实了该阶段较干旱的气候 (申洪源等, 2004)。中全新世较干旱的气候促进了古文明兴起与发展, 环太湖地区相继出现了马家浜文化、崧泽文化、良渚文化等一系列古文明 (陈中原等, 1997), 降水减少使得易积水的低洼地区露出地

表, 人类可以居住在地势较低的地方, 同时采集、狩猎范围以及水稻种植面积扩张皆有利于文化的发展 (张瑞虎, 2005; Wu *et al.*, 2014)。

第IV阶段 (2.0—0 cal. ka BP): Rb 含量波动上升、Sr 含量变化频繁, 但趋势不明显, Rb/Sr 值前期变化较为平稳, 后期呈快速上升趋势, 指示了太湖地区降水强度逐渐增加, 气候湿润。

4.3 盐度与有孔虫分析

太湖流域是否存在海侵现象一直以来备受关注 (王张华和陈杰, 2004; Wang *et al.*, 2012), 海侵过程会导致滨海相盐渍土形成, 其土壤含盐特征与海水含盐特征相似, 盐类中 Cl^- 是一种非常稳定的常量元素离子, 可以较好地保存在地层中, 是反映陆地是否被海侵的最为敏感的指标之一 (苟富刚等, 2018)。Chen 等 (2002) 通过对长江盐离子浓度长期变化趋势的分析表明, Cl^- 浓度有随时间而增高的趋势, 这与图 3 所示 Cl^- 浓度变化趋势较为契合。苟富刚等 (2022) 通过对长江口滨海相盐渍土的研究发现, 低盐区土样 (指土样含盐量未达到盐渍土级别或仅个别土样含盐量达到盐渍土级别) 中 Cl^- 平均浓度范围为 72.0 ~ 606.0 $\mu\text{g/g}$ 。本研究中 Cl^- 浓度平均值为 42.06 $\mu\text{g/g}$, 小于低盐区土壤中 Cl^- 浓度平均值, 也远小于海洋中 Cl^- 浓度 (19 354 $\mu\text{g/g}$) (冯士箴等, 1999)。与此同时, 有孔虫的鉴定结果显示, 样品中并未发现底栖有孔虫的存在, 综合氯离子浓度分析和有孔虫鉴定结果, 本研究认为全新世期间太湖东南岸地区受海水影响小, 发生海侵现象的可能性较低。

4.4 区域对比与可能气候驱动机制

为更好地了解太湖地区全新世以来气候环境演变与其他区域环境变化间的区别与联系, 本研究将太湖梅堰孔 Rb/Sr 值与邻近区域及全球尺度的环境代用指标进行综合对比。通过对比太湖梅堰孔 Rb/Sr 值与大九湖泥炭叶蜡氢同位素记录 (图 4-a) (Huang *et al.*, 2018)、和尚洞石笋磁性矿物记录 (图 4-b) (Zhu *et al.*, 2017)、南漪湖沉积物 CIA (图 4-c)、Rb/Sr 值 (图 4-d) (Liu *et al.*, 2021) 和巢湖湖泊沉积物中 TOC 含量记录 (图 4-e) (吴立等, 2023), 发现上述地区全新世中晚期变化的总体趋势具有相似性。具体表现为中全新世气候干旱 (或趋于干旱), 2.0 cal. ka BP 以来降水增多, 气

