

植硅体记录下的兴隆新石器时代遗址的气候和植被变化

Climate and Vegetation Changes at Xinglong Neolithic Site Recorded by Phytoliths

邱振威 庄丽娜 Qiu Zhenwei & Zhuang Lina

中国国家博物馆, 北京, 100006

内容提要:

植硅体分析在复原古人类生活环境和考古遗址气候特征方面发挥了重要作用。2022年, 中国国家博物馆组织并主导了对河北康保兴隆遗址南部自然沟的解剖与清理工作。为揭示遗址周边的植被景观与气候变化, 我们选取该自然沟的沉积剖面, 进行古环境替代指标分析。植硅体记录揭示, 自新仙女木事件结束以来, 遗址所在区域经历了多个气候阶段, 包括升温期、相对暖湿的温干期、迅速干凉化时期、干冷期及持续干冷期。在整体干冷化趋势下, 约10000-7000 cal. BP环境景观相对较好, 为先民提供了宜居的生存条件。很可能正是在这个时期, 兴隆先民择机断续利用此山间小盆地, 其西北依山、东南傍水的独特微观地貌为他们提供了理想的栖居场所。他们迁入定居, 并逐渐选择粟黍种植作为采集狩猎的有效补充, 发展出几千年来相对连续且丰富的物质文化和精神信仰。

关键词:

植硅体 兴隆 植被景观 气候演变

Abstract: Phytolith analysis has played a significant role in reconstructing the living environment of ancient humans and the climatic characteristics of archaeological sites. In 2022, the National Museum of China led an in-depth dissection and excavation work of the natural gully in the south of the Xinglong site in Kangbao County, Hebei. To uncover the vegetation landscape and climate changes around the site, we selected the sediment profile from the natural gully for paleoenvironmental proxy analysis. The phytolith records reveal that since the end of the Younger Dryas event, the region where the site is located has undergone multiple climate stages, including warming, relatively warm and humid, rapidly drying and cooling, dry-cold, and persistent dry-cold periods. Amidst the overall process of drying and cooling, the environmental landscape was relatively favorable between about 10,000 and 7,000 cal. BP, providing relatively suitable living conditions for ancient inhabitants. It was likely during this period that the Xinglong ancestors intermittently utilized this small intermountain basin, whose unique micro-landform, with hills to the northwest and water to the southeast, provided them with an ideal habitat. They migrated in and settled down, gradually choosing millet cultivation as an effective supplement to gathering and hunting, and developed a relatively continuous and rich material culture and spiritual beliefs over thousands of years.

Key Words: phytoliths; Xinglong site; vegetation landscape; climate change

一 前言

植硅体,是植物体内的含水非晶态二氧化硅,因其较强的耐受性和原地沉积特性,在古环境研究中展现出独特的价值^[1]。植硅体主要产生于草本植物,特别是禾本科植物^[2],它们的种类和丰度是识别其母源植物种类与占比的关键依据^[3]。更重要的是,植硅体不仅对于重建古植被景观有着重要作用,而且它们是揭示气候环境变化的重要指标^[4]。

植物的光合作用途径研究表明,C3和C4植物的生长与温度、水分等条件密切相关,其中C4植物更能适应高温和干旱的环境^[5]。这两种不同光合类型的植物在组织细胞结构上存在差异,这种差异也反映在了它们产生的植硅体类型上。例如,短鞍型和哑铃型植硅体常见于C4植物,而帽型和齿型植硅体则主要来源于C3植物^[6]。进一步的研究揭示,草本植物的植硅体蕴含着丰富的气候信息^[7],例如画眉草亚科(C4植物)和黍亚科(主要为C4植物)产生的哑铃型和短鞍型植硅体分别多见于温暖半干旱至干旱地区和暖湿地区,而早熟禾亚科(C3植物)的齿型和帽型植硅体则多见于南北纬30–55°的寒温带地区和高海拔山地^[8]。此外,扇型植硅体的增加可能与亲水草本及蒸发蒸腾量的增强相关联^[9]。

根据现代表土中植硅体的分布规律,学者们发现某些植硅体类型倾向于指示温暖或寒冷的气候^[10],而某些植硅体组合特征(如画眉草型和黍型的比例)则能反映地层的干旱指数^[11]。基于这些发现,可以将草本植物植硅体大致分为示暖型植硅体(扇型、方型、长方形、长鞍型、短鞍型、哑铃型等)和示冷型植硅体(棒型、尖型、帽型、齿型等)两大类^[12],以全面客观地反映植硅体组合的气候特征。这些微小的植硅体(组合)在考古遗址中,尤其是在受人为活动影响较小的文化堆积中,成为揭示遗址及其附近古植被与古环境特征的重要线索^[13]。

植硅体分析在考古学中的应用历史悠久,自20世纪初起,德国学者便在欧洲遗址开展了相关研究^[14]。而在中国,这一技术的应用始于20世纪80年代末,吕厚远等人对陶片和红烧土中的植硅体进行了深入研究,开启了植硅体在中国考古学研究的新篇章^[15]。如今,植硅体研究已广泛应用于植物资源利用^[16]、农业起源与早期发展^[17]、作物种植与加工方式^[18]、古人类食谱分析^[19]以及考古遗址古环境复原^[20]等多个领域,并取得了显著的成果。

植硅体分析为古人类用火行为提供了确凿的证据。例如,对以色列的Tabun Cave(旧石器早中期)、Kebara Cave(旧石器中晚期)和Hayonim Cave(旧石器中期和中石器时期)的火塘和灰烬层进行植硅体分析,不仅揭示了人类利用植物作为燃料的证据,还精准区分了控制性用火与自然火事件^[21]。同样,法国Grotte XVI遗址的Couche C地层原生堆积中,也发现了旧石器中晚期人类用火的植硅体证据^[22]。在国内,周口店遗址北京人的用火行为也得到了植硅体记录的支持与验证^[23]。植硅体分析还揭示了古人类对植物资源的多元化利用,如以色列

Amud Cave 中尼安德特人从燃料、铺垫和食物等角度对木本和草本植物加以利用^[24]。在广西娅怀洞遗址的研究中,植硅体分析甚至揭示了1.6万年前古人类可能利用野生稻的线索^[25]。

此外,植硅体分析在复原古人类生活环境和考古遗址气候特征方面也发挥了重要作用。例如,南京直立人洞穴的植硅体沉积揭示了当时偏冷型的气候格局^[26],而福建万寿岩船帆洞的植硅体分析则揭示了古人类生活在干凉背景下较温暖的气候阶段^[27]。植硅体分析的应用领域还在不断拓展,其在先民食物结构分析^[28]等方面也展现出巨大的潜力。例如,通过分析来自西班牙 Tarragona 古罗马墓地人牙结石中的禾本科等植硅体, Fox 等人重建了罗马晚期人们的食物来源、饮食习惯及古环境信息^[29]。

然而,在应用植硅体分析进行古人类和考古学研究时,也面临一系列挑战。这包括植硅体记录的超代表性和低代表性问题^[30]、木本植物植硅体的鉴别难度^[31]以及植物根系、昆虫等生物扰动和地质作用对陆生沉积物中植硅体的影响等^[32]。因此,如何科学有效地解释考古遗址中出土的植硅体^[33],成为了一个值得深入探讨的课题。

近年来,坝上草原地区发现的旧—新石器过渡阶段以来的定居遗存和旱作农业线索,为植硅体分析提供了丰富的材料。特别是康保兴隆遗址的连续堆积剖面,为研究当时的气候和植被变化提供了理想的条件。随着研究的深入,植硅体分析将在探究旧—新石器转变、定居生活方式的形成、旱作农业起源与早期发展等方面发挥更加重要的作用,为我们理解古代社会与环境的关系提供新的视角,为现代生态保护、气候变化应对和农业可持续发展等提供参考。

