



· 西北大学学报 110 周年刊庆 ·

从宏观到微观:土壤及沉积物的考古学研究进展

温 睿,祁学楷

(西北大学 文化遗产学院,陕西 西安 710127)

摘要 土壤或各类沉积物是考古发掘中最常见的物质,是各类考古遗存的载体,同时也是考古学研究的对象,蕴含着丰富的考古学信息。随着考古学研究方法和检测手段的快速发展,考古学研究对象由宏观层面拓展至分子级别的微观层面。以土壤或沉积物为对象的考古学研究也不断深化,呈现出精细化的趋势。目前考古土壤研究仍停留在宏观层面,微观研究尚处起步阶段。为实现从宏观到微观的跨越,该文系统梳理了考古土壤微观研究的 4 个方面——土壤地球化学研究、土壤微形态分析、沉积物古 DNA 研究和有机残留物分析。研究表明:①土壤地球化学利用元素异常分布推测人类活动,已应用于遗址勘探、功能区划分等;②土壤微形态揭示了自然与人为因素对土壤的影响,可用于环境考古研究;③沉积物古 DNA 实现对古代生物种属的识别,在古环境研究中应用广泛;④有机残留物分析可检测古代饮食、祭祀等活动的残留,为重建古代生产生活提供依据。该文认为上述 4 方面在考古土壤微观研究中发挥着重要作用,但尚未形成有机整体。因此,考古土壤微观研究应加强多学科综合研究,并探索统一的土壤保存方法,从而推动考古土壤研究从宏观走向微观,以发掘更丰富的考古信息。

关键词 考古土壤;地球化学分析;土壤微形态;沉积物古 DNA;有机残留物分析

中图分类号:K854 DOI:10.16152/j.cnki.xdxbzr.2023-06-005

From macro to micro: Advances in archaeological research on soil and sediment

WEN Rui, QI Xuekai

(School of Cultural Heritage, Northwest University, Xi'an 710127, China)

Abstract Soils and various sediments are the most common materials in archaeological excavations. They are not only the matrix for various archaeological remains, but also objects of archaeological research themselves, containing abundant archaeological information. With the rapid development of archaeological research methods and detection techniques, the scope of archaeological research continues to expand from the macro level to the micro level at the molecular scale. Archaeological research on soils and sediments has also become increasingly refined. However, current archaeological soil research still remains at the macro level, while micro-level research is still in its infancy. To achieve the leap from macro to micro, this study systematically reviews four aspects of microscopic archaeological soil research: soil geochemistry, soil micromorphology, sediment ancient DNA and organic residue analysis. The study shows that: ①soil geochemistry uses elemental anomaly distribu-

收稿日期:2023-10-09

基金项目:国家重点研发计划(2022YFF0903800)

第一作者:温睿,男,教授,博士生导师,从事科技考古及东西方物质文化交流研究,rwen80@163.com。

tions to infer human activities, and has been applied to site surveying and functional area delineation; ②soil micromorphology reveals the influence of natural and anthropogenic factors on soils, and can be used for environmental archaeology research; ③sediment ancient DNA enables identification of ancient biological species, which has been widely applied to ancient environmental research; ④organic residue analysis can detect remnants of ancient diet, rituals and other activities, providing evidence for reconstructing ancient production and living. In summary, the four parts above mentioned play important roles in microscopic archaeological soil research, but have not yet formed a system. This study suggests that archaeological soil microscopic research should strengthen multiproxy comprehensive research, explore unified soil preservation methods, so as to promote the transition of archaeological soil research from macro to micro, for excavating more abundant archaeological information.

Keywords archaeological soil; geochemical analysis; soil micromorphology; sediment ancient DNA; organic residue analysis

沉积物指任何可以通过水或其他流体运输的固体颗粒物(黏土、沙子、淤泥、砾石、树叶、贝壳和其他材料)构成的除水和岩石以外的所有地球表面,土壤指地球表面风化作用在原地产生的一种特殊的沉积物^[1]。沉积物的概念更为广泛,涵盖了地球表面包括陆地、海洋、湖泊等多种地质地貌现象,而土壤的概念相对较窄,更偏向于描述陆地表面矿物质、有机质、水、气体、生物体组成的复杂体系。虽然按照定义,目前绝大多数考古的遗迹遗物都是沉积的结果,但与古代人类生产生活关系更加密切且考古实践涉及较多的是土壤。因此,本文不强调土壤和沉积物区别之处统一使用“土壤”。此外,由于沉积物古DNA研究中已有使用“沉积物”一词概括土壤和沉积物的习惯,本文仍沿用“沉积物”。