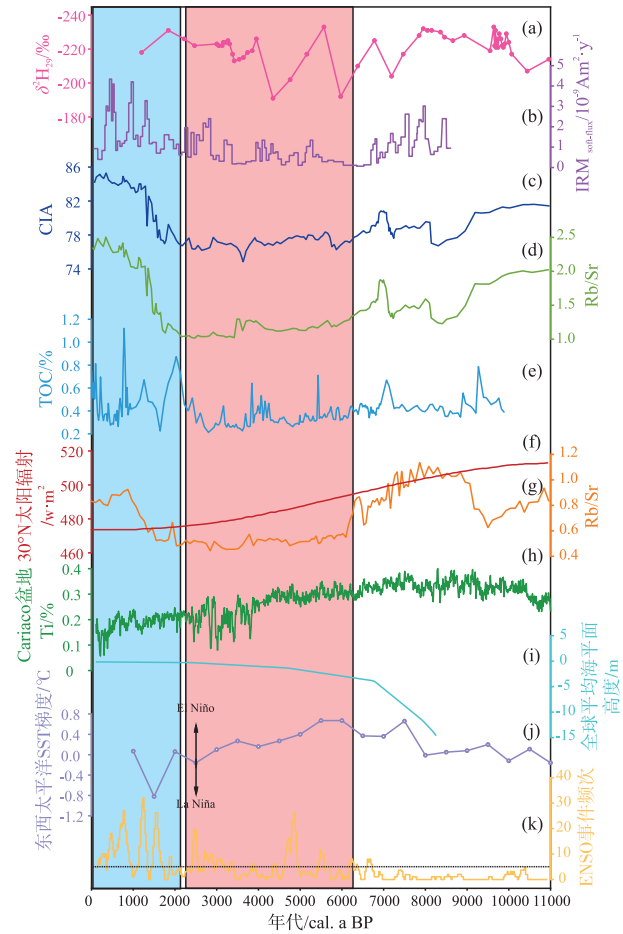


图 4 太湖梅堰孔 Rb/Sr 记录与区域及全球尺度的气候记录对比

a—大九湖泥炭叶蜡氢同位素记录 (Huang *et al.*, 2018); b—和尚洞石笋磁性矿物记录 (Zhu *et al.*, 2017); c—南漪湖沉积物 CIA 记录 (Liu *et al.*, 2021); d—南漪湖沉积物 Rb/Sr 记录 (Liu *et al.*, 2021); e—巢湖沉积物 TOC 含量记录 (吴立等, 2023); f—北半球 30°N 太阳辐射记录 (Berger and Loutre, 1991); g—太湖梅堰孔 Rb/Sr 记录; h—Cariaco 盆地 Ti 含量 (Haug *et al.*, 2001); i—全新世海平面平均高度 (Lambeck *et al.*, 2014); j—东—西太平洋温度梯度 (Koutavas and Joanides, 2012); k—赤道附近的厄尔尼诺事件频率记录 (Moy *et al.*, 2002)。图中粉色条带代表全新世干早期, 蓝色条带代表全新世湿润期

图 4 太湖梅堰孔 Rb/Sr 记录与区域及全球尺度的气候记录对比

Fig. 4 Comparison of Rb/Sr records from Meiyan borehole in Taihu Lake, eastern China, with climatic records from regional and global scales

候湿润。7.4—3.0 cal. ka BP 期间, 大九湖泥炭叶蜡氢同位素记录为全剖面最高值, 表明该阶段气候干旱 (Huang *et al.*, 2018); 和尚洞石笋磁性矿物记录于 6.7—3.4 cal. ka BP 逐渐降低, 说明该阶段降水强度大幅度减弱 (Zhu *et al.*, 2017); 南漪湖沉积物 CIA、Rb/Sr 记录于 6.0—2.0 cal. ka BP 呈

现低值, 指示气候最为干旱 (Liu *et al.*, 2021); 8.2—2.0 cal. ka BP 巢湖沉积物 TOC 含量总体波动下降, 反映了气候逐渐向冷干转变 (吴立等, 2023)。太湖梅堰孔 Rb/Sr 值指示其干早期为 6.1—2.0 cal. ka BP, 虽然太湖与邻近地区干旱气候持续时间稍有差异, 但可以明确的是, 中全新世期间太湖地区的气候与邻近地区有较好的耦合关系, 对应于东亚夏季风的持续减弱。

将太湖梅堰孔 Rb/Sr 值与全球尺度的环境代用指标进行对比分析 (图 4), 发现太湖地区全新世以来气候环境变化可能受控于多种因素。

太阳辐射是地球系统中大气运动的根本能量来源, 太阳辐射变化会对气候变化产生直接或间接的影响 (张兰生等, 2017)。Chen 等 (2015) 利用公海湖泊沉积物孢粉数据重建东亚季风降水变化, 并将其与北半球太阳辐射变化曲线对比, 发现东亚季风强度主要受太阳辐射所驱动。太阳辐射增强, 海陆压力梯度显著升高, 季风强度相应增加, 季风的增强会加大亚洲夏季风水汽输送量, 从而引起全球部分地区降水量增多 (Clemens, 2015; 李明启等, 2023)。Haigh (1996) 通过模拟实验发现, 太阳辐射增强会引起紫外线辐射增强, 平流层底部逐渐增暖并加热对流层大气, 导致 Hardley 环流范围扩大且向极地移动, 从而影响季风强度, 降水增多。通过对比北半球 30° 太阳辐射记录 (图 4-f) (Berger and Loutre, 1991) 与太湖流域梅堰孔 Rb/Sr 值记录 (图 4-g), 发现二者之间有较好的耦合关系, 这可能指示太阳辐射是太湖地区全新世期间降水变化的主要驱动力之一。图 4-f 表明, 在整个全新世阶段太阳辐射呈现不断下降趋势, 导致夏季风势力不断减弱。在早全新世阶段, 北半球太阳辐射较强, Rb/Sr 处于高值, 此时也正是研究区气候最湿润期, 在中晚全新世阶段, 太阳辐射值不断减弱, Rb/Sr 长期处于低值, 太湖地区也经历了一个约 4.0 cal. ka BP 的干早期。由此本研究认为, 受太阳辐射所驱动的东亚季风强度在全新世期间显著影响太湖地区的气候干湿变化。

