第 27 卷 第 6 期
2025 年 12 月

古 地 理 学 报
JOURNAL OF PALAEOGEOGRAPHY（Chinese Edition）

Vol. 27 No. 6
Dec. 2025

文章编号：1671-1505(2025)06-1564-13 **DOI**:10.7605/gdlxb.2025.055

江西鄱阳湖近 5700 年以来气候变化的植硅体记录*

徐 涛 谢曼平 吴 璇 胡华秀 革定宽

云南师范大学地理学部，云南昆明 650500

摘 要 鄱阳湖地处东亚季风活动频繁区，是全新世气候变化敏感地区之一。为了重建鄱阳湖地区近 5700 年以来的气候演化过程并讨论其气候演化机制，以鄱阳湖 ZK01 钻孔内植硅体为指标，采用主成分分析方法与温暖指数划分出了 3 个主要的气候阶段，结果显示：(1) 近 5700 年以来鄱阳湖地区出现了 4 次明显的相对干旱期和 3 次相对湿润期，植硅体记录对全球性事件识别较为敏感，例如 4.2 ka 事件和小冰期；(2) 植硅体记录与响应东亚夏季风变化的石笋 $\delta^{18}O$ 记录存在较好的对应关系，东亚夏季风强度减弱时鄱阳湖地区气候较湿润，反之则较干旱；(3) 位于东亚季风区南部的鄱阳湖植硅体记录同指示降水变化的华北岱海地区树木花粉记录间具有一定可比性，显示出在中晚全新世中国东部季风区的南北方也存在反位相的降水空间格局；(4) ENSO活动对中全新世以来的鄱阳湖地区水文气候具有一定的影响，ENSO 事件强度增加时期多对应着鄱阳湖气候湿润期，而 ENSO 事件的强度变化可能代表厄尔尼诺或拉尼娜的强度变化。

关键词 植硅体 鄱阳湖 全新世 气候演化机制 东亚夏季风

第一作者简介 徐涛，女，2001 年生，硕士研究生，主要从事湖泊沉积和古气候研究工作。E-mail：1710949485@qq.com。

通讯作者简介 谢曼平，女，1977 年生，博士、副教授，主要从事湖泊环境变化和全球变化研究工作。E-mail：formelody@126.com。

中图分类号：P534.63+2 **文献标志码**：A

Phytolith records of climate change over the past 5700 years in Poyang Lake, Jiangxi Province

XU Tao XIE Manping WU Xuan HU Huaxiu GE Dingkuan

Faculty of Geography, Yunnan Normal University, Kunming 650500, *China*

Abstract Poyang Lake, situated in the East Asian monsoon region, is one of the regions most sensitive to Holocene climate change. Consequently, investigating the climatic variations of Poyang Lake since the Holocene holds significant importance. Phytolith analysis offers distinct advantages for reconstructing paleoclimate, and abundant phytoliths have been retrieved from sedimentary cores of Poyang Lake. However, there has been limited in-depth exploration into the mechanisms of climate evolution and regional comparisons in phytolith-based paleoclimate studies of Poyang Lake during the mid-to-late Holocene. To reconstruct the climate evolution process of Poyang Lake over the past 5700 years and

* 国家自然科学基金项目（编号：41961015）和第二次青藏高原综合科学考察研究项目（编号：2019QZKK0202）联合资助。[Co-funded by the National Natural Science Foundation of China (No. 41961015) and the Second Qinghai-Tibet Plateau Comprehensive Scientific Expedition (No. 2019QZKK0202)]

收稿日期：2024-09-11 改回日期：2025-01-09

examine its underlying mechanisms, phytoliths from the ZK01 borehole were utilized as indicators. Principal component analysis was employed to analyze the phytolith assemblages, yielding principal component scores that reflect changes in climate wetness and dryness. Based on variations in phytolith assemblages and the Warmth Index, three major climatic stages were identified. The findings indicate: (1) Over the past 5, 700 years, four relatively dry periods and three relatively humid periods have occurred in the Poyang Lake area. Phytolith records show sensitivity to global events such as the 4.2 ka event and the Little Ice Age. (2) There is a good correspondence between phytolith records in the Poyang Lake area and stalagmite $\delta^{18}O$ records that respond to East Asian summer monsoon (EASM) variability. When the EASM weakens, the Poyang Lake region tends to be wetter, and vice versa. (3) The phytolith records from the Poyang Lake region, situated in the southern part of the East Asian monsoon area, exhibit a degree of comparability with pollen-based precipitation records from the Daihai region in North China. This suggests an anti-phase spatial pattern of precipitation between the southern and northern regions of eastern China's monsoon area during the mid-to late Holocene. (4) Since the mid-Holocene, ENSO activity has influenced the hydrological climate of the Poyang Lake region. Periods of increased ENSO intensity often coincide with humid climate phases in the Poyang Lake region, suggesting that variability in ENSO intensity may reflect changes in the strength of El Niño or La Niña.

Key words　phytolith, Poyang Lake, Holocene, climate evolution mechanism, East Asian Summer Monsoon

About the first author　XU Tao, born in 2001, a master's degree candidate, is mainly engaged in research on lake sediment and palaeoclimate. E-mail: 1710949485@qq.com.

About the corresponding author　XIE Manping, born in 1977, PhD, an associate professor, is mainly engaged in lake environmental change and global change research. E-mail: formelody@126.com.

0　引言

在气候变化日益重要的当今，深入研究古气候变化的过程与机理，是理解当前和预测未来全球气候变化的重要基础（王丽鑫等，2023）。全新世中晚期是距今最近的地质历史时期，这段时期的环境变迁是古气候变化研究的重点之一。针对该时期已开展了多项代用指标的古气候变化研究，其中湖泊沉积物因为其分布广、信息丰富、连续性好、分辨率高、对流域气候与环境的响应十分敏感等优势，已经成为全球气候环境变化研究的重要载体之一（张振克和王苏民，1999；沈吉，2009）。当前，研究湖泊沉积物环境演变所使用的指标包括物理指标、地球化学指标、生物指标等（沈吉等，2010）。作为生物指标之一的植硅体具有其独特优势。与其他各项指标相比，植硅体具有对气候变化敏感、不易受长距离传播影响、数量多、分布广等优势（Qader *et al.*, 2023），在湖相沉积物古环境演变方面取得了一系列研究成果（刘嘉康，2024；Xu *et al.*, 2024）。随着植硅体在古气候研究中的不断发展，出现了许多有助于半定量研究的气候指数，如温暖指数（I_w）、干旱指数（*Iph*）、树木密度指数（*D*/*P*）等。其中对温暖指数的应用较多，因为其对植硅体种属鉴定要求相对较低，对温度指示意义较为明确。例如王伟铭等（2003）利用植硅体类型及其温暖指数所揭示出的气候变化，重建了南京汤山气候的冷暖变化。数理分析方法在植硅体对古气候重建的应用中也有重要作用，如前人通过对中国不同温湿条件下表层土壤中的植硅体组成及其与环境因素之间的相关性进行研究，构建了表层植硅体组合—环境要素的转换函数，并用于古气候重建研究（Lu *et al.*, 2007）。再如范斌等（2006）通过对巢湖钻孔内的植硅体研究，结合主成分分析的结果，重建了该区域中全新世以来的古气候演化过程。

中国东部地区主要受东亚季风环流系统控制。研究表明，东亚夏季风地区的降水存在着空间差异（赵平和周秀骥，2006；Chen *et al.*, 2023；Zhu and Liu, 2023；程曦和施健，2024），即中国东部季风

区降水的南—北偶极型，这种气候模态存在于晚全新世甚至是更长的时间尺度内（Ding *et al.*，2008；Chen *et al.*，2015a；Liu *et al.*，2021）。在全新世不同时间尺度上，东亚夏季风显著增强会导致中国北部降水增多、南部降水减少，这种空间格局通常被描述为“南旱北涝”。在对南方地区长江流域的许多研究中发现，东亚夏季风强度与长江中下游地区水汽变化呈负相关关系，即东亚夏季风增强将导致长江中下游地区降水的减少（Zhao *et al.*，2007；Ding *et al.*，2008；Lü *et al.*，2014；谢傲和罗伯良，2023）。