在古代遗址中,土壤及各类沉积物是最普遍的各类型遗存的载体,通过观察土质、土色及包含物,以确定不同的文化层堆积或遗迹单位,实际是沉积物研究的一部分^[2]。同时,土壤及沉积物本身也是考古研究的样本,其考古学研究不断从宏观的土质、土色及包含物研究走向微观研究,包含以下3个方面。

1)考古土壤地球化学分析。主要通过分析考古土壤的磷酸盐和元素分布,探究人类活动对土壤中磷酸盐和元素分布的影响,从而为复原人类活动提供信息。

2)土壤微形态分析。将显微镜下观察、描述的土壤微形态特征及变化用来说明土壤生成、发育的演变规律,有助于了解一般自然力量或人为因素对土壤形成过程的影响^[3]。

3)不可见包含物研究。对于细胞这一级别

的包含物,主要通过植物微体化石分析(植物硅酸体、孢粉、淀粉粒)进行植物考古学研究。1992年中国学者正式提出植物考古学概念后,植物微体化石分析同植物大遗存研究快速发展和普及^[4]。在分子层面主要涉及有机残留物分析。先民在加工、利用和消费生物资源的过程中,相关的有机分子可能残存或沉积在器物、土壤、遗迹或人体组织等各种遗存上,其中经历长期埋藏而保存至今的有机物质统称为有机残留物^[5]。按照检测对象划分,有机残留物主要包含古代残留下的DNA、蛋白质、脂类、植物微体化石以及其他能够追溯生物来源的如有机酸、萜烯等的生物标记物^[6]。其中,植物微体化石分析方法属于植物考古学研究范畴,古DNA分析因其独特的聚合酶链式反应(PCR)扩增技术及其为人类演化研究带来的革命性影响而自成体系^[7],因而有机残留物分析主要指基于色谱质谱联用技术的蛋白质、脂类以及其他生物标记物分析。

随着考古学的发展,考古土壤的研究呈现出从宏观到微观、从无机到有机的发展趋势(见表1)。目前我国考古土壤研究涉及到上文提及的分析方法,在土壤宏观研究方面已取得显著进展,但在土壤微观研究方面发力不均衡,研究方向相互间缺少串联,没有形成系统。大量的土壤在考古过程中往往被处理掉或缺乏良好保存,其蕴含的考古信息一旦失去将产生不可逆的损失,与其他遗存相比重视程度严重不足。在考古土壤微观研究中,土壤地球化学、土壤微形态、沉积物古DNA和有机残留物分析能够有效挖掘考古土壤信息,提升土壤在考古研究中的重要性。本文将从以上4个方面梳理相关的研究史、实验手段以

及相关研究案例,探讨考古土壤微观研究形成有 发展。
机整体的可能性,以期推动考古土壤微观研究的

表 1 土壤及沉积物的考古学研究方法统计
Tab. 1 Methods for archaeological study on soils and sediments

研究方法	理化性质	外观形态	包含物		
			包含物分类	具体研究对象	大小
土壤 宏观 研究	/	土质、土色	可见遗存	无机质遗存:铜器、金器、铁器、陶瓷器、玉石器等;有机质遗存:食物、皮革、书画、漆木竹器、虫卵等	肉眼可见
土壤 微观 研究	土壤粒度、土壤磁化率、矿物组成、土壤元素	土壤微形态	不可见遗存	植物微体化石:植物硅酸体、孢粉、淀粉粒 有机残留物:DNA、蛋白质、脂肪酸、其他生物标记物	细胞级别 分子级别