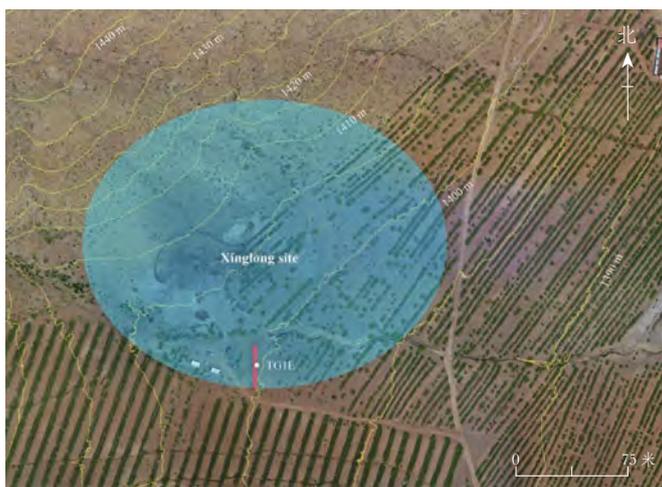
二 遗址概况

兴隆遗址位于河北省张家口市康保县照阳河镇兴隆村东南,南距康保县城约30公里^[34]。该遗址所处的区域,即坝上地区,位于黄土高原、华北平原和东北平原的交汇处,覆盖了张北县、沽源县、康保县全境以及尚义县、丰宁县、围场县三县的部分区域,地理坐标为 $40^{\circ} 58' \sim 42^{\circ} 42' N$, $113^{\circ} 50' \sim 118^{\circ} 00' E$,总面积约1.8万平方公里^[35]。坝上地区作为河北北部高原区的通称,北邻内蒙古锡林郭勒盟及浑善达克沙地,南依燕山山脉,与张家口和承德市坝下地区相接,东依大兴安岭余脉,西临内蒙古乌兰察布市后山地区,是蒙古高原的南缘^[36]。此地处于内蒙古高原、燕山山地和华北平原的过渡带,是季风气候与大陆气候、干旱与半干旱地区、华北温带阔叶林与草原、农区与牧区的过渡地带,同时也是内陆流域与外流域的交接带,受纬度、高度与海陆季风等多重因素的综合影响,其形成了生态环境脆弱、系统层次结构简单、食物链短、自我调节能力有限的区域^[37]。

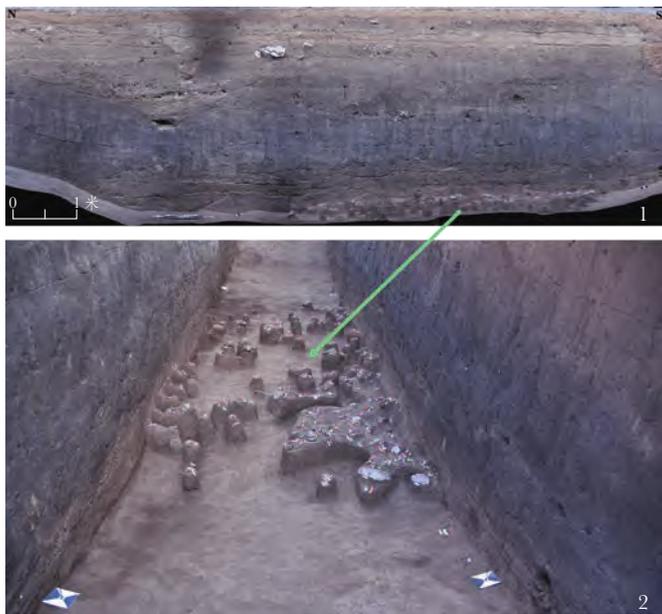
兴隆遗址的文化内涵与近年来在内蒙古化德县裕民遗址^[38]、四麻沟遗址^[39],

镶黄旗乃仁陶勒盖遗址^[40]以及张家口尚义四台遗址^[41]中发现的相似,但其在时间上的共时性或延续性存在差异。兴隆遗址主要涵盖了从旧—新石器过渡阶段至新石器中期的文化遗存,年代距今13500—5000年,其中旧—新石器过渡阶段的细石核、细石叶等遗存体现了该阶段华北细石器工业的普遍特征^[42],而新石器时代的遗迹、遗物丰富多样,可分为多个发展阶段^[43]。

兴隆遗址的地貌环境主要位于浅山丘陵的山体东南坡,北侧为山体基岩,南侧种植有固沙植物,东北和西南两侧各有一条自然冲沟(图一),面积约1万平方米。通过勘探,在西南侧自然冲沟的向东延伸部分下部发现一条与山势垂直的自然沟(G5)。2019年,对G5进行初步解剖发掘(TG1),沟底填土中出土了细石器和动物骨骼等遗



图一 兴隆遗址鸟瞰图及TG1E位置



图二 兴隆遗址TG1E东壁剖面及底部堆积
1.TG1E东壁剖面局部 2.TG1E-G5底部堆积(镜向北)

物。2022年,进一步扩大了发掘范围(TG1E),将TG1向东扩方2米进行清理(图一、图二),在G5(图二)底部填土内发现了陶器、细石器、动物骨骼等具有明确年代的文化遗物^[44]。G5叠压于TG1E⑧层下,G5内填土堆积分为7层,其中G5①层和G5②层上部为历史时期形成,G5③层以下为新石器时代堆积,填土内包含物较少。G5⑤b层出土一陶片(图三),在G5⑥层下部和G5⑦层表面发现一片由细石叶、细石核、动物碎骨和石块构成的遗迹(图二、图三),呈西高东低片状分布。对G5⑥和G5⑦层出土的动物骨骼进行加速器质谱碳十四(AMS¹⁴C)测年,结果显示其属于新石器时代早期或旧石器向新石器过渡阶段。



图三 兴隆遗址 TG1E-G5 底部堆积出土部分遗物
1-8.TG1E-G5⑤出土部分石制品 (2023KXG5⑤:L1-L8) 9.TG1E-G5⑤b出土陶片
(2023KXG5⑤b:P1)

这条自然沟 (G5) 位于遗址核心区的南部外围, 沟内填土堆积中的文化遗存相对较少, 且主要集中在沟底。这种情况一直延续到更晚阶段的 TG1E ⑧—①堆积中。考虑到其位于遗址所在缓坡的下部, 其中难免会混入部分来自坡上遗址人类活动形成的文化遗物, 但除了 G5 底部的细石器组合遗迹外, 该剖面未见有其他原生遗迹现象。因此, TG1E 区域可以被视为受人类活动影响较小的遗址边缘或临近地带, 其沉积物样品为古环境替代指标分析和微体植物遗存分析提供了宝贵的材料。

为了深入探究兴隆遗址的植被变迁与气候变化趋势, 我们选取了 TG1E 东壁剖面开展微体植物遗存分析。接下来, 我们将主要基于植硅体记录, 详细阐述和解读遗址的气候与植被演替情况, 以期对相关领域的研究提供有力的数据支撑。