鄱阳湖地处东亚季风影响区，其东北部为长江下游河谷，汉江、长江中游谷地与其西北部相邻。特殊的地理位置与地形，使其成为中国全新世气候环境变迁的敏感区域之一。在百年到千年较长的时间尺度上，鄱阳湖的水位主要受到气候变化的影响（王兆夺等，2020）。现代测量与模拟显示，东亚夏季风势力强弱与鄱阳湖地区的降水变化呈现出负相关关系（万智巍等，2018），使得该地区降水变化和东部季风区北方记录呈现南—北偶极型，而目前对中晚全新世以来的鄱阳湖地区气候变化和东亚夏季风强弱、北方记录之间关系的研究相对较少，需要进一步的研究对比。在对鄱阳湖地区古气候演化的研究中，已有多种类型的代用指标用于反演该地区古气候变化。例如马振兴等（2004）通过对鄱阳湖沉积物的有机质碳同位素和沉积物特征等进行分析，发现暖湿期鄱阳湖δ^{13}C值相对偏负，冷干期δ^{13}C值相对偏正，指出鄱阳湖 8 ka 以来存在 4 个气候演变旋回。前人基于孢粉记录和碳同位素，构建了鄱阳湖 3500 年来的 8 个古环境变化时期，指出鄱阳湖地区的古水文变化与厄尔尼诺—南方涛动（ENSO）活动有着较为明显的一致性（Gu *et al.*，2018）。此外吴艳宏等（1997）、谢振东等（2006）、庞有智等（2023）也利用孢粉指标进行了一系列相关研究。前人利用鄱阳湖沉积物中的化学风化指标，重建了全新世晚期鄱阳湖地区的气候演变，认为晚全新世鄱阳湖化学风化作用的增强与 ENSO 活动的加强相吻合（Huang *et al.*，2018）。目前已有部分研究利用植硅体指标重建鄱阳湖地区气候变化（李长安和顾延生，1997；王伟铭等，1997；马超等，2018；Gu *et al.*，2022；胡克龙等，2023），但利用植硅体指标进一步研究鄱阳湖中晚全新世以来气候演变及气候演化机制的研究则相对较少。

本研究拟通过对鄱阳湖南部 ZK01 钻孔平均采样间距为 2.5 cm 的 121 个样品进行植硅体形态分析，结合其温暖指数和主成分分析结果，研究鄱阳湖近 5700 年以来的气候环境变化，并将结果进行区域对比，尝试探讨植硅体记录所反映的鄱阳湖地区气候变化与东亚季风及北方地区记录的关系；最后分析太阳活动和 ENSO 活动如何对鄱阳湖地区气候变化产生影响，为进一步全面客观地重建鄱阳湖地区中晚全新世气候变化提供新的参考资料。

1 研究区概况

鄱阳湖（115°49′E～116°46′E，28°24′N～29°46′N）是中国最大的淡水湖泊，位于江西省北部地区，地处长江中游南岸。鄱阳湖流域地貌北部以鄱阳湖平原为主，地势周高中低、三面环山。鄱阳湖由赣江、抚河、新江、饶河、修水等 5 条主要河流注入。气候受东亚夏季风影响，属于亚热带季风气候，夏季温暖湿润，冬季寒冷干燥。夏季风与冬季风交替显著，具有明显的季节特征。年平均气温 16.2～19.7 ℃，年平均降水量 1570 mm，降水量季节性变化较大，冬季降水量全年最少，年平均蒸发量为 1236 mm（孙芳蒂和马荣华，2020）。鄱阳湖地区处于亚热带常绿阔叶林带，生态环境丰富，植被类型多样（曹思佳，2023）。鄱阳湖地区是亚洲东南部亚热带植物区系的起源中心之一（黄秋萍等，2006）。地带性森林植被为亚热带常绿阔叶林，300～800 m 低山丘陵广泛分布着茂盛的常绿阔叶林，以壳斗科的常绿植物种类为建群种，海拔 800 m 以上以常绿落叶阔叶混交林、山地针叶—阔叶混交林、高山草甸为主。非地带性植被主要是藻类和马来眼子菜构成的水生植物群落与禾本科、莎草科和蓼科等湿生草本植物群落，2 种植物群落呈现季节性交替（谢振东等，2006）。

2 材料与方法

2.1 样品采集与植硅体提取

鄱阳湖 ZK01 取样钻孔位于东经 116°8.43′、北纬 29°1.97′（图 1）。钻孔取样深度 867 cm，其中 867～546 cm 沉积物主要是细砂和粉质黏土，夹有

植物碎屑，底层为砂砾石层；孔深 108～546 cm 中存在 3 个完整的湖进湖退旋回，主要由淤泥质黏土和粉质黏土、细粉砂所构成；孔深 0～120 cm 主要为含有植物根系的粉砂（马振兴等，2003）。本研究所使用的样品为保存至中国地质大学（北京）的鄱阳湖 ZK01 钻孔中上部分，主要对孔深 10～738 cm 采集的 121 件植硅体样品进行研究。其主要岩性描述如下：706～738 cm 为灰色含植物碎屑泥质粉砂；586～706 cm 为灰色细砂，含少量泥质团块；546～586 cm 为青灰色粉砂质泥；437～546 cm 为青灰色淤泥；413～437 cm 为黄褐色泥；386～413 cm 为青灰色粗粉砂；291～386 cm 为青灰色淤泥；228～291 cm 为黄褐色粉砂质泥；128～228 cm 为青灰色淤泥；108～128 cm 为黄褐色粉砂质泥；35～108 cm 为黄褐色粉砂质泥、细粉砂；10～35 cm 为浅黄色粉砂质泥（谢振东等，2006）。

样品处理在中国地质大学（武汉）地球表层系统开放研究实验室完成。平均采样间距为 2.5 cm，局部样品段有缺失，因此本研究根据样品量进行了适当的合并。将经过烘干处理后的沉积物样品放置于 15 mL 的 PVC 试管之中，然后加入浓度 10%HCL 溶液去除沉积物样品中的碳酸盐，用蒸馏水清洗后加入浓度 30% H_2O_2 去除有机质并用纯水清洗。处理后将样品用 2.4 g/mL 的重液浮选，纯水洗至中性。植硅体鉴定在 Olympus BX50 光学显微镜下进行。

2.2　年代测定与数据分析

沉积物定年是研究古环境演变的一个重要基础之一。本研究所使用的鄱阳湖 ZK01 钻孔样品的年代数据结果引自马振兴等（2004）和 Huang 等（2018）的研究，显示 738～10 cm 沉积柱的年龄应在 5700～50 a BP 之间。

沉积物中植硅体组合研究对于重建全新世古植被、古环境与古气候变迁具有重要意义。因此通过分析不同种类植硅体的比例，可以明确不同种类植硅体的数量变化，以及植硅体组成的改变，具体计算公式为：$p=n/s\times100\%$。其中：p 为各形态植硅体的数目百分数，n 为各形态植硅体数目，s 为植硅体总数（张楷婧等，2017）。

植硅体在全新世古气候研究中运用广泛，其中温暖指数 I_w（Warmth Index）是最简便和普遍使用的计量方法之一（王伟铭等，2003）。一些具有气候指示意义的植物，可以形成相应的环境指示型植硅体；由此不同植硅体种类能反映气候冷暖等状况（郭梅娥等，2012）。王伟铭等（2003）分析了植物不同光合作用途径和现代表土植硅体类型分布规律，将禾本科植硅体的主要类型分为 2 组，即以棒型、狐茅型、尖型、帽型、齿型等为代表的示冷型植硅体和以黍型、虎尾草型、扇型、鞍型、方型、哑铃型、十字型、多铃型等为代表的示暖型植硅体，建立了温暖指数（I_w）= 示暖型植硅体/（示暖型植硅体+示冷型植硅体），反映了植硅体组合与温度之间的关联性。