然而, 太湖流域气候模式复杂, 不仅仅只受控于北半球 30° 太阳辐射强度。研究区 11.0—9.1 cal. ka BP 阶段气候偏干, 降水较少, Rb/Sr 指标变化趋势与太阳辐射记录存在明显差异, 指示了除太阳辐射外, 还存在其他因素影响太湖地区气

候。早全新世阶段较高的太阳辐射值和温室气体辐射强迫值导致冰盖加速消融, 但有研究表明 (Ullman *et al.*, 2016) 此阶段全球冰盖仍大面积残存, 保留了末次冰盛期冰盖近一半的面积, 较高的地表反照率抵消了夏季太阳辐射增强的影响且造成北半球中高纬地区寒冷偏干。Carlson 等 (2008) 通过模拟发现劳伦泰德冰盖在 9.0—8.5 cal. ka BP 期间快速回退, 直到 6.0 cal. ka BP 才完全消融, 并造成海平面每年上升 0.7~1.3 cm, 大量的冰川融水注入北大西洋, 造成大西洋经向翻转流形成减弱甚至调停, 破坏南北半球热平衡, 最终导致热带辐合带 (ITCZ) 南移, 东亚季风强度减弱 (Yang *et al.*, 2020; Hou *et al.*, 2023)。劳伦泰德冰盖消融会导致全球海平面大幅度上升 (Ullman *et al.*, 2016)。因此, 本研究使用全新世海平面上升值指示冰盖残存面积。通过对比分析 Rb/Sr 值 (图 4-g) 与 30°N 太阳辐射记录 (图 4-f) (Berger and Loutre, 1991)、Cariaco 盆地 Ti 含量 (图 4-h) (Haug *et al.*, 2001) 与全新世海平面上升值 (图 4-i) (Lambeck *et al.*, 2014), 可以推断出研究区早全新世偏干的气候可能是冰盖大面积残存抵消了太阳辐射增暖所致。

厄尔尼诺 (El Niño) 事件和西太平洋副热带高压 (WPSH) 的位置也会在长时间尺度上影响东亚季风降水量 (Wang and Huang, 2019; Liu *et al.*, 2021)。前人研究表明 (Gagan *et al.*, 1998, 2004), 厄尔尼诺事件在早全新世发生频次较低, 直至 5.0 cal. ka BP, 其活跃度大幅度上升 (Rodbell *et al.*, 1999)。因此, 东亚季风降水量在早全新世阶段受厄尔尼诺影响小, 而在晚全新世阶段受厄尔尼诺影响显著。厄尔尼诺态下西太平洋暖池海水表面温度 (SST) 低于正常海温, WPSH 增强并向南移动。通常, 东亚季风区最大降雨带位于 WPSH 北部大约 5°~10° (Rao *et al.*, 2016), 在上述情境下, 降雨带将会长期滞留在长江中下游流域, 导致该地区降水增多 (Liu *et al.*, 2019), 而中国北方地区降水减少, 形成“南涝北旱”的两极降水模式 (胡洁等, 2022)。相反, 拉尼娜态下热带太平洋纬度方向 SST 梯度增强, WPSH 减弱并向北移动, 使得季风降雨带禁锢在更北的方向, 导致长江中下游流域降水减少, 北方地区降水增多。通过对比 Rb/Sr 值 (图 4-g)、东西太平洋温度梯度 (图 4-j)

(Koutavas and Joanides, 2012) 和赤道附近厄尔尼诺事件发生频率(图 4-k)(Moy *et al.*, 2002), 发现厄尔尼诺事件频率较高阶段与研究区晚全新世湿润气候有较好的对应关系。如图 4-j 和 4-k 所示, 8.0—3.0 cal. ka BP 热带太平洋纬度方向 SST 梯度逐渐升高, 热带太平洋逐渐向拉尼娜态转变, 研究区 Rb/Sr 自 7.8 cal. ka BP 达到峰值后逐渐下降, 且经历了一个约 4.0 cal. ka BP 的干旱期。晚全新世阶段热带太平洋逐渐向厄尔尼诺态转变, 此时研究区 Rb/Sr 显著上升, 降水增多, 表明太湖地区气候在晚全新世期间可能受到厄尔尼诺的影响。

综上所述, 全新世不同阶段影响太湖东南岸的气候驱动机制会发生改变。太阳辐射和厄尔尼诺存在不同的主导阶段和耦合阶段, 太阳辐射强烈影响着太湖地区早中全新世气候, 然而晚全新世太湖地区气候变化与太阳辐射下降趋势明显不一致, 厄尔尼诺频次增强平衡了太阳辐射减弱对季风区降水的影响, 成为研究区气候的主控因子。

5 结论

本研究基于太湖梅堰孔岩心的 Rb、Sr 及 Rb/Sr 环境代用指标重建了太湖地区全新世以来的气候变化, 得出了以下结论:

1) 太湖地区全新世以来的气候变化可以划分为 4 个阶段: 11~9.1 cal. ka BP 气候由湿润逐渐转向干旱; 9.1~6.1 cal. ka BP, 气候整体湿润, 其中 8.8~7.1 cal. ka BP 是太湖流域气候最湿润时期; 6.1~2.0 cal. ka BP 阶段降水最低, 气候偏干; 2.0~0 cal. ka BP 阶段, 降水逐渐增多, 气候湿润。

2) 太阳辐射和厄尔尼诺共同影响着研究区气候环境, 且二者存在不同的主导和耦合阶段, 太阳辐射通过直接和间接作用影响着太湖地区早中全新世气候, 晚全新世阶段气候呈现厄尔尼诺态, 西太平洋副高南移, 雨带滞留在长江中下游流域, 平衡了太阳辐射减弱对季风区降水的影响, 成为太湖地区气候的主控因子。

3) 对 Cl⁻ 浓度测定和有孔虫分析的结果表明, 梅堰孔沉积物中 Cl⁻ 浓度平均值为 42.06 mg/kg, 远小于海洋和低盐区土壤中 Cl⁻ 浓度。有孔虫的鉴定结果显示, 样品中并未发现底栖有孔虫存在。本研究认为全新世期间太湖东部地区受海水影响小, 发生海侵现象的可能性较低。

参考文献 (References)

- 陈中原, 洪雪晴, 李山, 王露, 史晓明. 1997. 太湖地区环境考古. 地理学报, 52(2): 131-137. [Chen Z Y, Hong X Q, Li S, Wang L, Shi X M. 1997. Study of archaeology-related environment evolution of Taihu Lake in southern Changjiang delta plain. Acta Geographica Sinica, 52(2): 131-137]
- 冯士筭, 李凤岐, 李少菁. 1999. 海洋科学导论. 北京: 高等教育出版社, 110-115. [Feng S Z, Li F Q, Li S J. 1999. Introduction to Marine Science. Beijing: Higher Education Press, 110-115]
- 苟富刚, 龚绪龙, 杨磊, 张岩, 蔡露明. 2018. 江苏沿海地区土体含盐特征及指示作用. 长江流域资源与环境, 27(6): 1380-1387. [Gou F G, Gong X L, Yang L, Zhang Y, Cai L M. 2018. Indicative functions and characteristics of soil salinity in coastal Jiangsu area. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 27(6): 1380-1387]
- 苟富刚, 龚绪龙, 杨露梅, 张岩, 刘明遥. 2022. 长江河口百米以浅土体含盐特征及其沉积环境演化. 现代地质, 36(2): 462-473. [Gou F G, Gong X L, Yang L M, Zhang Y, Liu M Y. 2022. Salt content features and sedimentary environmental evolution in shallow-level (<100 m) soils from the Yangtze River estuary. Geoscience, 36(2): 462-473]
- 胡洁, 汪勇, 金院, 项超生, 吴立, 徐仪红. 2022. 长江下游升金湖沉积物记录的过去千年高分辨率气候环境变化. 第四纪研究, 42(2): 421-434. [Hu J, Wang Y, Jin Y, Xiang C S, Wu L, Xu Y H. 2022. High-resolution paleoclimatic changes recorded in Lake Shengjin, lower reaches of the Yangtze River over the last millennium. Quaternary Sciences, 42(2): 421-434]
- 金院, 汪勇, 胡洁, 韩瑞超, 项超生. 2023. 升金湖沉积物 1000 年以来的元素地球化学记录及其水文意义. 沉积学报, 41(1): 219-232. [Jin Y, Wang Y, Hu J, Han R C, Xiang C S. 2023. Geochemical element records and hydrological significance of Lake Shengjin sediments during the past millennium. Acta Sedimentologica Sinica, 41(1): 219-232]
- 景存义. 1989. 太湖平原中石器、新石器时代人类文化的发展与环境. 南京师大学报(自然科学版), 12(3): 81-87. [Jing C Y. 1989. The relation between environment and ancient culture on the Taihu Lake in the Mesolithic and neolithic. Journal of Nanjing Normal University(Natural Science Edition), 12(3): 81-87]
- 李冰, 马春梅, 朱诚, 李开封, 朱笑虹, 谭燕, 王坤华, 郭天虹, 贾天骄. 2018. 太湖东部平原平望孔全新世环境演变地层记录. 古生物学报, 57(4): 513-523. [Li B, Ma C M, Zhu C, Li K F, Zhu X H, Tan Y, Wang K H, Guo T H, Jia T J. 2018. Environmental evolution of eastern Taihu Plain during the Holocene achieved by Pingwang core. Acta Palaeontologica Sinica, 57(4): 513-523]
- 李明启, 邵雪梅, 张永. 2023. 392BC—2017AD 柴达木盆地东北部降水变化及其与太阳活动和强火山喷发的联系. 地理学报, 78(1): 71-86. [Li M Q, Shao X M, Zhang Y. 2023. Precipitation variation and its linkage with solar activity and large volcanic eruptions during 392 BC-2017 AD in Northeastern Qaidam Basin, Chi-