三 材料与方法

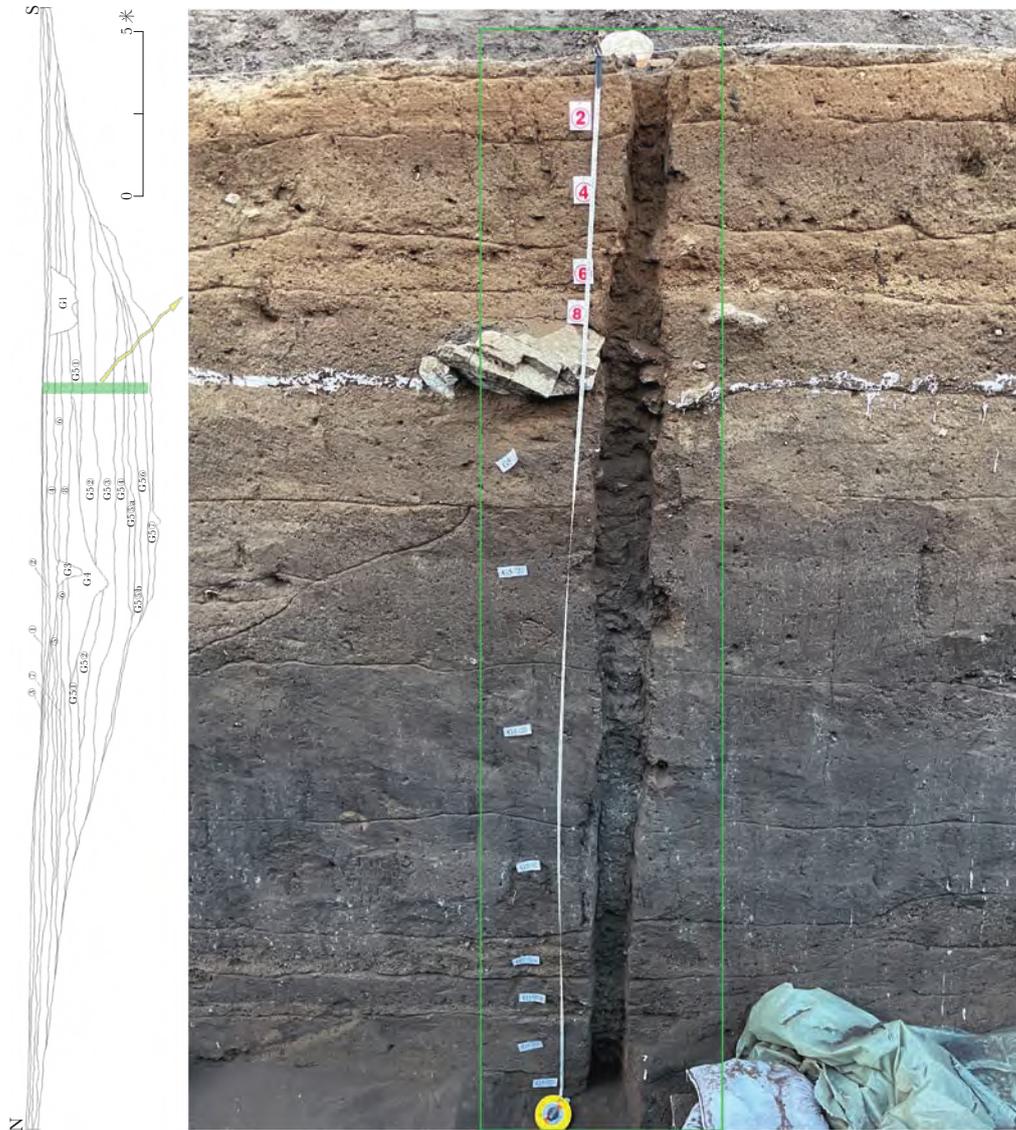
1. 样品采集

在兴隆遗址 TG1E 的发掘过程中, 针对其东壁剖面采用了“柱状采样”法进行微体土样的采集。首先, 在完成田野发掘和相应的文字、照相与绘图记录后, 我们选择了 TG1E 东壁一个堆积连续且无明显人为或自然扰动的区域作为采样点。在清理了壁面表面后, 自下而上采集样品。样品的采集单元根据堆积分层 (肉眼可识别) 和自然间隔 (通常按 5 厘米左右) 来确定, 在深度达 340 厘米的堆积范围内共采集了 70 个样品 (图四)。值得注意的是, 部分堆积因仅分布于探沟的特定区域 (多位于南北两端) 或受到发掘堆土的影响 (表土) 未进行样品采集。以下是对各层堆积及其采集样品的详细描述。

TG1 ①, 浅灰褐色砂土, 含较多碎石块和植物根系, 深 0—6 厘米。考虑可能受到发掘堆土的影响, 该层未进行样品采集。

TG1 ②, 黄褐色砂土, 含大量石块、动物骨骼和少量瓷片, 深 6—19 厘米。取样位置分别为: 6—9、9—14、14—19 厘米。

TG1 ③, 黄褐色粗砂土, 含大量石块、动物骨骼、陶片和瓷片等, 仅探沟南北两端有分布, 深 7—30 厘米。未采集样品。



图四 兴隆遗址 TG1E 东壁剖面采样示意图

TG1 ④，灰褐色粗砂土，内含石块、石片、动物骨骼、陶片、瓷片和铜小匙等，深 19–39 厘米。取样位置分别为：19–24、24–29、29–34、34–39 厘米。

TG1 ⑤，黄褐色粗砂土，含大量石块，仅分布于探沟北侧，深 35–69 厘米。未采集样品。

TG1 ⑥，浅黄褐色砂土，含细砂、石块、陶片和动物骨骼等，深 39–54 厘米。取样位置分别为：39–44、44–49、49–54 厘米。

TG1 ⑦，黄褐色砂土，不见文化遗物，仅探沟北侧有分布，深 57–73 厘米。未采集样品。

TG1 ⑧，深黄褐色土，含较多砂粒、石块、陶片和动物骨骼等，深 54–82 厘米。取样位置分别为：54–57、57–62、62–67、67–72、72–77、77–82 厘米。在深约 55 厘米处获得炭化黍用于碳十四测年。

G5 ①, 灰褐色砂土, 较致密, 含石块、陶片和动物骨骼等, 深 82—114 厘米。取样位置分别为: 82—84、84—89、89—104、104—109、109—114 厘米。在深约 99 厘米处获得沉积物用于碳十四测年。

G5 ②, 黑褐色砂土, 夹较多沙砾, 含陶片、石块、石器和动物骨骼, 深 114—169 厘米。取样位置分别为: 114—119、119—124、124—129、129—134、134—139、139—144、144—149、149—154、154—159、159—164、164—169 厘米。

G5 ③, 黑褐色夹杂灰白色斑块土, 较致密, 含石块、细石叶、石片、石磨盘、陶片、红烧土颗粒和动物骨骼等, 深 169—226 厘米。取样位置分别为: 169—176、176—181、181—186、186—191、191—196、196—201、201—206、206—211、211—216、216—221、221—226 厘米。在深约 174 厘米处获得沉积物用于碳十四测年。

G5 ④, 灰黑色夹杂灰白色斑块土, 较致密, 含石块、细石叶、石片、陶片、红烧土颗粒和动物骨骼等, 深 226—265 厘米。取样位置分别为: 226—230、230—235、235—240、240—245、245—250、250—255、255—260、260—265 厘米。

G5 ⑤ a, 灰褐色砂土, 夹大量沙砾, 含石块、细石叶、石片、陶片和动物骨骼等, 深 265—286 厘米。取样位置分别为: 265—266、266—271、271—276、276—281、281—286 厘米。在深约 279 厘米处获得沉积物用于碳十四测年。

G5 ⑤ b, 深黄褐色砂土, 夹大量沙砾, 含少量石块、细石叶、石片、陶片和动物骨骼等, 深 286—303 厘米。取样位置分别为: 286—288、288—293、293—298、298—303 厘米。

G5 ⑥, 黄色细砂土, 较致密, 中间局部夹较多沙砾, 含细石叶、石核、石片、石块和动物骨骼等, 深 303—335 厘米。取样位置分别为: 303—305、305—310、310—315、315—320、320—325、325—330、330—335 厘米。在深约 324 厘米处获得动物骨骼用于碳十四测年。

G5 ⑦, 浅黄色砂土, 含极少量动物骨骼、细石叶、石片和石核等, 深 335 厘米以下。取样位置分别为: 335—340 厘米。在深约 338 厘米处获得动物骨骼用于碳十四测年。

2. 碳十四测年

在 Beta 实验室 (Beta Analytic Inc.) 对该堆积中的炭化植物种子、动物骨骼和沉积物进行 AMS ^{14}C 年代测定, 并对所得结果进行校正^[45]。在进行测年实验前, 这几类样品均经过了特定的预处理: 炭化植物种子采取酸—碱—酸的处理过程, 首先用热盐酸 (HCl) 去除碳酸盐, 接着用碱 (NaOH) 去除二级有机酸, 最后再进行盐酸清洗; 动物骨骼则采取骨胶原提取—碱处理过程, 先用冷盐酸 (HCl) 冲洗去除骨磷灰石, 获取骨胶原后再进行碱 (NaOH) 处理; 沉积物采取酸洗的处理过程, 多次酸 (HCl) 洗以完全去除样品中的碳酸盐。