1 土壤地球化学研究

包括磷酸盐分析和元素分析在内的考古土壤地球化学研究,不断为考古土壤和沉积物研究提供依据^[8]。由于考古遗址中人工建筑等遗迹为残留物创造了一个相对封闭的环境,明显减缓了残留物因自然风化从土壤中消失的速度,而人类活动对土壤的影响程度又远高于天然土壤,从而构成了土壤中化学残留物的两个形成机制^[9]。人类活动区域的有机残留物和元素残留物会积聚在地面的微观孔隙中,并吸附在亚微米土壤颗粒上,其他区域的化学成分则不会因活动而改变^[10]。因此,多样的人类活动引起所在环境土壤的地球化学元素变化,进而反映遗址过去的空间分布^[11]。在考古遗址没有被后来的现代化人类活动破坏的情况下,这些遗址的一系列元素浓度的变化已被证明可用于考古学分析^[12]。考古土壤地球化学分析以磷元素与磷酸盐分析为基础,加上磷元素以外的其他元素及多元素组合分析,可以进行遗址勘探和划定遗址边界^[9]并区分遗址中不同功能区^[10-11,13-14]。特别是在一些缺乏明显人工遗物的考古遗址中^[15],通过元素分析能提供额外证据,帮助考古学家判断遗迹现象和研究人类废弃物^[16-17]、食物残渣和粪便^[18]、施肥行为^[19-22]、金属冶炼和加工活动^[23-25]、陶瓷加工^[26]等和“居住效应”(habitation effect)^[12]相关的人类活动。

国外应用土壤地球化学分析进行考古学研究

已有百余年的历史。埃及农学家 Hughes 于 1911 年开创了土壤地球化学在考古学中的应用,他在考古遗址中观察到了磷酸盐的增强。然而真正系统性开展考古遗址土壤磷酸盐分析的是瑞典学者 Arrhenius,他在 20 世纪 20 年代和 30 年代对瑞典南部的广大地区进行了测绘,发现维京农场和居址遗骸区的土壤中磷含量异常高,并利用这一现象指导发现古代先民定居点^[27]。从 20 世纪 50 年代开始,开展了考古土壤中更为广泛的微量元素分析研究^[28],元素从磷元素拓展到铜、锌、氮、钙、镁、钾等,特别是 2000 年左右通过电感耦合等离子体质谱(ICP-MS)技术实现了更多元素的土壤分析,开始将元素分析拓展到钡、稀土元素(如镧、铈、镨、钕、钐、铕、钆和铈)等更多元素^[29]。随着考古土壤地球化学分析不断发展,近 10 年来有多位学者回顾总结该学科方向的进展^[8,28,30-31]。

国内运用土壤元素分析方法开展考古学研究起步较晚,主要是分析不同层位土壤化学成分(碳、氮、磷等元素和可溶性盐等),探究遗迹遗物功能^[32-33]以及各时期人类活动强度及其对土壤性质的影响^[34-37]等。国内学者先后两次对秦始皇帝陵墓封土进行土壤汞元素检测,结果表明封土中心部位存在强度较高且连片分布的汞异常,汞异常的范围局限在地宫范围内,证实了文献关于地宫中存在大量水银记载的正确性。此外,地宫内汞异常的分布状况和秦帝国版图内水系的分布有一致的对应关系,验证了《史记·秦始皇本纪》关于地宫中“以水银为百川江河大海,机相灌输”的记载(见图 1)^[38]。冶金是人类的重要发

明,古代冶金活动会造成环境土壤的重金属异常,通过检测这类重金属元素的异常分布可以推断古人冶炼活动的情况。河西走廊被认为是中国较早出现冶炼活动的地区,通过研究河西走廊新石器时代晚期到青铜时代地层土壤中重金属元素的异常分布,发现从公元前 4000 年到公元前 3400 年,该地区考古沉积物中重金属元素浓度增加,在公

元前 300 到公元前 2400 年期间有所下降,但仍然高于自然背景值,直接反映了当地先民冶炼活动强度的变化^[39-40]。关中地区商文化老牛坡遗址是商代重要青铜冶炼遗址之一,学者对遗址的地层剖面土壤进行取样,根据系列土壤样品的磁化率和重金属浓度分布来推测古人冶炼活动的范围和强度,为商代炼铜活动的研究提供依据^[41]。