- na. *Acta Geographica Sinica*, 78(1): 71-86]
- 陆福志,朱诚,马春梅,张文卿,李冰,李开封. 2015. 太湖西部地区 8.2 ka BP 以来的高分辨率孢粉记录. *地层学杂志*, 39(1): 116-123. [Lu F Z, Zhu C, Ma C M, Zhang W Q, Li B, Li K F. 2015. High-resolution palynological record in the western region of Taihu Lake since 8.2 ka BP. *Journal of Stratigraphy*, 39(1): 116-123]
- 申洪源,朱诚,贾玉连. 2004. 太湖流域地貌与环境变迁对新石器文化传承的影响. *地理科学*, 24(5): 580-585. [Shen H Y, Zhu C, Jia Y L. 2004. Impact of geomorphology and environmental variance on neolithic culture evolution in Taihu Basin. *Scientia Geographica Sinica*, 24(5): 580-585]
- 申洪源,贾玉连,李徐生,吴敬禄,魏灵,王朋岭. 2006. 内蒙古黄旗海不同粒级湖泊沉积物 Rb、Sr 组成与环境变化. *地理学报*, 61(11): 1208-1217. [Shen H Y, Jia Y L, Li X S, Wu J L, Wei L, Wang P L. 2006. Environmental change inferred from distribution of Rb and Sr in different grain size fractions from lacustrine sediments in Huangqihai Lake, Inner Mongolia. *Acta Geographica Sinica*, 61(11): 1208-1217]
- 沈吉. 2009. 湖泊沉积研究的历史进展与展望. *湖泊科学*, 21(3): 307-313. [Shen J. 2009. Progress and prospect of palaeolimnology research in China. *Journal of Lake Sciences*, 21(3): 307-313]
- 舒强,赵志军,陈晔,张茂恒,李吉均. 2009. 江苏兴 DS 浅孔沉积物地球化学元素与粒度所揭示的古环境意义. *地理科学*, 29(6): 923-928. [Shu Q, Zhao Z J, Chen Y, Zhang M H, Li J J. 2009. Palaeoenvironmental significance of geochemistry elements and grain size of DS core sediments in Xinghua, Jiangsu Province. *Scientia Geographica Sinica*, 29(6): 923-928]
- 王苏民,李建仁. 1991. 湖泊沉积: 研究历史气候的有效手段: 以青海湖、岱海为例. *科学通报*, 36(1): 54-56. [Wang S M, Li J R. 1991. Lake sedimentation: an effective method to study historical climate: taking Qinghai Lake and Daihai Lake as examples. *Chinese Science Bulletin*, 36(1): 54-56]
- 王张华,陈杰. 2004. 全新世海侵对长江口沿海平原新石器遗址分布的影响. *第四纪研究*, 24(5): 537-545. [Wang Z H, Chen J. 2004. Distribution of the neolithic sites in the Changjiang coastal plains: Holocene transgression impact. *Quaternary Sciences*, 24(5): 537-545]
- 吴立,李晨晨,马春梅,管后春,王心源,张广胜,路曙光,李肖雪,胡晓思,周迎秋,张红梅. 2023. 巢湖碳氮地球化学沉积记录揭示的全新世以来环境演化. *生态学报*, 43(16): 6728-6742. [Wu L, Li C C, Ma C M, Guan H C, Wang X Y, Zhang G S, Lu S G, Li X X, Hu X S, Zhou Y Q, Zhang H M. 2023. Environmental evolutions derived from carbon and nitrogen geochemistry of lacustrine sediments since the Holocene in the Chaohu Lake, East China. *Acta Ecologica Sinica*, 43(16): 6728-6742]
- 吴永红,郑祥民,周立旻. 2015. 太湖 8000 年来沉积物元素变化特征及古环境指示. *盐湖研究*, 23(1): 16-21. [Wu Y H, Zheng X M, Zhou L M. 2015. Variation of elements in sedimentary and paleo-environment indicators during the last 8000 years in Taihu Lake. *Journal of Salt Lake Research*, 23(1): 16-21]
- 姚檀栋, Thompson L G. 1992. 敦德冰芯记录与过去 5 ka 温度变化. *中国科学*, B 辑, (10): 1089-1093. [Yao T D, Thompson L G. 1992. Dundee ice core records with temperature changes in the past 5 ka. *Science in China Series B-Chemistry, Life Sciences & Earth Sciences*, (10): 1089-1093]
- 袁悦,李成龙,左书豪,盛雪芬,林春明,谢志东. 2019. 太湖 YLL1 孔沉积特征揭示的全新世太湖演化史. *第四纪研究*, 39(5): 1133-1147. [Yuan Y, Li C L, Zuo S H, Sheng X F, Lin C M, Xie Z D. 2019. Holocene sedimentary characteristics of the core YLL1 of Taihu Lake revealing evolution history of Taihu Lake Basin. *Quaternary Sciences*, 39(5): 1133-1147]
- 张根福,冯贤亮,岳钦韬. 2014. 太湖流域人口与生态环境的变迁及社会影响研究(1851-2005). 上海: 复旦大学出版社, 23-26. [Zhang G F, Feng X L, Yue Q T. 2014. Study on Population and Ecological Environment Changes and Their Social Impact in Taihu Basin(1851-2005). Shanghai: Fudan University Press, 23-26]
- 张兰生,方修琦,任国玉. 2017. 全球变化·2版. 北京: 高等教育出版社, 96-98. [Zhang L S, Fang X Q, Ren G Y. 2017. Global Change. 2nd ed. Beijing: Higher Education Press, 96-98]
- 张瑞虎. 2005. 江苏苏州绰墩遗址孢粉记录与太湖地区的古环境. *古生物学报*, 44(2): 314-321. [Zhang R H. 2005. Sporopollen record in Chuodun site in Suzhou, Jiangsu and palaeoenvironment in Taihu region. *Acta Palaeontologica Sinica*, 44(2): 314-321]
- 赵宝成,王张华,陈中原,吴国璋. 2007. 太湖平原碟形洼地沉积物记录的距今 8000 年以来植被、气候与地貌演变. *古地理学报*, 9(3): 321-330. [Zhao B C, Wang Z H, Chen Z Y, Wu G X. 2007. Climate vegetation and geomorphology evolution since 8 ka BP recorded by sediments from dish-like depression of Taihu Lake plain. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 9(3): 321-330]
- Berger A, Loutre M F. 1991. Insolation values for the climate of the last 10 million years. *Quaternary Science Reviews*, 10(4): 297-317.
- Carlson A E, LeGrande A N, Oppo D W, Came R E, Schmidt G A, Anslow F S, Licciardi J M, Obbink E A. 2008. Rapid early Holocene deglaciation of the Laurentide ice sheet. *Nature Geoscience*, 1(9): 620-624.
- Chen F H, Xu Q H, Chen J H, Birks H J B, Liu J B, Zhang S R, Jin L Y, An C B, Telford R J, Cao X Y, Wang Z L, Zhang X J, Selvaraj K, Lu H Y, Li Y C, Zheng Z, Wang H P, Zhou A F, Dong G H, Zhang J W, Huang X Z, Bloemendal J, Rao Z G. 2015. East Asian summer monsoon precipitation variability since the last deglaciation. *Scientific Reports*, 5(1): 1-11.
- Chen J S, Wang F Y, Xia X H, Zhang L T. 2002. Major element chemistry of the Changjiang (Yangtze River). *Chemical Geology*, 187(3-4): 231-255.
- Chen L, Shen H Y, Jia Y L, Wu J L, Li X S, Wei L, Wang P L. 2008. Environmental change inferred from Rb and Sr of lacustrine sediments in Huangqihai Lake, Inner Mongolia. *Journal of Geographical Sciences*, 18: 373-384.
- Chen T, Ryves D B, Wang Z H, Lewis J P, Yu X N. 2018. Mid- to late