3. 植硅体分析

植硅体的提取遵循国际通行的标准方法^[46]。整个分析过程首先在中国科学院古脊椎动物与古人类研究所进行实验操作,随后转移至中国国家博物馆环境考古研究所,进行植硅体的鉴定和统计分析。具体流程如下:(1)烘干样品并研磨成粉末,称取5 g样品放在50 ml离心管中并编号;(2)缓慢加入30 ml 30% H₂O₂溶液,水浴加热促进反应;(3)上述反应放缓后缓慢加入20 ml 10% HCl溶液,放置24小时后加蒸馏水稀释,水洗至中性(3000 rpm; 5 min);(4)加入1粒石松孢子和适量蒸馏水,待其充分溶解后离心(3000 rpm; 5 min);(5)加入5 ml比重2.3-2.4的ZnBr₂重液,充分搅拌后离心(3000 rpm; 10 min),吸取2 ml上清液置于15 ml离心管;(6)重复上一步骤一次;(7)蒸馏水清洗15ml离心管内的样品并离心3次(3000 rpm; 5 min),无水乙醇清洗并离心(3000 rpm; 5 min);(8)样品转移至5 ml样品管,待其晾干;(9)用加拿大树胶制片后在Nikon Eclipse LV100N POL光学显微镜下放大400倍进行植硅体的鉴定与统计。

四 结果

1. 沉积物年龄

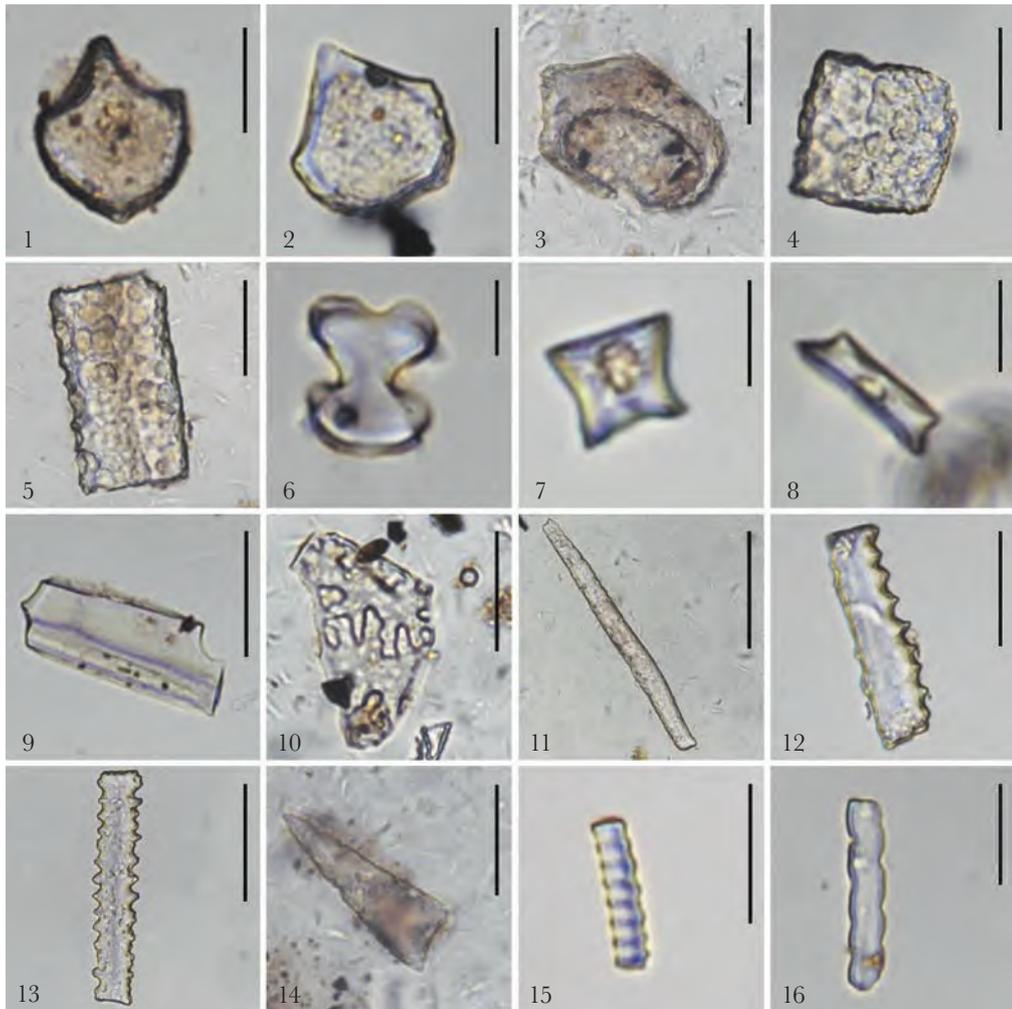
为明确TG1E东壁剖面的年代序列,我们进行了AMS ¹⁴C测年分析,结果显示其年代连续性良好,覆盖了全新世以来的约11500年历史。为验证这一序列的准确性,我们还选取了部分沉积物样品进行了光释光测年分析,其年代结果^[47]与碳十四测年结果基本一致(表一)。

表一 兴隆遗址TG1测年对照表

堆积单位 Deposit	碳十四年代 ¹⁴ C year (BP)	碳十四校正年代 Calibrated ¹⁴ C year (cal. BP)		光释光年代 OSL year (cal. BP)
		Median	2 δ (95.4%)	
TG1H5 ②	610 ± 30, Beta-565055	603	651 (95.4%) 546	
G5 ① · 96-101cm	2110 ± 30, Beta-620618	2072	2288 (2.7%) 2275 2148 (92.7%) 1995	2270 ± 250
G5 ② · 131-136cm				3380 ± 370
G5 ③ · 171-176cm	5890 ± 30, Beta-620619	6708	6787 (95.4%) 6652	5820 ± 680
G5 ④ · 226-231m				7830 ± 840
G5 ⑤ a · 276-281cm	9130 ± 30, Beta-620620	10270	10405 (1.6%) 10392 10385 (93.9%) 10225	10800 ± 870
G5 ⑥ · 301-306cm				12900 ± 1660
G5 ⑥ · 321-326cm	9900 ± 40, Beta-641210	11298	11597 (0.7%) 11585 11465 (0.9%) 11451 11403 (93.9%) 11212	
G5 ⑦ · 335-340cm	9980 ± 50, Beta-6412101	11448	11696 (3.5%) 11667 11648 (91.9%) 11257	

2. 植硅体描述与分带

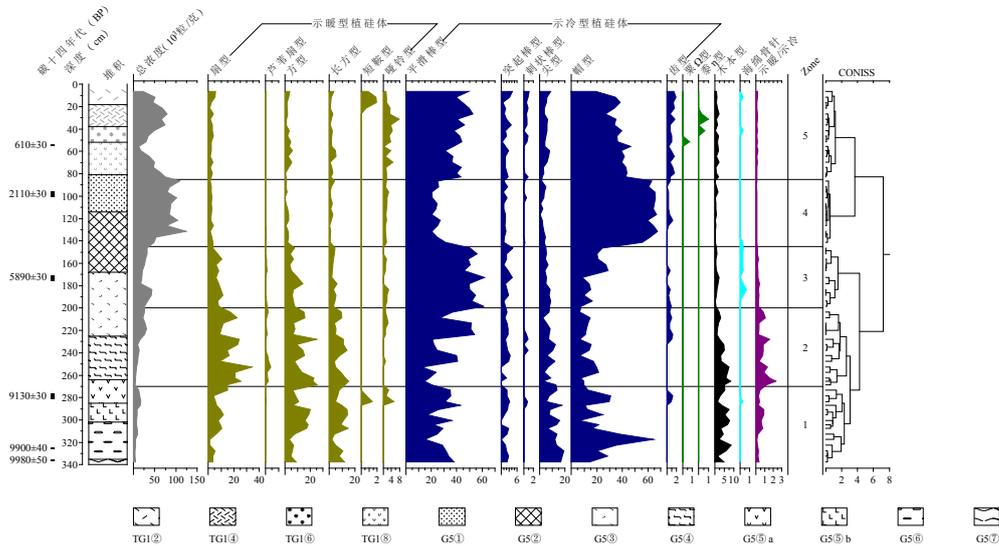
TG1E 东壁剖面共分析植硅体样品 70 个, 涵盖深度范围为 6–340 厘米, 共统计植硅体 21344 粒, 平均每个样品约 305 粒, 植硅体总浓度约为 36146 粒/克 (浓度变化范围 3149–124330 粒/克)。提取到的植硅体类型多样, 包括扇型、方型、长方形、短鞍型、哑铃型、平滑棒型、突起棒型、刺状棒型、尖型、帽型、齿型、木本型等, 并发现少量海绵骨针 (图五)。总体上, 各分析单元的植硅体组合基本均以扇型、方型、长方形、平滑棒型、哑铃型、尖型和帽型为主。鉴定出的植物种类主要包括: 芦苇 (*Phragmites australis*)、画眉草亚科 (Eragrostoideae)、黍亚科 (Panicoideae)、早熟禾亚科 (Pooideae)。