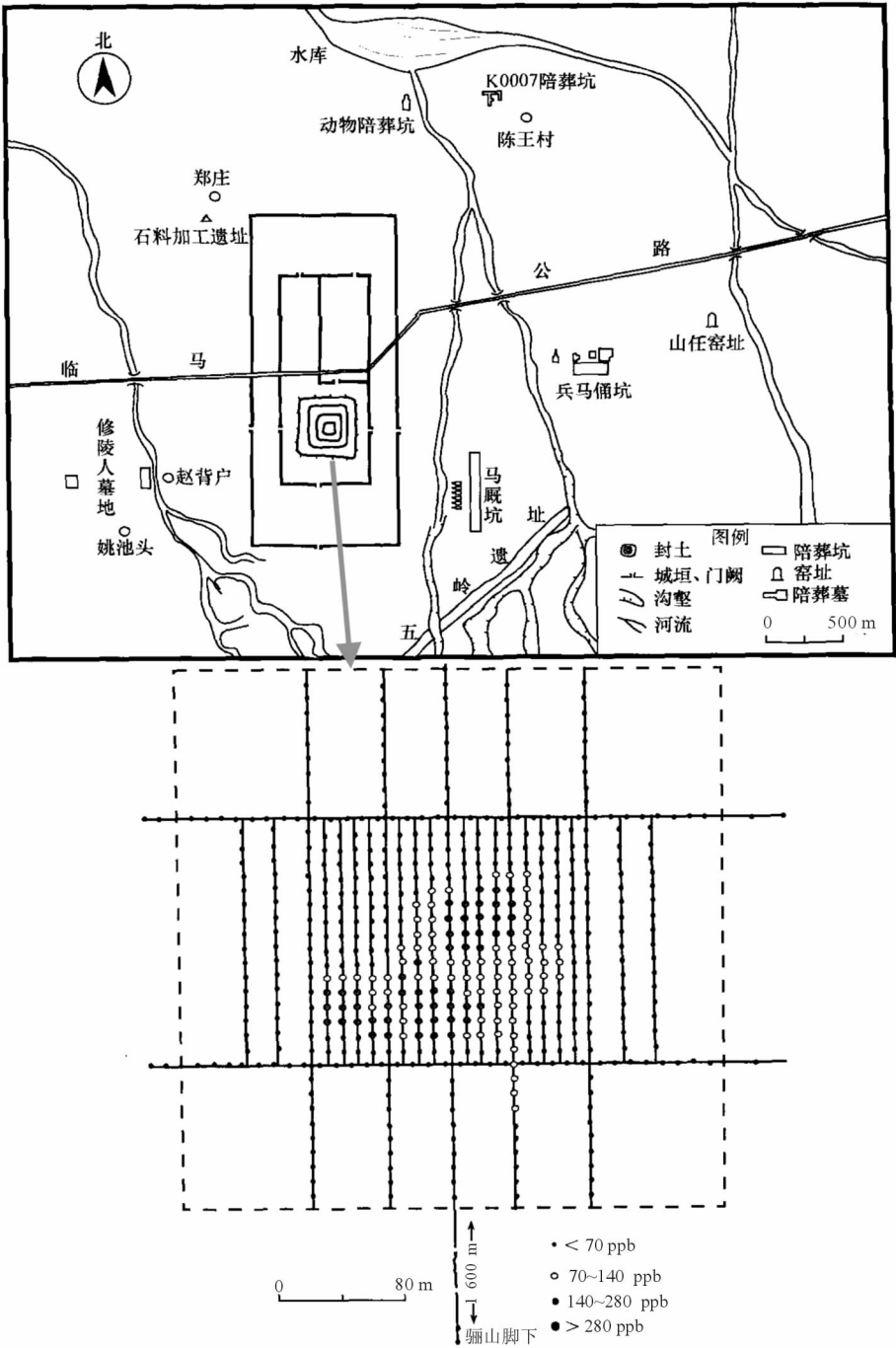


图1 秦始皇帝陵园遗址分布及封土汞元素含量分布^[38]

Fig.1 Distribution of the Emperor Qinshihuang's Mausoleum and distribution of Hg of the mound