- Holocene geomorphological and hydrological changes in the south Taihu area of the Yangtze delta plain, China. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 498: 127–142.
- Cheng H, Zhang H W, Zhao J Y, Li H Y, Ning Y F, Kathayat G. 2019. Chinese stalagmite paleoclimate researches: a review and perspective. *Science China Earth Sciences*, 62: 1489–1513.
- Clemens S C. 2015. Late Cenozoic climate change in Asia: loess, monsoon and monsoon-arid environment evolution. *Quaternary Science Reviews*, 107: 274–275.
- Gagan M K, Ayliffe L K, Hopley D, Cali J A, Mortimer G E, Chappell J, McCulloch M T, Head M J. 1998. Temperature and surface-ocean water balance of the mid-Holocene tropical western Pacific. *Science*, 279(5353): 1014–1018.
- Gagan M K, Hendy E J, Haberle S G, Hantoro W S. 2004. Post-glacial evolution of the Indo-Pacific Warm Pool and El Niño-Southern oscillation. *Quaternary International*, 118: 127–143.
- Haigh J D. 1996. The impact of solar variability on climate. *Science*, 272(5264): 981–984.
- Haug G H, Hughen K A, Sigman D M, Peterson L C, Röhl U. 2001. Southward migration of the intertropical convergence zone through the Holocene. *Science*, 293(5533): 1304–1308.
- Hou M, Wu W X, Cohen D J, Zeng Z Q, Huang H, Zheng H B, Ge Q S. 2023. Detection of a mid-Holocene climate event at 7.2 ka BP based on an analysis of globally-distributed multi-proxy records. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 618: 111525.
- Huang X Y, Pancost R D, Xue J T, Gu Y S, Evershed R P, Xie S C. 2018. Response of carbon cycle to drier conditions in the mid-Holocene in central China. *Nature Communications*, 9: 1369.
- Innes J B, Zong Y Q, Wang Z H, Chen Z Y. 2014. Climatic and palaeoecological changes during the mid- to Late Holocene transition in eastern China: high-resolution pollen and non-pollen palynomorph analysis at Pingwang, Yangtze coastal lowlands. *Quaternary Science Reviews*, 99: 164–175.
- IPCC. 2023. *Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Switzerland: Geneva.
- Jin Z D, Cao J J, Wu J L, Wang S M. 2006. A Rb/Sr record of catchment weathering response to Holocene climate change in Inner Mongolia. *Earth Surface Processes and Landforms*, 31(3): 285–291.
- Ke R, Xiao X Y, Chi C T, Hillman A, Jia B Y, Yang X D. 2023. Middle-late Holocene environment change induced by climate and human based on multi proxy records from the middle and lower reaches of Yangtze River, eastern China. *Science China Earth Sciences*, 66(7): 1450–1467.
- Koutavas A, Joanides S. 2012. El Niño-Southern Oscillation extrema in the Holocene and Last Glacial Maximum. *Paleoceanography*, 27: PA4208.
- Lambeck K, Rouby H, Purcell A, Sun Y Y, Sambridge M. 2014. Sea level and global ice volumes from the Last Glacial Maximum to the Holocene. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 111(43): 15296–15303.
- Li F, Zhu C, Wu L, Sun W, Liu H, Chyi S J, Kung C L, Zhu G Y, Wang X C. 2014. Environmental humidity changes inferred from multi-indicators in the Jiangnan Plain, Central China during the last 12700 years. *Quaternary International*, 349: 68–78.
- Lin D R, Zhong W, Lin Y B, Zhang Y D, Li T H, Quan M Y. 2022. Organic matter source traced by n-alkane records derived from lacustrine sediments from Daping swamp in the western Nanling Mountains (South China) and its response to climatic variability since the last deglacial. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 605: 111217.
- Liu H Y, Gu Y S, Huang X Y, Yu Z C, Xie S C, Cheng S G. 2019. A 13000-year peatland palaeohydrological response to the ENSO-related Asian monsoon precipitation changes in the middle Yangtze Valley. *Quaternary Science Reviews*, 212: 80–91.
- Liu J B, Chen J H, Selvaraj K, Xu Q H, Wang Z L, Chen F H. 2014. Chemical weathering over the last 1200 years recorded in the sediments of Gonghai Lake, Lyliang Mountains, North China: a high-resolution proxy of past climate. *Boreas*, 43(4): 914–923.
- Liu J B, Shen Z W, Chen W, Chen J, Zhang X, Chen J H, Chen F H. 2021. Dipolar mode of precipitation changes between North China and the Yangtze River Valley existed over the entire Holocene: evidence from the sediment record of Nanyi Lake. *International Journal of Climatology*, 41(3): 1667–1681.
- Liu X Y, Zhou X, Zhan T, Zhou X Y, Wu H B, Jiang S W, Tu L Y, Oye-banji D, Shen Y N. 2023. Pollen evidence for a wet Younger Dryas in northern NE China. *Catena*, 220: 106667.
- Long T. 2022. Contrasting developments of the cultural complexes south and north of Hangzhou Bay, eastern China, controlled by coastal environmental changes. *Quaternary International*, 623: 94–100.
- Lu F Z, Ma C M, Zhu C, Lu H Y, Zhang X J, Huang K Y, Guo T H, Li K F, Li L, Li B, Zhang W Q. 2019. Variability of East Asian summer monsoon precipitation during the Holocene and possible forcing mechanisms. *Climate Dynamics*, 52: 969–989.
- Moy C M, Seltzer G O, Rodbell D T, Anderson D M. 2002. Variability of El Niño/Southern Oscillation activity at millennial timescales during the Holocene epoch. *Nature*, 420(6912): 162–165.
- Qiu Z W, Ding J L, Wang X, Jiang H G. 2022. Vegetation landscape and paleoenvironment evolution recorded at the late Neolithic Zhumucun site, East China. *Quaternary International*, 640: 12–22.
- Rao Z G, Li Y X, Zhang J W, Jia G D, Chen F H. 2016. Investigating the long-term palaeoclimatic controls on the δD and $\delta^{18}O$ of precipitation during the Holocene in the Indian and East Asian monsoonal regions. *Earth-Science Reviews*, 159: 292–305.
- Rodbell D T, Seltzer G O, Anderson D M, Abbott M B, Enfield D B, Newman J H. 1999. An ~15000-year record of El Niño-driven alluviation in southwestern Ecuador. *Science*, 283(5401): 516–520.
- Stanley D J, Chen Z Y. 1996. Neolithic settlement distributions as a function of sea level-controlled topography in the Yangtze delta, China. *Geology*, 24(12): 1083–1086.