主成分分析（PCA）能通过数学方法将多个相关的原始变量归纳为少数几个独立的新变量，更合理地解释原始数据中的主要因素，简化变量结构

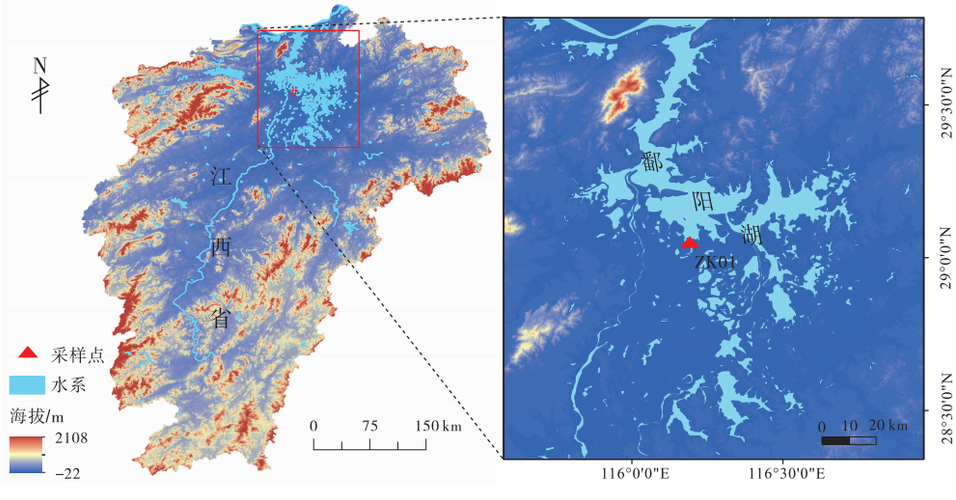


图 1　江西鄱阳湖采样点位置

Fig. 1　Location of sampling point in Poyang Lake, Jiangxi Province

（余金生和李裕伟，1985）。本研究采用 SPSS 数据分析软件对植硅体变量组合进行研究，试图用线性组合的少数几个理论变量（公因子）代替原来的多个实际变量。

3 结果

3.1 鄱阳湖 ZK01 钻孔主要植硅体类型及温暖指数的建立

在 10~738 cm 钻孔的 121 个样品中发现了数量较多的植硅体，共计 16 余种。根据王永吉和吕厚远（1993）的分类标准，经形态鉴定，显示样品中的植硅体主要来源于禾本科植物，主要类型有方型、长方型、扇型、鞍型、哑铃型、齿型、帽型、平滑棒型、边刺棒型、短尖型、长尖型、十字型植硅体等，并存在少量木本科植物，如纺锤型、薄板型、椭圆型等，还存在部分三棱柱型和不规则型植硅体。

根据王伟铭等（2003）对植硅体的示暖型和示冷型分类，从鄱阳湖 ZK01 钻孔的植硅体中选取明确指示意义的类型，示暖型主要有方型、长方型、扇型、鞍型、哑铃型、十字型；示冷型主要有齿型、帽型、平滑棒型、边刺棒型、短尖型、长尖型；基于此，建立了相应的温暖指数曲线（图 2）。

3.2 主成分分析结果

对鄱阳湖 ZK01 钻孔的植硅体记录分析的过程中，剔除了含量微小的变量，对环境指示意义较为明显的植硅体类型进行主成分分析，获得了 3 个主成分，分别解释了植硅体变化的 35%、14% 和 12%，累计解释量 61%，以第一轴（PC1）累计解释量占主导。王永吉和吕厚远（1993）通过对中国表土植硅体的研究，发现哑铃型植硅体主要分布在较为干旱的环境中。齿型、边刺棒型等植硅体多反映较寒冷干旱的环境（张新荣等，2005）；在温暖、湿润的气候区主要分布方型和扇型植硅体（王丹等，2017）。如图 3 所示，观察发现第一主因子 PC1 载荷图的正方向上多为哑铃型、齿型、边刺棒型等反映干旱环境的植硅体，负方向上则多为方型、长方型、扇型等反映湿润环境的植硅体，由此认为 PC1 对环境干湿变化的反应较为灵敏，可将第一主因子 PC1 认定为干湿因子。对 PC1 进一步分析可以得到第一主成分得分变化，数值越高指示该时期气候环境越干旱（图 2）。由于植硅体鉴定时未特别区分长鞍型和短鞍型植硅体，考虑到两者对干湿环境指示意义的不同，因此计算第一主成分得分时未将鞍型植硅体纳入指标计算。

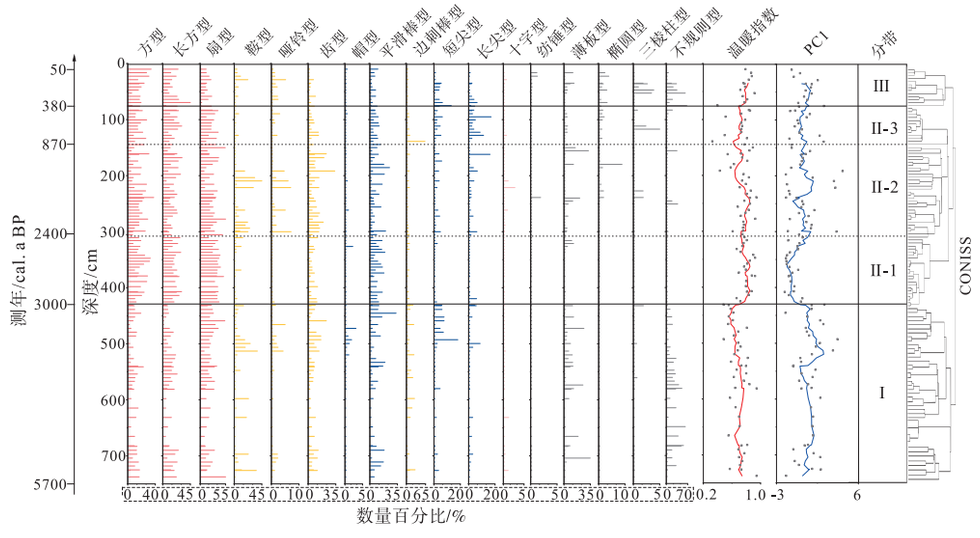


图 2 鄱阳湖 ZK01 钻孔植硅体百分比、温暖指数（5 点移动平均值，红线）、指示干旱程度的主成分 PC1 得分（5 点移动平均值，蓝线）及 CONISS 聚类分析树状图

Fig. 2 Percentage diagram of phytoliths from Poyang Lake ZK01 core, Warmth Index (5-point moving average, red line), changes in main factor PC1 score curve indicating drought severity (5-point moving average, blue line) and a dendrogram of CONISS cluster analysis

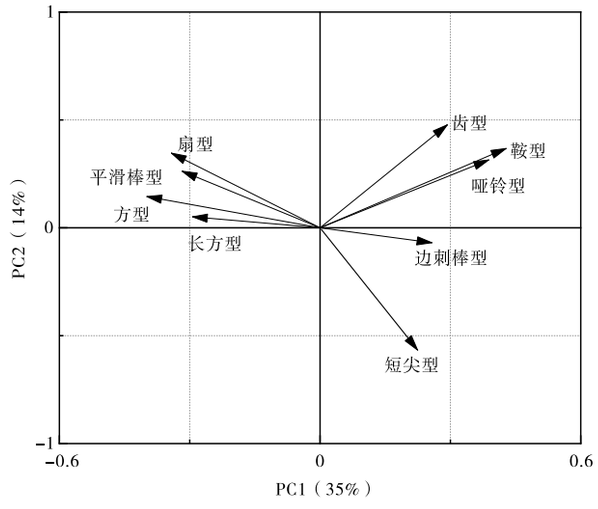


图 3　鄱阳湖植硅体主成分分析结果

Fig. 3　PCA results for phytolith data from Poyang Lake

3.3　植硅体组合带划分

根据各个类型植硅体数量百分比变化、主成分分析后得到的干旱程度变化和温暖指数的变化特征，结合 CONISS 聚类分析结果，将植硅体组合划分以下为 3 个组合带(图 2)。

带Ⅰ(5700~3000 a BP，738~425 cm)：植硅体整体数量偏少，4000 a BP(665 cm)以前主要植硅体类型为扇型(约 16.2%)、长方型(约 14.9%)、不规则型(约 20%)等。4000 a BP(665 cm)左右，大部分植硅体缺失；4000 ~ 3400 a BP(665 ~ 533 cm)期间主要植硅体类型为扇型(约 21.4%)、长方型(约 13.2%)、不规则型(约 22.6%)等。3400~3000 a BP(533~425 cm)期间长方型植硅体数量百分比降低至约 10.2%，主要植硅体类型为哑铃型(约 10.3%)、平滑棒型(约 7.7%)、齿型(约 8.1%)等。

带Ⅱ：年龄为 3000~380 a BP，深度为 425~75 cm，具体又可分为 3 个亚带：

带Ⅱ-1(3000~2400 a BP，425~300 cm)：主要植硅体类型为扇型(约 30.4%)、长方型(约 18.1%)，哑铃型、齿型较少；2400 a BP(300 cm)左右，方型、长方型植硅体数量百分比减少，主要植硅体为哑铃型(约 14.7%)、齿型(约 9.3%)、平滑棒型(约 7.3%)。

带Ⅱ-2(2400~870 a BP，300~150 cm)：总体上以方型(约 14.6%)、长方型(约 15.1%)、扇型(约 24%)为主，1800 a BP(221 cm)左右这些类型明显减少，变成以哑铃型(约 28.7%)、齿型(约 15.8%)等植硅体为主。