图五 兴隆遗址 TG1E 东壁剖面植硅体图版

1、2. 扇型 (Cuneiform bulliform) 3. 芦苇扇型 (Reed-type bulliform) 4. 方型 (Square) 5. 长方形 (Rectangular) 6. 哑铃型 (Bilobate) 7. 帽型 (Rondel) 8. 短鞍型 (Short-saddle) 9. 木本型 (Polyhedron aggregate) 10. 黍 η 型 (η -undulated type endings structures of epidermal long cell from broomcorn millet) 11. 平滑棒型 (Elongate psilate) 12. 突起棒型 (Elongate echinate) 13. 刺状棒型 (Elongate dendritic) 14. 尖型 (Acicular hair cell) 15. 导管 (Cylindric sulcate tracheid) 16. 齿型 (Trapeziform sinuate)

比例尺: 1、2、15、16, 20 μm ; 3, 40 μm ; 4、5、9、10、12、14, 30 μm ; 6-8, 10 μm ; 11, 80 μm ; 13, 60 μm



图六 兴隆遗址 TG1E 东壁剖面植硅体图式

根据植硅体的类型和数量，运用 Tilia 软件^[48] 绘制植硅体百分比和浓度图谱，并结合 CONISS 聚类分析^[49] 结果和植硅体的气候指示特征（示暖型植硅体组合与示冷型植硅体组合的比值^[50]），将该剖面植硅体样品划分为 5 个不同的植硅体带（图六），各个植硅体组合带的特征及其所反映的气候类型自下而上分述如下。

植硅体带 1：深度 270—340 厘米，包含 15 个样品，植硅体总数为 3527 粒。平均浓度约为 8837 粒 / 克，且由下而上趋于增加（3149—17721 粒 / 克）。本带植硅体组合以示冷型植硅体为主，其平均含量约为 68.83%，示暖型植硅体平均含量约为 26.47% 且趋于增加。木本型植硅体平均含量为 4.73%（1.38%—8.72%），表明周边乔木类植物的存在。指示潮湿环境的芦苇扇型植硅体和指示湿地或半淹没环境的海绵骨针^[51]，其均出现在深度 281—286 厘米处，但其百分含量偏低（约 0.28%）。故据此推断本带可能反映了温凉偏干的气候，在深度 281—286 厘米处附近可能有湿地存在。

植硅体带 2：深度 200—270 厘米，包含 15 个样品，植硅体总数为 4879 粒。平均浓度显著提升至 14455 粒 / 克，并随深度减少而递增（3961—30688 粒 / 克）。本带植硅体组合仍以示冷型植硅体为主，但示暖型植硅体的平均含量显著增加至 43.41%（22.22%—64.41%）。本带指示亲水草本的扇型植硅体含量显著增加（平均百分比约 18.29%），指示潮湿环境的芦苇扇型普遍分布，其平均百分含量增加至约 1.09%，且呈现出先增后减的趋势，尤其是深度 226—240 厘米处即不见。木本型植硅体含量虽仍较高但趋于减少，平均 4.13%（1.23%—8.23%）。本带气候较上一带显著暖湿化，但总体应仍为温干状态，且在深度 226—240 厘米处附近湿地或水域面积可能缩小。

植硅体带 3：深度 145—200 厘米，包含 11 个样品，植硅体总数为 3669 粒。平均浓度大幅增至 29245 粒 / 克，且表现出波动增加的趋势（17355—43781 粒 / 克）。

本带植硅体组合中示冷型植硅体迅速增加至平均 79.01% (70.03%–85.30%), 而示暖型植硅体含量骤减至平均 19.98% (14.12%–28.34%)。海绵骨针在本带中上部普遍存在 (平均含量约 0.25%), 暗示水域面积扩大。木本型植硅体含量显著降低至平均 1.02% (0.30%–2.37%)。芦苇扇型主要断续分布于本带下部和中部, 且含量减少至平均约 0.40%。本带气候呈现明显干凉化特征。

植硅体带 4: 深度 85–145 厘米, 包含 12 个样品, 植硅体总数为 3871 粒。平均浓度急剧增加至 86681 粒/克 (48506–124330 粒/克)。本带植硅体组合中示冷型植硅体占据绝对主导, 平均含量高达 92.03% (89.86%–93.33%), 示暖型植硅体持续减少至平均含量约 7.39% (5.84%–9.28%)。木本型植硅体含量进一步降低, 平均仅 0.58% (0%–1.66%)。芦苇扇型罕见, 仅出现于本带下部 129–139 厘米处的两个分析单元, 且其含量低至约 0.30%。海绵骨针仅见于本带最底部的 139–144 厘米处。本带反映的气候更为干冷, 水域面积明显减少。

植硅体带 5: 深度 6–85 厘米, 包含 17 个样品, 植硅体总数为 5397 粒。平均浓度约 48177 粒/克, 表现出显著的波动 (12826–78977 粒/克)。本带植硅体组合中示冷型植硅体含量略有减少, 但仍是主体 (平均 87.63%), 示暖型植硅体含量略增至平均 10.88% (6.23%–16.82%)。芦苇扇型植硅体缺失, 海绵骨针出现于 9–14 厘米和 39–44 厘米处。本带气候仍为干冷, 且地貌上可能呈现更强的荒漠化趋势。其中, 54–62 厘米处植硅体浓度骤降, 结合 24–54 厘米间粟、黍稷壳植硅体的存在, 可能反映了元朝时期附近区域的粟黍种植活动。

五 讨论

学界针对坝上区域的古沙丘、古土壤剖面和湖泊沉积物进行了深入的古气候环境研究, 并在全新世气候演变、植被演替和湖面变迁等方面取得了显著成果。通过矿物成分全量化学测试、总有机碳含量和孢粉分析等手段, 揭示了该区域在 10000–6900 cal. BP 为冰后期升温阶段, 湖泊水位较高^[52]。特别是安固里淖和泊江海子湖泊的沉积粒度分析进一步细化了区域全新世气候环境变化的阶段, 包括增温期 (8400–7300 cal. BP)、大暖期鼎盛期 (7300–6200 cal. BP)、气候波动期 (5500–5000 cal. BP)、亚稳定湿润期 (5000–3000 cal. BP) 以及降温期 (3000 cal. BP 至今)^[53]。安固里淖的孢粉记录显示, 11000–6000 cal. BP 该区域以森林草原植被为主, 气候湿润, 为全新世大暖期; 6000–3200 cal. BP 则以疏林草原植被为主, 气候相对湿润; 而自 3200 cal. BP 起, 则以荒漠草原植被为主, 气候干旱^[54]。植硅体分析进一步证实, 自 5000 cal. BP 以来, 安固里淖地区在千年尺度上总体呈现冷干趋势^[55]。地貌证据和钻孔沉积特征的研究, 如邱维理等人的工作, 将安固里淖全新世湖面变化序列分为四个阶段: 湖面快速上升期 (10000–7000 cal. BP)、高湖面期 (7000–6230 cal. BP)、湖面快速下降期 (6230–5300

cal. BP) 和湖面波动下降期 (5300 cal. BP 以来), 其中高湖面达到现代湖面以上 28 米的位置, 显著体现了区域全新世大暖期的特征^[56]。