- Ullman D J, Carlson A E, Hostetler S W, Clark P U, Cuzzone J, Milne G A, Winsor K, Caffee M. 2016. Final Laurentide ice-sheet deglaciation and Holocene climate-sea level change. *Quaternary Science Reviews*, 152: 49–59.
- Wang J Q, Liu J L. 2000. Amino acids and stable carbon isotope distributions in Taihu Lake, China, over the last 15000 years, and their paleoecological implications. *Quaternary Research*, 53: 223–228.
- Wang T L, Li D, Cheng X, Lan J H, Edwards R L, Cheng H, Liu X X, Xue G, Xu H, Ma L, Zang J J, Wang Y Q, Gao Y L, Sinha A, Tan L C. 2022. Hydroclimatic changes in south-central China during the 4.2 ka event and their potential impacts on the development of Neolithic culture. *Quaternary Research*, 109: 39–52.
- Wang X X, Huang X Y. 2019. Paleohydrological changes in southeastern China from 13.1 to 2.5 ka based on a multi-proxy peat record. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 534: 109282.
- Wang Y J, Cheng H, Edwards R L, He Y Q, Kong X G, An Z S, Wu J Y, Kelly M J, Dykoski C A, Li X D. 2005. The Holocene Asian monsoon: links to solar changes and North Atlantic climate. *Science*, 308(5723): 854–857.
- Wang Z H, Zhuang C C, Saito Y, Chen J, Zhan Q, Wang X D. 2012. Early mid-Holocene sea-level change and coastal environmental response on the southern Yangtze delta plain, China: implications for the rise of Neolithic culture. *Quaternary Science Reviews*, 35: 51–62.
- Wu L, Zhu C, Zheng C G, Li F, Wang X H, Li L, Sun W. 2014. Holocene environmental change and its impacts on human settlement in the Shanghai area, East China. *Catena*, 114: 78–89.
- Xu G, Liu J, Gugliotta M, Saito Y, Chen L L, Zhang X, Hu G. 2020. Link between East Asian summer monsoon and sedimentation in river-mouth sandbars since the early Holocene preserved in the Yangtze River subaqueous delta front. *Quaternary Research*, 95: 84–96.
- Yang X L, Liu R K, Zhang R, Wang B Y, Zhang R P, Yan Y R. 2020. A stalagmite $\delta^{18}\text{O}$ record from Jinfo Cave, southern China reveals early-mid Holocene variations in the East Asian Summer Monsoon. *Quaternary International*, 537: 61–68.
- Yao F L, Ma C M, Zhu C, Li J Y, Chen G, Tang L Y, Huang M, Jia T J, Xu J J. 2017. Holocene climate change in the western part of Taihu Lake region, East China. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 485: 963–973.
- Zhang X, Zheng Z, Huang K Y, Cheng J, Cheddadi R, Zhao Y, Liang C, Yang X Q, Wan Q C, Tang Y J, Chen C, Li J. 2023. Quantification of Asian monsoon variability from 68 ka BP through pollen-based climate reconstruction. *Science Bulletin*, 68: 713–722.
- Zhu Z M, Feinberg J M, Xie S C, Bourne M D, Huang C J, Hu C Y, Cheng H. 2017. Holocene ENSO-related cyclic storms recorded by magnetic minerals in speleothems of central China. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 114(5): 852–857.