带Ⅱ-3(870~380 a BP，150~75 cm)：主要植硅体类型为方型(约 15.8%)、长方型(约 18.1%)、扇型(约 26.5%)。700 a BP(134 cm)左右，这些类型植硅体减少，而边刺棒型数量百分比增加到 63%。

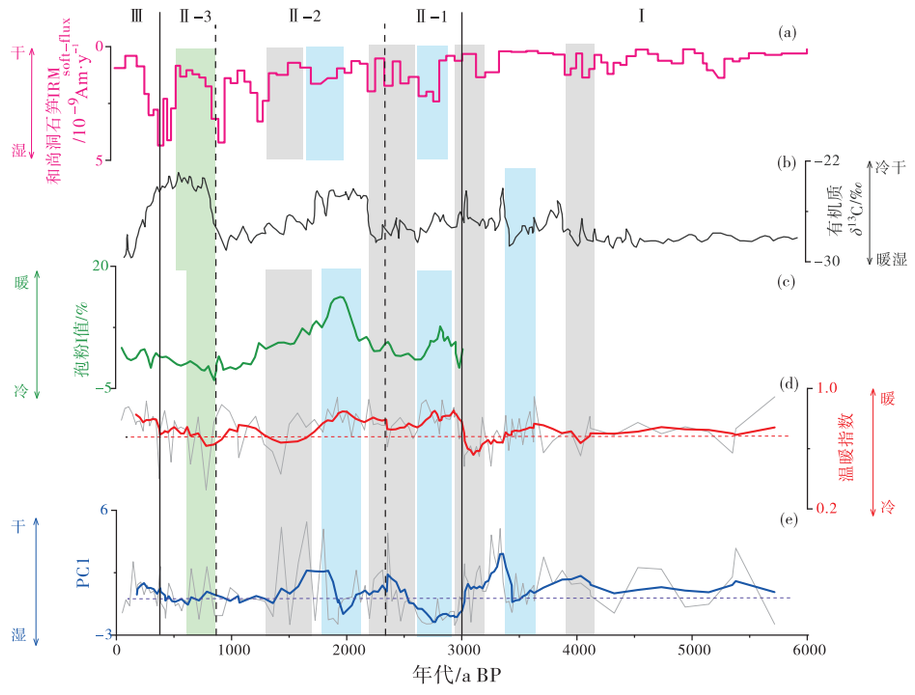
带Ⅲ(380~50 a BP，深度为 75~10 cm)：主要植硅体类型为方型(约 22.5%)、长方型(约 19%)、扇型(约 18%)，鞍型、哑铃型等植硅体数量百分比也相对有所增加。

4　讨论

4.1　鄱阳湖地区近 5700 年以来的气候环境演化历史

对鄱阳湖地区的植硅体记录分析，可以发现近 5700 年以来该地区经历了 3 个主要的气候阶段(图 4)。

带Ⅰ(5700~3000 a BP)大部分处于全新世大暖期(施雅风等，1992)。期间示暖型植硅体占比较大，反映出相对温暖的气候特征，图 4-b 和 4-d 中，植硅体温暖指数、有机质$\delta^{13}C$变化也指示出气候偏暖(马振兴等，2004)；图 4-e 中 PC1 变化反映出鄱阳湖地区此时期气候偏干的特点，如图 4-a 所示，在反映中全新世以来长江中游降雨量变化的湖北和尚洞石笋软磁组分通量($IRM_{soft\text{-}flux}$)记录中也反映出了中全新世干旱的特点(Zhu *et al.*, 2017)，与前人研究得到的长江中下游全新世中期干旱研究结果相一致(Liu *et al.*, 2015)。总体来说，此时期鄱阳湖地区气候波动小，气候较暖干。此时鄱阳湖沉积物有机质$\delta^{13}C$指示出偏湿的环境特点，可能是由于鄱阳湖植硅体记录主要反映的是禾本科植物的变化，而有机质$\delta^{13}C$来源更复杂与广泛(王秋良等，2003)，因此两者反映的环境意义存在一定差异。图 4 中有机质和植硅体记录部分时期对应较差可能是同一原因导致。如图 4-c 所示，此阶段鄱阳湖地区同一钻孔缺乏孢粉记录，同为生物指标的植硅体起到了重要的补充作用。相对于孢粉来说，植硅体更易保存，且植硅体属于原地沉积，能较好地反映当地植被结构的演化过程，通常比孢粉提供的



a—和尚洞石笋 $IRM_{soft\text{-}flux}$（Zhu *et al.*, 2017）；b—鄱阳湖沉积物有机质碳同位素曲线（马振兴等，2004）；c—孢粉Ⅰ值变化曲线（孢粉Ⅰ值：代表温暖气候的亚热带乔木花粉和代表寒冷气候的山地针叶林植物花粉百分含量之间差值；谢振东等，2006）；d—温暖指数（5 点移动平均值，红线）；e—指示干旱程度的主成分 PC1 得分（5 点移动平均值，蓝线。虚线表示平均值；灰色矩形代表干旱期；蓝色矩形代表湿润期；灰绿色代表小冰期

图 4 鄱阳湖植硅体记录与其他记录的对比

Fig. 4 Comparison of phytolith records in Poyang Lake with other records

植被信息更可靠（张新荣等，2005）。

4000 a BP（650 cm）左右，植硅体数量总体明显减少，温暖指数相对出现低值，干旱程度出现相对高值，指示出一段寒冷干旱期，鄱阳湖地区出现第 1 次相对干旱期；鄱阳湖沉积物中细砂含量逐渐增高，也反映了沉积环境有所动荡、水体范围缩小特点（马振兴等，2004）。此后指示暖湿气候的植硅体数量百分比明显增加，温暖指数曲线有所上升，反映干旱程度的 PC1 呈现出下降趋势，沉积物中粉质黏土和淤泥质黏土增多，反映出静水环境开阔湖盆相沉积，均说明气候有所转暖、湿润程度加深，鄱阳湖地区出现第 1 次相对湿润期；但在和尚洞 $IRM_{soft\text{-}flux}$ 中没有识别出该湿润期（Zhu *et al.*, 2017），可能是区域环境或代用指标差异造成。3400 a BP 后温暖指数呈下降趋势，干旱程度则上升，气候朝着冷干趋势发展，有机质 $\delta^{13}C$ 及和尚洞石笋 $IRM_{soft\text{-}flux}$ 变化也存在类似特点（图 4-b，4-c）。此时沉积物主要由黏土、细砂组成，反映湖退型沉积，指示湖盆萎缩，鄱阳湖地区出现第 2 次相对干旱期。

带Ⅱ（3000 ~ 380 a BP）处于晚全新世期间，植硅体的温暖指数和 PC1 干旱程度等变化显示出鄱阳湖地区晚全新世气候波动明显，具体可分为以下 3 个阶段：

带Ⅱ-1（3000 ~ 2400 a BP）：3000 a BP 之前暖型植硅体数量百分比相对较小，而此后明显变大；综合植硅体 PC1 和温暖指数变化，可以发现气候朝着暖湿方向变化；沉积物主要为青灰色淤泥质黏土，反映静水环境开阔湖盆相沉积（马振兴等，2004）。以上指标共同反映鄱阳湖地区出现第 2 次相对湿润期，湖北和尚洞石笋 $IRM_{soft\text{-}flux}$ 也指示出相同变化（Zhu *et al.*, 2017）。此时湿润期的环境条件与大九湖泥炭地需氧类藿烷积累速率记录的当地高水位非常一致（Xie *et al.*, 2013）。鄱阳湖地区出现的第 2 次相对干旱期和湿润期，在鄱阳湖沉积物的化学风化指标变化中也有所体现（Huang *et al.*, 2018）。2400 a BP 左右示暖型植硅体数量百分比有所减小，温暖指数相对较低，PC1 出现明显

峰值，反映干旱期的出现，指示鄱阳湖地区的第 3 次相对干旱期；鄱阳湖沉积物有机质δ^{13}C值出现一个小峰值，反映气候较冷干（马振兴等，2004）；沉积物以黄褐色粉砂质黏土为主，属湖退型沉积，指示湖盆有所萎缩；和尚洞石笋 $IRM_{soft\text{-}flux}$也出现了一个相对峰值，指示干旱环境；鄱阳湖沉积物的化学风化作用强度也迅速减弱，这可能是由于气候干旱所致（Huang *et al.*，2018）；在同一时期，南岭大坪沼泽δ^{13}C记录也反映出气候干旱特点（Zhong *et al.*，2014）。如图 4-c 所示，此阶段出现的湿润期和干旱期在鄱阳湖地区同一钻孔的孢粉记录中也有体现（谢振东等，2006）。