尽管学界对区域全新世环境演变过程有了较为一致的总体认识, 但仍有部分学者提出了不同的观点。例如, Wang 等人通过粒度、磁化率、TOC 和 C/N 以及孢粉等多指标分析提出, 8900–7400 cal. BP 是安固里淖周围区域的全新世大暖期阶段^[57]。此外, 不同代用指标在同一剖面的分析结果存在不一致性^[58]、重建的气候变化过程也表现出不协同的特点^[59]。

在此背景下, 我们特别关注了兴隆遗址的植硅体记录, 以探讨全新世以来该区域的气候、植被变化以及人类适应情况。

植硅体带 1, 大致对应于新仙女木事件结束后的全新世早期前段 (约 11700–10000 cal. BP), 也处于旧—新石器过渡阶段的范畴, 标志着气候、环境、文化发展和人类适应的重要转变, 兴隆遗址所在区域气温回升、植被恢复, 人群与动物群逐水草迁徙。兴隆先民很可能采取了攫取性生业经济 (采集狩猎), 并运用了以锥形细石核和细石叶为代表的华北细石器技术和复合工具技术。结合四台遗址同时期相关遗存的发现^[60], 推测当时华北细石器技术 (以锥形、柱形和楔形细石核为代表)^[61] 和复合工具技术 (以骨柄石刃器为代表)^[62] 传播至此区域。此外, 较多木本型植硅体的存在很可能与遗址该阶段出现人类活动有直接关系。

植硅体带 2, 约为全新世早期后段至全新世中期早段 (约 10000–7600 cal. BP), 遗址所在区域气候环境相对稳定、适宜居住, 水热条件较好, 促进季节性定居的出现 (兴隆遗址揭露出属于该阶段的地穴式和半地穴式房址、墓葬)。该阶段细石器技术传承, 打制石器 (铍状器、石矛头等) 和研磨类石器 (磨盘、磨棒等) 逐渐增多, 局部磨光石器开始出现, 显示出生产性生业经济的加强并作为采集狩猎的重要补充, 如发现栽培作物黍、粟和可能驯化的狗和家猪^[63], 坝上地区新石器时代文化快速发展, 出现裕民文化^[64]、四台文化^[65] 等坝上代表性区域文化体。同时, 8200 cal. BP 左右的全球性干冷气候事件^[66] 也在该区域有所体现, 遗址文化堆积中相应阶段的缺失或也与此相关。此外, 大植物遗存、人骨稳定同位素和孢粉记录共同揭示出 8000–7000 cal. BP 兴隆遗址南约 100 公里处的四台遗址周边呈现落叶阔叶林—草原的植被景观、暖湿的环境特点以及粟黍旱作农业和狩猎采集共存的生业经济模式^[67]。

为了弥补了植硅体分析在木本植物属种鉴定研究中的局限, 我们深入研究了兴隆遗址核心区部分房址内火塘或灶址的木炭样品。这些研究揭示了 8500–7000 cal. BP 遗址周边存在丰富的林地资源, 包括河岸林地、向阳山坡灌丛和山谷疏林等类型^[68]。特别是在 8000–7000 cal. BP, 杨属林地扩张, 并伴随着槭属、圆柏属和鼠李属等木本植物的广泛出现^[69]。这为先民们强化利用当地林地资源提供了可能性, 如大量砍伐非果木类乔木如榆属、杨属、槭属和圆柏属等作为薪材, 并有意识地管理和保护山杏灌丛为潜在的果类食物资源^[70]。这一发现与木本型植

硅体含量在此阶段保持较高水平但逐渐降低的趋势相吻合,特别是在约 8500 cal. BP (深约 225 厘米,与遗址迄今揭露的新石器时代遗存的较早年代相应),木本型植硅体含量开始大幅下降,这可能反映了新石器时代中期人类活动对周边木本植物资源的强化利用,如作为建材和薪柴。此外,这也可能暗示了遗址周边粟黍栽培用地的扩张和定居生活方式趋于稳固。

进入全新世中期后段(植硅体带 3,约 7600—5000 cal. BP),遗址周边环境表现出明显的干冷化和水域(田野调查发现遗址南邻多处更新世晚期以来的积水洼地)扩大化的特征。该阶段的文化堆积涵盖了遗址新石器时代中期晚段和新石器时代晚期的文化,前者部分延续了新石器时代中期早段的裕民文化^[71],以地穴或半地穴式房址和平底筒形罐为代表(约 7600—7000 cal. BP),并出土了显著增多的炭化黍^[72]。后者则表现出明显的“断裂型”文化特征,不见粟黍等农作物遗存,其中约 7000—6000 cal. BP 仅发现两座半地穴式房址,具备后岗一期的文化因素,出土有圜底釜^[73]和钵;约 5800—5200 cal. BP 则以圆坑墓^[74]和文化层表的类灶石圈为代表,表现出游牧文化特征。这一时期的文化转变(大概相当于红山文化晚期之后)很可能与 5500 cal. BP (或 5200 cal. BP) 的干冷气候事件^[75]密切相关,加剧了遗址新石器时代文化的迅速消失。

全新世晚期(植硅体带 4 和 5,约 5000 cal. BP 以来),遗址附近持续干旱甚至荒漠化,寒冷程度加剧,河湖水域逐渐退缩直至消失,木本植物显著减少(其中植硅体带 4 植硅体总浓度迅速攀升,可能反映了草本植物特别是禾本科植物的发育)。这一过程与附近安固里淖湖的环境演化记录相吻合^[76],可能反映了本区域对 4000 cal. BP 左右全球降温气候事件^[77]的响应,以及 2200—480 cal. BP 区域全新世最为干冷的气候时期^[78]。在此期间,人类活动方面,遗址中仅发现少量辽金元时期的文化堆积(遗迹以灰坑和沟为主,遗物见有灰陶片、瓷片、人骨和动植物标本)^[79],但仍有粟、黍、小麦、大麦、荞麦等农作物利用的记录^[80]。

综上所述,通过植硅体分析,兴隆遗址全新世的气候演变可以概括为增温期、气候适宜期和变干降温期等主要阶段,这与坝上地区的前期研究结果相吻合。在气候变迁的背景下,区域人类社会的适应策略也相应发生变化。有学者也曾提出,安固里淖地区记录了全新世中晚期人类文明演化对气候变化的敏感响应,气候温湿期以农业文明为主,气候冷干期以草原文明为主^[81]。这一特点在兴隆和四台等遗址的考古发现中也得到了印证,进一步证实了全新世早中期该区域暖湿且稳定的气候条件促进了聚落定居生活方式的发展与旱作农业及其他生产性生业经济的形成,而这很可能与该阶段降水量的增加^[82]有直接关系。

六 结论与展望

通过对兴隆遗址 TG1E 剖面的植硅体记录进行详细分析,我们揭示了自新仙

女木事件结束以来,该遗址所在区域的气候特征经历了升温期—相对暖湿的温干期—迅速干凉化时期—干冷期—持续干冷期等多个显著的变化阶段。木炭分析进一步支持了这一点,表明约 10000—7000 cal. BP 遗址周边的植被繁茂,水热条件适宜,为兴隆先民提供了理想的生存环境。他们选择在西北依山、东南邻水的山间小盆地中,发展出了相对连续且较为丰富的物质文化和精神信仰。值得注意的是,兴隆遗址不仅记录了气候和环境的变迁,也可能记录着人群的迁徙、生计方式的变革和文化的传承与演变。这些变化共同构成了兴隆遗址在旧—新石器时代过渡阶段以来人地关系模式的动态图景。

本次分析初步展示了植硅体分析在揭示遗址周边植被景观与环境演变方面的潜力。为了更全面地了解这一地区的古环境特征,我们计划进一步采用孢粉、黏土矿物、粒度、常量元素等多种古环境替代指标进行分析,并与临近自然沉积的相关研究进行比较。这种跨学科的综合分析方法将有助于我们更全面地认识兴隆遗址自旧—新石器过渡阶段以来的人地关系模式,有助于我们更深入地理解气候环境变化对聚落格局、人群构成、生业经济和文化景观的潜在影响。