土壤地球化学分析主要根据检测数据的异常分布来推测人类活动,不少学者探讨过其中的机

理。磷元素和磷酸盐在土壤元素分析中具有重要作用,是考古土壤分析中最常用的指示人类来源的指标^[30]。因为磷广泛存在于生物组织、骨骼、粪便、灰烬等有机物中^[42],这些有机物分解后会在土壤中积累,且磷在土壤中相对稳定,可存在于大多数土壤 pH 值范围内^[43]。除磷以外的其他元素与元素组合也是考古土壤地球化学研究中的重要指标。钙和锶也是考古遗址常见的元素,因为锶可能来源于骨骼^[44],钙来源于骨骼、灰烬和粪便^[45-46]。含量较高的钙、磷和锶是考古遗址常见的元素组合,三者通常表现出高度相似的分布模式,被认为与人类活动特别是食物加工和畜牧活动有关,而对于三者产生关联而形成强相关性元素组合的原因还缺乏合理的解释^[47-48]。Oonk 等总结了考古遗址和相关遗迹中土壤元素及元素组合的联系(见表 2)^[30]。此外,含量较高的锆元素可能反映遗址中存在的陶瓷遗存,而钾、钒、铬组合可能指示有机物和燃烧活动的存在^[47]。

表 2 考古遗迹和相关土壤元素

Tab. 2 Examples of archaeological sites and features, and associated element enrichments in their soils

考古遗迹	相关元素
墓葬	P, Cu, Mn, Ca
炉灶	P, K, Mg
垃圾堆/灰坑	P, K
房址	P, Ca, Mg, Fe, K, Th, Rb, Cs, Pb, Zn, Sr, Ba
带彩绘装饰的建筑	重金属元素
矿冶遗址	Cu, Pb, Mn
一般考古遗址	B, Cu, Mg, Mn, Ni, P, Se, Zn, K, Ba, Ca, Na

土壤地球化学检测方法也在不断完善。2013 年之前,检测方法主要有比色法、原子吸收光谱法(AAS)、电感耦合等离子体(ICP)光谱法(ICP-AES、ICP-OES 和 ICP-MS)。2013 年开始,由于测试成本低、测试速度快,便携式荧光光谱仪(pXRF)得到越来越广泛的应用,尤其适用于考古发掘现场的多元素分析^[49]。已有研究比较了常用的 AAS、ICP 和 pXRF 这 3 种方法,在元素分析方面具有足够的准确性,在测量磷元素方面可以与测量土壤和沉积物中磷含量的标准技术 ICP-OES 相媲美^[45,50]。Save 等使用 pXRF 对考古

遗址进行大规模地球化学调查,对测量方法、测量时间、测量后绘图和数据分析、测试周期和成本等进行了详细总结^[48]。pXRF 在土壤地球化学研究中具有很大潜力,因为 pXRF 检测速度快、成本低,可用于考古发掘现场原位检测,便于研究人员利用 pXRF 开展大规模检测分析,进而建立数据库开展大数据分析,以此为考古研究提供更多信息。