带Ⅱ-2（2400～870 a BP）：植硅体记录显示出此时期总体气候较暖湿，期间出现 1 次干旱事件。2000 a BP 左右植硅体 PC1 所反映的干旱程度有所下降，指示鄱阳湖地区第 3 次湿润期的出现，此时温暖指数也有所增加，反映暖湿环境；如图 4-c 所示，同一钻孔的鄱阳湖孢粉记录也显示相似环境特点（谢振东等，2006）；和尚洞石笋 $IRM_{soft\text{-}flux}$有所下降反映偏湿环境（Zhu *et al.*，2017），但年代和植硅体记录有一定差异，可能是因为所采用代用指标不同造成的。1800 a BP 左右 PC1 出现明显峰值，指示鄱阳湖地区第 4 次干旱期的出现，这样的干旱环境也反映在同一钻孔的孢粉记录及和尚洞石笋 $IRM_{soft\text{-}flux}$的变化中，1800 a BP 左右温暖指数呈现低值，各指标的变化共同反映出了冷干环境。此后干旱程度下降，温暖指数有所回升，气候再次呈现出了较暖湿特点。

带Ⅱ-3（870～380 a BP）：气候整体上延续上一阶段较暖湿的特点，但 700 a BP 左右温暖指数出现相对低值和干旱程度出现相对高值，反映出干冷事件的存在，该时期正好处于 Bond 等（1997）指出小冰期（LIA）期间，因此推测此时鄱阳湖可能处于小冰期，其开始时间大致在 700 a BP（1250 AD）；同一钻孔的孢粉记录也识别出小冰期的存在（谢振东等，2006），其他钻孔的孢粉记录也显示此时主要建林种为松、桦、榆等，气候较凉（吴艳宏等，1997）；小冰期的出现在有机质δ^{13}C值的明显高值及和尚洞石笋 $IRM_{soft\text{-}flux}$变化中也有所体现（马振兴等，2004；Zhu *et al.*，2017），其波动幅度相对植硅体记录更大，可能是由于采样密度的不同所致。

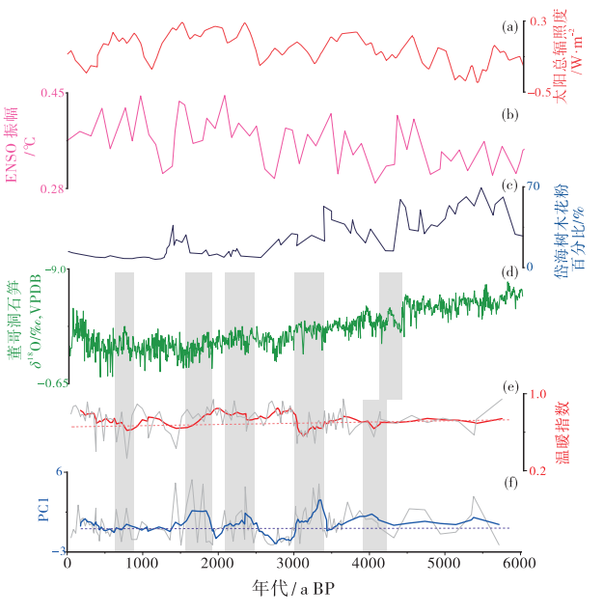
带Ⅲ（380～50 a BP）：近 300 年左右气候温暖程度进一步加深，可能反映出了人类活动对自然环境的影响加剧。此阶段温暖指数和干旱程度波动幅度相对较小，且呈现小幅度上升趋势，反映鄱阳湖地区气候未来可能会向暖干环境发展，这样的干旱趋势也反映在同一钻孔的孢粉记录及和尚洞石笋 $IRM_{soft\text{-}flux}$的变化中（谢振东等，2006；Zhu *et al.*，2017）。

综上，近 5700 年以来鄱阳湖地区有着明显的气候干湿交替特点，前人研究表明这样的特点自中更新世以来便存在（凌超豪等，2015）。

4.2　鄱阳湖地区近 5700 年以来的气候驱动机制与区域对比

已有研究指出，东亚夏季风强度与长江中下游地区水汽变化呈负相关关系，东亚夏季风增强将导致该地区降水的减少（Zhao *et al.*，2007；Ding *et al.*，2008）。鄱阳湖位于长江中下游地区，受东亚夏季风的强烈影响。在董哥洞石笋 δ^{18}O 记录所反映的东亚季风变化（图 5-d）中可以发现，当石笋 δ^{18}O 偏负时，指示东亚夏季风增强（Wang *et al.*，2005），此时鄱阳湖地区气候相对偏干。东亚夏季风通常以盛行低对流层南风为特征，中国东部的季风降水出现在北太平洋副热带高压西北侧的中国梅雨锋面带（Zhou *et al.*，2011；Liu *et al.*，2014b）。当东亚夏季风环流较强时，盛行的南风/副热带高压系统在中国东部偏强，并向北推进到较高纬度，加强了水汽输送，并使水汽锋面深入中国北部，由此导致北方降水偏多，梅雨区夏季降水相对减少。因此东亚夏季风加强时，位于长江中下游地区的鄱阳湖地区气候变干，减弱时则气候变得湿润。

对中国东部近千年降水资料研究发现，长江中下游地区的气候干湿变化和华北的气候变化呈现出反位相关系（提汝媛等，2009）。对比中全新世以来鄱阳湖植硅体干湿程度记录和反映华北地区降水变化的岱海树木花粉记录（图 5-c）（Xiao *et al.*，2004），可以发现 2 个地区之间的气候干湿环境呈现相反变化，这和近千年的研究结果相似。已有研究指出中全新世长江中下游地区呈现较干旱气候条件，这样的环境特点与中国北部记录的湿润中全新世呈现相反变化（Wang *et al.*，2014；Chen *et al.*，2015b）。这是由于在全新世中期，东西向表层海



a—太阳总辐照度变化（Steinhilber *et al.*, 2009）；b—基于中东太平洋观测数据模拟的 ENSO 振幅记录（在 Niño3.4 区海表温度年际变化（1.5~7 年周期）的标准差，以 100 年进行滑动平均；Liu *et al.*, 2014a）；c—华北岱海的树木花粉记录（Xiao *et al.*, 2004）；d—东亚季风区的董哥洞石笋 $\delta^{18}O$ 记录（Wang *et al.*, 2005）；e—温暖指数（5 点移动平均值，红线）；f—指示干旱程度的主成分 PC1 得分（5 点移动平均值，蓝线）。虚线表示平均值；灰色矩形代表植硅体记录所反映出的干旱时期

图 5 鄱阳湖植硅体记录的区域对比

Fig. 5 Regional comparison of phytolith records in Poyang Lake

温梯度较强，副热带高压带平均位置向北、向西移动，长江中下游地区以下降气流为主，气候较为干旱；而北方以上升气流为主，气候较为湿润。以上说明 2 个地区的反相位关系自中全新世以来就已存在。

太阳总辐照度直接影响地球能量平衡，从而导致气候波动（Engels and van Geel, 2012）。当太阳辐照度降低时会削弱亚洲夏季风（Wang *et al.*, 2005）。将鄱阳湖植硅体记录和代表季风变化的董哥洞石笋 $\delta^{18}O$（图 5-d）及太阳总辐照强度变化（图 5-a）对比分析发现，当太阳总辐照度所指示的太阳活动相对减弱时，季风强度较弱，鄱阳湖地区气候处于相对湿润阶段，在百年尺度上太阳活动驱动的季风强度变化显著影响鄱阳湖地区的气候，这与邻近地区的升金湖研究结果（胡洁等，2022）也相一致。

海—气的相互作用是影响气候变化的重要因子之一，研究指出，西太平洋副热带高压（WPSH）的强度变化会使得东亚季风受到厄尔尼诺—南方涛动（ENSO）的影响（Jiang *et al.*, 2006）。随着厄尔尼诺增强，西太平洋暖池中的海温低于正常值，沃克环流减弱，可能导致 WPSH 增强并向西南扩展，使得东亚夏季风偏弱。在这种情况下，季风雨带将在长江沿岸停留更长时间，而不是迅速北移（Ding *et al.*, 2008），导致长江中下游地区降水较常年增多，而北方地区降水减少，形成了“南涝北旱”的降水格局；反之，拉尼娜增强，西太平洋暖池中的海温高于正常值，沃克环流增强，WPSH 减弱且向东北退缩，夏季风偏强，季风雨带推进至更偏北的位置，从而造成了北方地区降水偏多，长江流域降水偏少，即“南旱北涝”的降水分布格局（杨保和谭明，2009；Xue and Zhao, 2017；Lu *et al.*, 2019）。