在运用植硅体进行考古遗址的地方性植被景观和环境特点重建时,我们建议优先选择受人为扰动较少的沉积物剖面,并与遗址周边的自然沉积剖面进行对比研究。通过结合遗址的多种古气候环境指标,开展多学科分析,进行交互验证,可以更客观地揭示遗址的古环境特点,并复原其变迁过程。这不仅有助于我们更准确地利用植硅体这一重要记录和指标,为考古学和古人类学研究提供有力支持,还能为当前的环境问题和人类活动提供基于植硅体研究的解决方案或建议。

附记:本文受国家重点研发计划“文化科技与现代服务业”重点专项“北方旱作农业起源、形成与发展研究(一期)”(批准号:2022YFF0903500)和国家自然科学基金项目“坝上草原全新世早期的旱作农业与人类适应:以兴隆遗址为例”(批准号:42107470)共同资助。感谢中国国家博物馆考古院环境考古研究所杨志华博士在样品采集过程中提供的帮助。

注释:

- [1] Piperno D R, *Phytolith Analysis: An Archaeological and Geological Perspective*, Academic Press, 1988.
- [2][46]a. 同 [1]; b. 王永吉、吕厚远:《植物硅酸体研究及应用》,海洋出版社,1993年。
- [3][31]a. 同 [2]b; b. Piperno D R, *Phytoliths: A Comprehensive Guide for Archaeologists and Paleoecologists*, Altamira Press, 2006.
- [4] a. 同 [1]; b. 同 [2]b; c. Lu H, Wu N, Liu K B, et al., “Phytoliths as quantitative indicators for the reconstruction of past environmental conditions in China II: palaeoenvironmental reconstruction in the Loess Plateau,” *Quaternary Science Reviews*, 2007, 26(5–6), pp.759–772; d. Strömberg C A, Dunn R E, Crifò C, et al., “Phytoliths in Paleoecology: Analytical Considerations, Current Use, and Future Directions,” Croft D, Su D, Simpson S, *Methods in Paleoecology*, Springer, 2018; e. Liu L, Jie D, Liu H, et al., “An evaluation of soil phytoliths for reconstructing plant communities and palaeoclimate in the northern temperate region,” *European Journal of Soil Science*, 2021, 72(2), pp.900–917; f. 王伟铭、刘金陵、周晓丹:《南京直立人洞穴沉积的植

- 硅体气候指数研究》，《科学通报》2003年第11期。
- [5] a. 吴乃琴、吕厚远、聂高众等：《C3、C4植物及其硅酸体研究的古生态意义》，《第四纪研究》1992年第3期；b. 吕厚远、王永吉：《晚更新世以来洛川黑木沟黄土地层中植物硅酸体研究及古植被演替》，《第四纪研究》1991年第1期。
- [6] 同 [5]b。
- [7] a. 同 [5]a；b. Twiss P C, “Predicted world distribution of C3 and C4 grass phytoliths,” Jr Rapp G, Mulholland S C, *Phytolith Systematics: Emerging Issues Advances in Archaeological and Museum Science 1*, Plenum Press, 1992, pp.113–128；c. Twiss P C, “A curmudgeon’s view of grass phytolithology,” Meunier J D, Colin F, *Phytoliths: Applications in Earth Sciences and Human History*, A A Balkema Publishers, 2001, pp.7–25；d. Iriarte J, Paz E A, “Phytolith analysis of selected native plants and modern soils from southeastern Uruguay and its implications for paleoenvironmental and archeological reconstruction,” *Quaternary International*, 2009, 193(1), pp.99–123；e. Twiss P C, Suess E, Smith R M, “Morphological classification of grass phytoliths,” *Soil Science Society of America Proceedings*, 1969, 33(1), pp.109–115。
- [8] a. 同 [5]a；b. 同 [7]b；c. 同 [7]c。
- [9] a. Delhon C, Alexandre A, Berger J–F, et al., “Phytolith assemblages as a promising tool for reconstructing Mediterranean Holocene vegetation,” *Quaternary Research*, 2003, 59(1), pp.48–60；b. Webb E A, Longstaffe F J, “Climatic influences on the oxygen isotopic composition of biogenic silica in prairie grass,” *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2002, 66(11), pp.1891–1904；c. Webb E A, Longstaffe F J, “The relationship between phytolith– and plant–water $\delta^{18}\text{O}$ values in grasses,” *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2003, 67(8): 1437–1449。
- [10] a. 同 [2]b；b. 同 [4]f；c. Qiu Z, Jiang H, Ding J, et al., “Pollen and phytolith evidence for rice cultivation and vegetation change during the Mid–Late Holocene at the Jiangli site, Suzhou, East China,” *PLoS One*, 2014, 9(1), e86816。
- [11] a. 同 [7]b；b. 同 [7]c；c. 同 [7]e。
- [12][26][50] 同 [4]f。
- [13] a. 同 [1]；b. 同 [3]b。
- [14] Netolitzky F, “Mikroskopische Untersuchung gänzlich verkohlter vorgeschichtlicher Nahrungsmittel aus Tirol,” *Zeitschrift für Untersuchung der Nahrungs– und Genußmittel, sowie der Gebrauchsgegenstände*, 1900, 3(6), pp. 401–407。
- [15] 同 [2]b。
- [16] a. Albert R, “Phytoliths in the Middle Palaeolithic deposits of Kebara Cave, Mt Carmel, Israel: study of the plant materials used for fuel and other purposes,” *Journal of Archaeological Science*, 2000, 27(10), pp.931–947；b. Madella M, “The exploitation of plant resources by Neanderthals in Amud Cave (Israel): the evidence from phytolith studies,” *Journal of Archaeological Science*, 2002, 29(7), pp.703–719；c. Wu Y, Xie G, Mao L, et al., “Phytolith evidence for human–plant subsistence in Yahuai Cave (Guangxi, South China) over the past 30000 years,” *Science China Earth Sciences*, 2020, 63(11), pp.1745–1757。
- [17] a. Ball T, Chandler–Ezell K, Duncan N, et al., “Phytoliths as a tool for investigations of agricultural origins and dispersals around the world,” *Journal of Archaeological Science*, 2015, 68, pp.32–45；b. 靳桂云、燕生东、宇田津彻郎等：《山东胶州赵家庄遗址 4000 年前稻田的植硅体证据》，《科学通报》2007 年第 18 期。
- [18] a. Harvey E L, Fuller D Q, “Investigating crop processing using phytolith analysis: the example of rice and millets,” *Journal of Archaeological Science*, 2005, 32(5), pp.739–752；b. An J, Kirleis W, Zhao C, et al., “Understanding crop processing and its social meaning in the Xinzhai period (1850–1750 cal bce): a case study on the Xinzhai site, China,” *Vegetation History and Archaeobotany*, 2022, 31, pp.261–277。
- [19][29] Fox C L, Juan J, Albert R M, “Phytolith analysis on dental calculus, enamel surface, and burial soil Information about diet and paleoenvironment,” *American Journal of Physical Anthropology*, 1996, 101, pp.101–113。
- [20] a. 同 [1]；b. Pearsall D M, Piperno D R, *Current Research in Phytolith Analysis: Applications in Archaeology and Paleoecology*, University of Pennsylvania, 1993。
- [21] a. 同 [16]a；b. Weiner S, Albert R, “Study of