(责任编辑 李新坡; 英文审校 徐杰)

“CCUS 地质基础与应用”专题征稿启事

《古地理学报》拟于 2025 年出版“CCUS 地质基础与应用”专题。

随着全球气候变化问题日益严峻,碳捕集、利用与封存(CCUS)技术作为一种重要的温室气体减排手段,其地质基础与应用研究在古地理学和沉积学领域具有重要意义。为促进该领域学术交流,展示最新研究成果,特开展此征稿活动。

1) 征稿主题(包括但不限于以下内容): (1)CCUS 工程的地质基础、应用地质相关研究; (2)沉积学在 CCUS 中的应用; (3)CO₂ 矿化封存机制与沉积成岩作用过程研究; (4)不同地质构造背景下 CCUS 工程的可行性研究; (5)油气田地质条件对 CCUS 项目选址、潜力评价、性能影响等; (6)国内外代表性 CCUS 项目成果分析,CCUS 新途径、新理论和新方法等。

2) 征稿要求: 研究论文或综述文章,论文应属于作者的原创成果,数据真实可靠,未在正式出版物上发表。论文格式依据《古地理学报》最新刊出文章。

3) 投稿网址: www.gldxb.cn, 请注明专题投稿。

4) 征稿时间: 即日起至 2025 年 7 月 31 日。

5) 客座编辑: 生态环境部环境规划院碳达峰碳中和研究中心蔡博峰研究员、庞凌云助理研究员,中国科学院武汉岩土力学研究所李琦研究员。

《古地理学报》编辑部

2025 年 1 月