前人研究指出近千年以来鄱阳湖地区的水文气候变化响应了 ENSO 活动驱动的季风降水变化（Gu *et al.*, 2022）；历史上的旱涝记录（公元 1470—2003 年）也证实了厄尔尼诺现象与长江中下游流域的洪水事件密切相关，拉尼娜现象与干旱事件相关（Jiang *et al.*, 2006；Zhang *et al.*, 2007）。而对于更长时间尺度的研究来说，结果有所不同。对比鄱阳湖植硅体干湿记录和基于中东太平洋观测数据模拟的 ENSO 振幅记录（图 5-b；Liu *et al.*, 2014a）（该记录反映的是 Niño3.4 指数的标准差，当 Niño3.4 指数的标准差较大时，指示 ENSO 事件变得更加频繁或强烈），可以发现当 ENSO 振幅增加，指示 ENSO 事件的强度增加时期，与鄱阳湖植硅体指标所指示的湿润期大体一致，ENSO 事件的强度减弱时期则对应着鄱阳湖气候干旱期。部分时期记录对应有所差异，可能是由于年代误差造成。ENSO 振幅记录所反映的 ENSO 事件的强度变化可能代表处于正相位或负相位的强度变化，即代表厄尔尼诺或拉尼娜的强度变化。这说明对于中全新世以来的鄱阳湖地区气候变化，ENSO 活动对其影响可能与对近千年气候变化的影响不同，未来需要更高精度的 ENSO 记录进行对比探究。鄱阳湖地区植硅体记录显示出晚全新世气候波动明显、出现了多次气候干湿变化，而中全新世鄱阳湖地区气候波动较为平稳。这与前人在对全新世亚洲季风区极端水文气候事件及其潜在机制的研究中得到的结论相印

证，即全新世早期和晚期极端水文事件频繁发生，而全新世中期较少，热带印太地区海洋—大气相互作用对亚洲季风区的极端水文气候事件具有重要控制作用（Zhang *et al.*, 2023）。综上可知，ENSO 活动对近 5700 年来鄱阳湖地区的气候变化与水文事件有显著影响。

5　结论

依据鄱阳湖南部 ZK01 钻孔植硅体组合变化、温暖指数和代表干旱程度的主成分 PC1 变化，发现近 5700 年以来鄱阳湖地区主要经历了以下气候演化过程：较暖干—冷干—较暖湿—冷干—暖湿—较冷干—暖湿—冷干—较暖湿—较暖干，期间出现了明显的干旱期与湿润期交替。4.2 ka 事件和小冰期等全球性事件在植硅体记录中均有所体现，鄱阳湖地区小冰期主要开始于 700 a BP。植硅体记录与同地区的其他研究结果也较为吻合，在缺乏孢粉资料的时期，植硅体较好地识别出了该时期的气候变化特征，突出了植硅体在反演古气候、古环境方面的优势。将植硅体指标分别与反映太阳活动和东亚夏季风变化的指标进行对比，发现太阳活动对东亚季风具有控制作用，从而影响鄱阳湖地区的气候变化，东亚夏季风较强时，鄱阳湖地区较为干旱，而北方地区的气候指标则显示出相反的环境特征，反映出鄱阳湖地区气候变化和北方地区气候变化的反位相关系，这和中国东部季风区南—北偶极型的降水空间格局相一致。ENSO 活动也影响着鄱阳湖地区的气候变化，ENSO 事件强度增加时期对应着鄱阳湖地区气候偏湿润时期，而 ENSO 事件强度变化可能代表厄尔尼诺或拉尼娜的强度变化，与目前近千年来厄尔尼诺增强使得东亚夏季风减弱进而导致鄱阳湖地区气候偏湿的研究结果有所不同。此外，植硅体记录显示全新世中期气候波动相对平缓，而全新世晚期气候指标波动明显，与 ENSO 记录有明显的相似性，这一定程度上显示出了海—气作用对该地区气候变化的影响。

利用植硅体作为气候代用指标，可以较好地重建鄱阳湖地区近 5700 年气候演化各个阶段的特征。植硅体记录对气候事件的识别也相对准确，可为相关区域的古气候研究和对比提供借鉴，丰富了该区域研究成果，显示出植硅体分析方法在古气候研究中具有广泛的应用潜力。

参考文献（References）

曹思佳. 2023. 鄱阳湖典型洪泛区地下水—湖水转化及对变化环境的响应. 华北水利水电大学硕士学位论文：1-76. [Cao S J. 2023. Groundwater-lake interactions and associated responses to changing environment in the typical floodplain area of Poyang Lake. Masteral dissertation of North China University of Water Resources and Electric Power: 1-76]

程曦，施健. 2024. 全新世东亚夏季风降水穿时性的模拟研究. 第四纪研究，44(2)：593-604. [Cheng X, Shi J. 2024. Simulation of the time-transgressive nature of East Asian summer monsoon precipitation over the Holocene. Quaternary Sciences, 44(2): 593-604]

范斌，许世远，俞立中，蒋辉，冉莉华. 2006. 巢湖沉积植硅体组合及中全新世以来的环境演变. 湖泊科学，18(3)：273-279. [Fan B, Xu S Y, Yu L Z, Jiang H, Ran L H. 2006. Phytolith in the sediment of the Lake Chaohu since Middle Holocene and its paleoenvironmental implications. Journal of the Lake Sciences, 18(3): 273-279]

郭梅娥，介冬梅，葛勇，王婷，李荣麟，王刘奎，王培明，刘洪妍，刘利丹，李楠楠. 2012. 长白山区湿地表土植硅体特征及其环境意义. 古地理学报，14(5)：639-650. [Guo M E, Jie D M, Ge Y, Wang T, Li R L, Wang L K, Wang P M, Liu H Y, Liu L D, Li N N. 2012. Phytolith characteristics and their significance of environment in surface soils from wetlands of Changbai Shan area. Journal of Palaeogeography (Chinese Edition), 14(5): 639-650]

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]

胡克龙，计勇，刘星辰，史艳萍，蔡高堂，张洁. 2023. 鄱阳湖南矶山湿地植硅体沉积分布特征及气候反演. 江西科学，41(1)：80-86. [Hu K L, Ji Y, Liu X C, Shi Y P, Cai G T, Zhang J. 2023. Phytolith deposition distribution and climate inversion in Nanjishan wetland of Poyang Lake. Jiangxi Science, 41(1): 80-86]

黄秋萍，黄国勤，刘隆旺. 2006. 鄱阳湖生态环境现状、问题及可持续发展对策. 江西科学，24(6)：517-521，544. [Huang Q P, Huang G Q, Liu L W. 2006. Present situation and problems on entironment of Poyang Lake and measures for its sustaining development. Jiangxi Science, 24(6): 517-521, 544]

李长安，顾延生. 1997. 网纹红土中的植硅石组合及其环境意义的初步研究. 地球科学，22(2)：195-198. [Li C A, Gu Y S. 1997. A priliminary study on phytolith assemblages and its paleoenvironmental indication of the vermicular red earth. Earth Science, 22(2): 195-198]

凌超豪，龙进，贾玉连，洪祎君，徐传奇，王鹏岭. 2015. 赣北鄱阳湖地区土塘剖面第四纪红土地球化学特征及古气候意义. 古地理学报，17(5)：699-708. [Ling C H, Long J, Jia Y L, Hong Y J, Xu C Q, Wang P L. 2015. Geochemical characteristics and palaeoclimate

significance of the Quaternary laterite of Tutan section in Poyang Lake region, northern Jiangxi Province. Journal of Palaeogeography (Chinese Edition), 17(5): 699-708]

刘嘉康. 2024. 松嫩平原西侧湖泊底泥有机质与植硅体耦合性分析. 吉林大学硕士学位论文: 1-125. [Liu J K. 2024. Coupling analysis of the organic matter and phytolith assemblages from the lacustrine sediment of the west Songnen Plain, NE China. Masteral dissertation of Jilin University: 1-125]

马超, 顾延生, 刘春根, 左祖发. 2018. 鄱阳湖东南部地区全新统植硅体组合特征与古环境分析. 华东地质, 39(3): 187-193. [Ma C, Gu Y S, Liu C G, Zuo Z F. 2018. Characteristics of Holocene phytolith assemblage in the southeast of Poyang Lake and its paleoenvironmental implications. Esat China Geology, 39(3): 187-193]