- phytoliths in prehistoric ash layers from Kebara and Tabun caves using a quantitative approach,” Meunier J D, Coline F, *Phytoliths, Applications in Earth Sciences and Human History*, A. A. Balkema Publishers, 2001, pp.251-266 ; c. Albert R, “Quantitative phytolith study of hearths from the Natufian and Middle Palaeolithic levels of Hayonim Cave (Galilee, Israel),” *Journal of Archaeological Science*, 2003, 30(4), pp.461-480.
- [22] Karkanas P, Rigaud J-P, Simek J F, et al. , “Ash bones and guano: a study of the minerals and phytoliths in the sediments of Grotte XVI, Dordogne, France,” *Journal of Archaeological Science*, 2002, 29(7), pp.721-732.
- [23] 高星、张双权、张乐等：《关于北京猿人用火的证据：研究历史、争议与新进展》，《人类学学报》2016年第4期。
- [24] 同 [16]b。
- [25] 同 [16]c。
- [27] 赵举兴、陈泉霖、张书光等：《福建省万寿岩遗址船帆洞植硅体组合特征及其环境意义》，《海洋地质与第四纪地质》2023年第2期。
- [28] a. Liu L, Duncan N A, Chen X, et al. , “Plant domestication, cultivation, and foraging by the first farmers in early Neolithic Northeast China: Evidence from microbotanical remains,” *The Holocene*, 2015, 25(12), pp.1965-1978; b. Reinhard K J, Danielson D R, “Pervasiveness of phytoliths in prehistoric southwestern diet and implications for regional and temporal trends for dental microwear,” *Journal of Archaeological Science*, 2005, 32(7), pp.981-988; c. Gobetz K, “Implications for Late Pleistocene Mastodon diet from opal phytoliths in tooth calculus,” *Quaternary Research*, 2001, 55(2), pp.115-122.
- [30] a. 同 [3]b ; b. Tsartsidou G, Lev-Yadun S, Albert R M, et al. , “The phytolith archaeological record: strengths and weaknesses evaluated based on a quantitative modern reference collection from Greece,” *Journal of Archaeological Science*, 2007, 34(8), pp.1262-1275.
- [32] a. 同 [3]b ; b. 邱振威、庄丽娜、林留根：《江苏泗洪韩井遗址水稻驯化的植硅体证据及相关问题》，《东南文化》2018年第1期。
- [33] 同 [3]b。
- [34][43][73][74][79] 中国国家博物馆、河北省文物考古研究院、张家口市文物考古研究所等：《河北康保县兴隆遗址2018~2019年发掘简报》，《考古》2021年第1期。
- [35][36][37]a. 盛学斌、孙建中、刘云霞等：《坝上地区古土壤环境变化信息研究》，《土壤与环境》2000年第2期；b. 孙建中、杨明华、盛学斌等：《河北坝上地区脆弱生态环境特征》，《中国沙漠》1994年第4期。
- [38][64][71] 内蒙古自治区文物考古研究所、乌兰察布市博物馆、化德县文物管理所：《内蒙古化德县裕民遗址发掘简报》，《考古》2021年第1期。
- [39] 内蒙古自治区文物考古研究所、故宫博物院、乌兰察布市博物馆等：《内蒙古化德县四麻沟遗址发掘简报》，《考古》2021年第1期。
- [40] 内蒙古自治区文物考古研究所：《内蒙古自治区文物考古研究所“十三五”考古新发现与“十四五”前景展望》，《内蒙古日报》，2020年11月24日第7版。
- [41] a. 张家口市文物考古研究所：《河北尚义县四台新石器时代遗址发掘简报》，《考古》2018年第4期；b. 河北省文物考古研究院、张家口市文物考古研究所、尚义县文化广电和旅游局：《河北尚义县四台新石器时代遗址》，《考古》2023年第7期。
- [42] 冯玥：《晚更新世末华北细石器及人群与社会变迁》，《考古》2024年第3期。
- [44] 中国国家博物馆、河北省文物考古研究院、张家口市文物考古研究所等：《河北康保兴隆遗址南部冲沟2022—2023年发掘简报》，《中国国家博物馆馆刊》2025年第1期。
- [45] a.Reimer P J, Austin W E N, Bard E, et al. , “The IntCal20 Northern Hemisphere radiocarbon age calibration curve (0-55 cal kBP),” *Radiocarbon*, 2020, 62(4), pp.725-757; b. Bronk Ramsey C, *OxCal 4.4.4 Calibration Program*, <https://c14archoxacuk/oxcal/OxCal.html>, 2021.
- [47] 赵娜、王建平、郭明建：《河北康保兴隆遗址的光释光测年研究》，《第四纪研究》2022年第5期。
- [48] a.Locatelli E, *Tilia Help Manual*, Illinois State Museum, 2011; b. Grimm E C, *Tilia and Tilia Graph v. 2.0.2*, Illinois State Museum, 2004.
- [49] Grimm E C, “CONISS: a FORTRAN 77 program for stratigraphically constrained cluster analysis by the method of incremental sum of squares,” *Computers and Geosciences*, 1987, 13(1), pp.13-55.

- [51] a. Georg I, Renate S, Marcio C, et al., "Formation of spicules by sclerocytes from the freshwater sponge *Ephydatia muelleri* in short-term cultures in vitro," *In Vitro Cellular & Developmental Biology Animal*, 1995, 31(7), pp.528-535; b. Gist Gee N, "Fresh-water sponges," *The HongKong Naturalist*, 1931, pp.124-131.
- [52] 同 [35]a。
- [53] 翟秋敏、邱维理、李容全等：《内蒙古安固里淖—泊江海子全新世中晚期湖泊沉积及其气候意义》，《古地理学报》2000年第2期。
- [54] 齐惠慧、刘兴起、李华淑等：《河北安固里淖孢粉记录的晚冰期以来的植被演替与气候变化》，《第四纪研究》2018年第5期。
- [55][81] 刘林敬、李长安、介冬梅等：《中—晚全新世以来安固里淖气候演变的植硅体记录》，《地球科学》2018年第11期。
- [56] 邱维理、翟秋敏、扈海波等：《安固里淖全新世湖面变化及其环境意义》，《北京师范大学学报》（自然科学版）1999年第4期。
- [57][78] Wang H, Liu H, Zhu J, et al., "Holocene environmental changes as recorded by mineral magnetism of sediments from Anguli-nuur Lake, southeastern Inner Mongolia Plateau, China," *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2010, 285(1), pp.30-49.
- [58][76]a. 同 [55]；b. 阳小兰、张茹春、张振等：《安固里淖湖近5000年来环境变化的孢粉及地球化学沉积记录》，《第四纪研究》2017年第1期。
- [59] 朱江玲、刘鸿雁、王红亚：《河北坝上地区湖泊沉积物记录的中全新世干旱气候》，《地理科学》2007年第3期。
- [60][65] 河北省文物考古研究院、张家口市文物考古研究所、尚义县文化广电和旅游局：《河北尚义县四台新石器时代遗址》，《考古》2023年第7期。
- [61] 陈宥成、曲彤丽：《试论华北旧石器时代晚期细石核的类型、组合与分期》，《考古》2022年第1期。
- [62] 曲彤丽、陈宥成：《史前骨柄石刃器与复合工具技术相关讨论》，《华夏考古》2022年第2期。
- [63][72][80] 邱振威、吴小红、郭明建等：《河北康保县兴隆遗址2018~2019年植物遗存浮选结果及分析》，《考古》2023年第1期。
- [66] Thomas E R, Wolff E W, Mulvaney R, et al., "The 8.2 ka event from Greenland ice cores," *Quaternary Science Reviews*, 2007, 26(1), pp.70-81.
- [67][82] Zhao K, Wei H, Zhao Z, et al., "Synchronous change in the intensified millet cultivation and ecological environment from the early to middle Holocene on the Inner Mongolia Plateau, northern China," *The Holocene*, 2023, 33(3), pp.347-354.
- [68][69][70] 沈慧、邱振威、赵克良等：《中国北方兴隆遗址早期农业人群对木材的利用和管理》，《中国科学：地球科学》2024年第6期。
- [75] a. Wu W, Zheng H, Hou M, et al., "The 5.5 cal ka BP climate event, population growth, circumscription and the emergence of the earliest complex societies in China," *Science China Earth Sciences*, 2018, 61(2), pp.134-148；b. 吴文祥、葛全胜：《全新世气候事件及其对古文化发展的影响》，《华夏考古》2005年第3期；c. 吴文祥、刘东生：《5500aBP气候事件在三大文明古国古文明和古文化演化中的作用》，《地学前缘》2002年第1期。
- [77] 吴文祥、刘东生：《4000a.B.P.前后降温事件与中华文明的诞生》，《第四纪研究》2001年第5期。

（责任编辑 赵婧）