马振兴, 蒋玉珍, 魏源, 李均辉, 李长安. 2003. 鄱阳湖组(第四系)的修订及特征. 地层学杂志, 27(3): 212-215. [Ma Z X, Jiang Y Z, Wei Y, Li J H, Li C A. 2003. Revision and characters of the Poyanghu Formation (Quaternary). Journal of Stratigraphy, 27(3): 212-215]

马振兴, 黄俊华, 魏源, 李均辉, 胡超涌. 2004. 鄱阳湖沉积物近 8 ka 来有机质碳同位素记录及其古气候变化特征. 地球化学, 33(3): 279-285. [Ma Z X, Huang J H, Wei Y, Li J H, Hu C Y. 2004. Organic carbon isotope records of the Poyang Lake sediments and their implications for the paleoclimate during the last 8 ka. Geochimica, 33(3): 279-285]

庞有智, 杨明生, 张虎才, 邓财, 唐领余. 2023. 鄱阳湖地区过去 2160 年孢粉记录的植被变化及影响因素. 第四纪研究, 43(5): 1225-1240. [Pang Y Z, Yang M S, Zhang H C, Deng C, Tang L Y. 2023. Vegetation change and its driving factors recorded by pollen assemblage from Lake Poyang over the past 2160 years. Quaternary Sciences, 43(5): 1225-1240]

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 Science, 21(3): 307-313]

沈吉, 王苏民, 薛滨, 吴敬禄. 2010. 湖泊沉积与环境演化. 北京: 科学出版社, 62-92. [Shen J, Wang S M, Xue B, Wu J L. 2010. Lake Sedimentation and Environmental Evolution. Beijing: Science Press, 62-92]

施雅风, 孔昭宸, 王苏民, 唐领余, 王富葆, 姚檀栋, 赵希涛, 张丕远, 施少华. 1992. 中国全新世大暖期的气候波动与重要事件. 中国科学(B 辑:化学生命科学地学), 22(12): 1300-1308. [Shi Y F, Kong Z C, Wang S M, Tang L Y, Wang F B, Yao T D, Zhao X T, Zhang P Y, Shi S H. 1992. Climatic fluctuation and important events during the Holocene Megathermal in China. Science in China(Series B), 22(12): 1300-1308]

孙芳蒂, 马荣华. 2020. 鄱阳湖水文特征动态变化遥感监测. 地理学报, 75(3): 544-557. [Sun F D, Ma R H. 2020. Hydrologic changes of Poyang Lake based on radar altimeter and optical sensor. Acta Geographica Sinica, 75(3): 544-557]

提汝媛, 顾亚进, 刘健, 况雪源, 王红丽. 2009. 近千年中国东部夏季降水的模拟研究. 第四纪研究, 29(6): 1104-1114. [Ti R Y, Gu Y J, Liu J, Kuang X Y, Wang H L. 2009. A modeling study on summer precipitation of the last 1000 years in east China. Quaternary Sciences, 29(6): 1104-1114]

万智巍, 贾玉连, 章鸣, 洪祎君, 蒋梅鑫. 2018. 1470—2014 年鄱阳湖流域干湿变化与特征分析. 干旱区资源与环境, 32(6): 114-119. [Wan Z W, Jia Y L, Zhang M, Hong Y J, Jiang M X. 2018. Reconstruction and characteristic diagnosis of dry wet series in the Poyang lake basin from 1470 to 2104. Journal of Arid Land Resources and Environment, 32(6): 114-119]

王丹, 王奥博, 龙高飞, 李云, 蒲玉琳, 张世熔, 贾永霞, 叶春. 2017. 湿地生态系统中植硅体与植硅体碳的研究进展. 生态学杂志, 36(12): 3602-3609. [Wang D, Wang A B, Long G F, Li Y, Pu Y L, Zhang S R, Jia Y X, Ye C. 2017. Research advances of phytolith and phytolith-occluded-carbon in wetland ecosystems. Chinese Journal of Ecology, 36(12): 3602-3609]

王丽鑫, 代友旭, 王利鹏, 王庆同, 阎琨, 姜文钦. 2023. 新疆色帕巴依—柯坪地区中—晚更新世孢粉组合特征及其对古气候的指示. 中国地质, 50(4): 1268-1276. [Wang L X, Dai Y X, Wang L P, Wang Q T, Yan K, Jiang W Q. 2023. Characteristics and indication on palaeoclimate of sporopollen assemblages of Mid-to Late-Pleistocene in Sepabayi-Keping Area, Xinjiang. Geology in China, 50(4): 1268-1276]

王秋良, 谢远云, 梅惠. 2003. 湖泊沉积物中有机碳同位素特征及其古气候环境意义. 安全与环境工程, 10(4): 17-21. [Wang Q L, Xie Y Y, Mei H. 2003. The characteristics of compositions of the organic matter $\delta^{13}C$ in lake sediments and its paleoclimatic environmental significance. Safety and Environmental Engineering, 10(4): 17-21]

王伟铭, 虞子冶, 杨浩. 1997. 江西星子县第四纪红土层的植硅石, 孢粉研究及意义. 微体古生物学报, 14(1): 45-47, 49-52. [Wang W M, Yu Z Y, Yang H. 1997. A study on phytoliths and palynomorphs of quaternary red earth in Xingzi County, Jiangxi Province and its significance. Acta Micropalaeontologica Sinica, 14(1): 45-47, 49-52]

王伟铭, 刘金陵, 周晓丹. 2003. 南京直立人洞穴沉积的植硅体气候指数研究. 科学通报, 48(18): 2005-2009. [Wang W M, Liu J L, Zhou X D. 2003. Climate indexes of phytoliths from Homo erectus' cave deposits in Nanjing. Chinese Science Bulletin, 48(18): 2005-2009]

王永吉, 吕厚远. 1993. 植物硅酸体研究及应用. 北京: 海洋出版社, 1-228. [Wang Y J, Lü H Y. 1993. Phytolith Study and Its Application Contents. Beijing: China Ocean Press, 1-228]

王兆夺, 崔利芳, 邓利欢, 陈珂. 2020. 鄱阳湖口石钟山岩崖壁上记载的水位变化初探. 长江科学院院报, 37(9): 45-49. [Wang Z D, Cui L F, Deng L H, Chen K. 2020. Preliminary study on the change of water level recorded on the cliff of Shizhongshan rock in Poyang Lake. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 37(9): 45-49]

吴艳宏, 羊向东, 朱海虹. 1997. 鄱阳湖湖口地区 4500 年来孢粉组合及古气候变迁. 湖泊科学, 9(1): 29-34. [Wu Y H, Yang X D,

Zhu H H. 1997. Pollen assemblage and paleoclimatic change in Hukou area of Poyang lake for the past 4500 years. Journal of Lake Sciences,9(1): 29-34]

谢傲,罗伯良. 2023. 东亚夏季风指数分类与长江中游地区夏季降水的关系. 中低纬山地气象,47(1): 25-30. [Xie A, Luo B L. 2023. Relationship between east Asian summer monsoon classification and summer precipitation in middle reaches of the Yangtze River. Mid-Low Latitude Mountain Meteorology,47(1): 25-30]

谢振东,冯绍辉,黄文虹,罗音,冯昌,马振兴. 2006. 江西鄱阳湖区ZK01钻孔孢粉记录及其古环境信息. 资源调查与环境,27(1): 60-69. [Xie Z D,Feng S H,Huang W H,Luo Y,Feng C,Ma Z X. 2006. Sporopollen record of drilling hole ZK01 and its paleoenvironmental information in Poyang Lake area,Jiangxi. Resources Survey & Environment,27(1): 60-69]

杨保,谭明. 2009. 近千年东亚夏季风演变历史重建及与区域温湿变化关系的讨论. 第四纪研究,29(5): 880-887. [Yang B,Tan M. 2009. Variability of the east Asian summer monsoon and its relationship with regional temperature and moisture change during the last millennium. Quaternary Sciences,29(5): 880-887]

余金生,李裕伟. 1985. 地质因子分析. 北京: 地质出版社,114-120. [Yu J S,Li Y W. 1985. Geological Factor Analysis. Beijing: Geological Publishing House,114-120]

张楷婧,张鸿鹏,赵黎,朱清乔,介冬梅,刘洪妍,刘利丹,李楠楠,高桂在,高玉山,王晓蕊. 2017. 吉林省松原市不同品种玉米穗、叶植硅体形态组合特征研究. 微体古生物学报,34(2): 111-122. [Zhang K J,Zhang H P,Zhao L,Zhu Q Q,Jie D M,Liu H Y,Liu L D,Li N N,Gao G Z,Gao Y S,Wang X R. 2017. Research of phytolith assemblages in spikes and leaves of various maize in Songyuan city,Jilin Province,Northeast China. Acta Micropalaeontologica Sinica,34(2): 111-122]

张新荣,胡克,介冬梅,王东坡,刘莉莉. 2005. 泥炭沉积中植硅体对环境指示的意义: 以吉林敦化泥炭剖面为例. 吉林大学学报(地球科学版),35(6): 694-698. [Zhang X R,Hu K,Jie D M,Wang D P,Liu L L. 2005. Environment indication of phytolith in peat deposit: a case in the peat section of Dunhua,Jilin Province. Journal of Jilin University(Earth Science Edition),35(6): 694-698]

张振克,王苏民. 1999. 中国湖泊沉积记录的环境演变: 研究进展与展望. 地球科学进展,14(4): 417-422. [Zhang Z K,Wang S M. 1999. Advance and prospects of lake sediments and environmental changes study in China. Advances in Earth Science,14(4): 417-422]

赵平,周秀骥. 2006. 近40年中国东部降水持续时间和雨带移动的年代际变化. 应用气象学报,17(5): 548-556. [Zhao P,Zhou X J. 2006. Decadal variability of rainfall persistence time and rainbelt shift over Eastern China in recent 40 years. Journal of Applied Meteorological Science,17(5): 548-556]

Bond G,Showers W,Cheseby M,Lotti R,Almasi P,Demenocal P,Priore P,Cullen H,Hajdas I,Bonani G. 1997. A pervasive millennial-scale cycle in north Atlantic Holocene and glacial climates. Science,278(5341): 1257-1266.

Chen F H,Xu Q H,Chen J H,John B, Birks H,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. 2015a. East Asian summer monsoon precipitation variability since the last deglaciation. Scientific Reports,5: 11186.

Chen J H,Chen F H,Feng S,Huang W,Liu J B,Zhou A F. 2015b. Hydroclimatic changes in China and surroundings during the Medieval Climate Anomaly and Little Ice Age: spatial patterns and possible mechanisms. Quaternary Science Reviews,107: 98-111.

Chen W,Zhang R H,Wu R G,Wen Z P,Zhou L T,Wang L,Hu P,Ma T J,Piao J L,Song L,Wang Z B,Li J C,Gong H N,Huangfu J L,Liu Y. 2023. Recent advances in understanding multi-scale climate variability of the Asian monsoon. Advances in Atmospheric Sciences,40: 1429-1456.

Ding Y H,Wang Z Y,Sun Y. 2008. Inter-decadal variation of the summer precipitation in East China and its association with decreasing Asian summer monsoon. Part I: Observed evidences. International Journal of Climatology,28: 1139-1161.

Engels S,van Geel B. 2012. The effects of changing solar activity on climate: contributions from palaeoclimatological studies. Journal of Space Weather and Space Climate,2: A09.

Gu Y S,Liu H Y,Guan S,Qin Y M,Zheng M,Yu J X. 2018. Possible El Niño-Southern Oscillation-related lacustrine facies developed in southern Lake Poyang during the late Holocene: evidence from spore-pollen records. The Holocene,28(4): 503-512.

Gu Y S,Li Y N,Liu H Y,Liu X,Xie S C,Huang J H. 2022. A millennium ENSO-related droughts and floods occurrences documented by fossil phytoliths in core sediments of Poyang Lake,East China. Review of Palaeobotany and Palynology,305: 104731.

Huang C,Wei G J,Li W X,Liu Y. 2018. A geochemical record of the link between chemical weathering and the East Asian summer monsoon during the late Holocene preserved in lacustrine sediments from Poyang Lake,central China. Journal of Asian Earth Sciences,154: 17-25.

Jiang T,Zhang Q,Zhu D M,Wu Y J. 2006. Yangtze floods and droughts (China) and teleconnections with ENSO activities (1470-2003). Quaternary International,144: 29-37.

Liu J B,Chen J H,Zhang X J,Li Y,Rao Z G,Chen F H. 2015. Holocene East Asian summer monsoon records in northern China and their inconsistency with Chinese stalagmite $\delta^{18}O$ records. Earth-Science Reviews,148: 194-208.

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 Z Y,Lu Z Y,Wen X Y,Otto-Bliesner B L,Timmermann A,Cobb K M. 2014a. Evolution and forcing mechanisms of El Niño over the

past 21000 years. Nature,515(7528): 550-553.

Liu Z Y,Wen X Y,Brady E C,Otto-Bliesner B,Yu G,Lu H Y,Cheng H,Wang Y J,Zheng W P,Ding Y H,Edwards R L,Cheng J,Liu W,Yang H. 2014b. Chinese cave records and the East Asia Summer Monsoon. Quaternary Science Reviews,83: 115-128.

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.

Lu H Y,Wu N Q,Liu K B,Jiang H,Liu T S. 2007. Phytoliths as quantitative indicators for the reconstruction of past environmental conditions in China Ⅱ: palaeoenvironmental reconstruction in the Loess Plateau. Quaternary Science Reviews,26(5-6): 759-772.

Lü J M,Zhu C,Ju J,Lin X. 2014. Interdecadal variability in summer precipitation over East China during the past 100 Years and its possible causes. Chinese Journal of Atmospheric Sciences,38(4): 782-794.

Qader W,Mir S H,Meister J,Ahmad Dar R,Madella M,Rashid I. 2023. Sedimentological perspective on phytolith analysis in palaeoecological reconstruction. Earth-Science Reviews,244: 104549.

Steinhilber F,Beer J,Fröhlich C. 2009. Total solar irradiance during the Holocene. Geophysical Research Letters,36(19): L19704.

Wang H P,Chen J H,Zhang X J,Chen F H. 2014. Palaeosol development in the Chinese Loess Plateau as an indicator of the strength of the East Asian summer monsoon: evidence for a mid-Holocene maximum. Quaternary International,334-335: 155-164.

Wang Y J,Cheng H,Lawrence Edwards R,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.

Xiao J L,Xu Q H,Nakamura T,Yang X L,Liang W D,Inouchi Y. 2004. Holocene vegetation variation in the Daihai Lake region of north-central China: a direct indication of the Asian monsoon climatic history. Quaternary Science Reviews,23(14-15): 1669-1679.

Xie S C,Evershed R P,Huang X,Zhu Z M,Pancost R D,Meyers P A,Gong L F,Hu C Y,Huang J H,Zhang S H,Gu Y S,Zhu J Y. 2013. Concordant monsoon-driven postglacial hydrological changes in peat and stalagmite records and their impacts on prehistoric cultures in central China. Geology,41(8): 827-830.

Xu Y Y,Shen C M,Wang M,Meng H W,Sun Q F,Huang L P,Sun H L. 2024. Modern lacustrine phytoliths and their relationships with vegetation and climate in western Yunnan,SW China. Forests,15(7): 1163.

Xue F,Zhao J J. 2017. Intraseasonal variation of the East Asian summer monsoon in La Niña years. Atmospheric and Oceanic Science Letters,10(2): 156-161.

Zhang E L,Meng X Q,Ning D L,Shulmeister J,Sun W W,Zhang W F,Ni Z Y. 2023. Holocene extreme hydroclimate events in the Asian monsoon region were more frequent during cooler intervals. Communications Earth & Environment,4(1): 344.

Zhang Q,Xu C Y,Jiang T,Wu Y J. 2007. Possible influence of ENSO on annual maximum streamflow of the Yangtze River,China. Journal of Hydrology,333(2-4): 265-274.

Zhao P,Zhu Y N,Zhang R H. 2007. An Asian-Pacific teleconnection in summer tropospheric temperature and associated Asian climate variability. Climate Dynamics,29: 293-303.

Zhong W,Xue J B,Ouyang J,Cao J Y,Peng Z H. 2014. Evidence of late Holocene climate variability in the western Nanling Mountains,South China. Journal of Paleolimnology,52(1-2): 1-10.

Zhou X J,Zhao P,Liu G,Zhou T J. 2011. Characteristics of decadal-centennial-scale changes in East Asian summer monsoon circulation and precipitation during the Medieval Warm Period and Little Ice Age and in the present day. Chinese Science Bulletin,56: 3003-3011.

Zhu Q Z,Liu Y Z. 2023. The combined effect of multiple water vapor transport channels can better reflect the variability in summer precipitation over North China. Climate Dynamics,61(11): 5887-5904.

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)