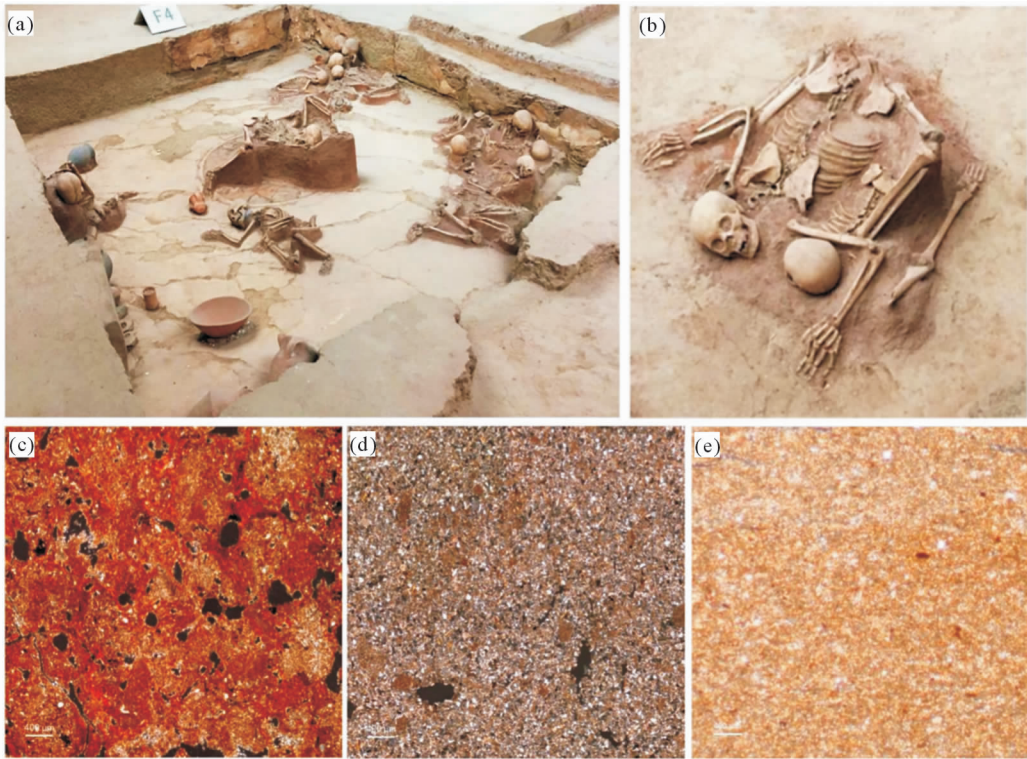
2 土壤微形态分析

土壤微形态分析是土壤科学的一个分支,其基本任务是将显微镜下观察、描述的土壤微形态特征及变化用来说明土壤生成、发育的演变规律,有助于了解一般自然力量或人为因素对土壤形成过程的影响。对于考古学而言,土壤微形态学可用于环境考古研究,即分析区域环境演化与考古遗址形成及考古学文化发展的关系,也可分析考古遗址内各类遗存的特征及其所反映的人类活动特点^[3]。对于土壤残留物分析来说,土壤微形态学能够从宏观层面为残留物分析提供依据,通过更为细致的观察为残留物所处微环境提供详细信息,通过分析土壤沉积和埋藏过程的变化来分析残留物所处环境的变化,通过土壤的物理、化学指标预判残留物类型。

靳桂云是最早倡导将土壤微形态分析应用到中国考古的学者,她介绍了土壤微形态分析的基本原理、采样和分析方法及在考古学中的优势,强调土壤微形态分析对环境考古、分析考古遗址内各类遗存的特征及其所反映的人类活动特点具有重要意义^[3]。此后,多位学者就土壤微形态在考古中的应用问题发表过综述文章^[51-54]。其中,姜钰等将考古文化遗址区按照功能分成用火相关区(灰烬层、火堆、火塘)、生活居住区、耕作区、墓葬区、制陶区、冶金区 6 种类型,并按照上述类型总结了土壤微形态分析的研究进展,提出建立不同古人类活动区对应的土壤微形态特征数字图像库^[55]。除综述外,国内学者也积极运用土壤微形态分析方法研究考古遗址形成的原因和过程。青海喇家遗址是一处新石器时代的灾难遗址,已有研究对于灾难的成因尚存在争议。对青海喇家遗址齐家文化地层之上的红色黏土进行土壤微形态分析方法发现,这些红色黏土层不具有古洪水沉积物的一般特征,属于典型的泥流沉积物,证明了

造成喇家遗址毁灭的直接原因是地震后突发的暴雨泥石流(见图2)^[56]。古代壕沟从建造到废弃的过程在一定程度上能够反映当时的社会组织变迁。通过土壤微形态分析对河南禹州瓦店遗址龙山文化壕沟采集的系列样品进行观察和分析,发

现瓦店龙山文化壕沟是直接和古颍河河道相通的水利设施,起到引水排灌作用,历经连续的维护和使用,被废弃后又再度开发利用,重建了壕沟从建造、使用、维护及废弃到再利用的完整生命周期^[57-58]。



注:(a)喇家遗址灾难遗迹;(b)遗迹中的人类遗骸,红色黏土覆盖人类遗骸;(c)覆盖喇家遗址人类遗骸的红色黏土;(d)喇家遗址马兰黄土;(e)喇家遗址上游积石峡堰塞湖沉积层。

图2 喇家遗址灾难遗迹及灾难成因研究的相关土壤微形态照片^[56]

Fig. 2 Photographs of the human remains at the Lajia Ruins exposed by archaeological excavations and photographs of soil micromorphology related to the study of the causes of the disaster

国际上土壤微形态学在考古学领域的应用包括环境考古、农业考古、城市考古及遗物微环境。Lang 和 Stump 利用土壤微观形态研究坦桑尼亚 Engaruka 遗址的灌溉情况,证明该遗址自然降水足以维持当地农业发展,形成类似稻田的土壤环境,驳斥了当地农业必须有人工灌溉的假设^[59]。Wouters 等通过土壤微观形态分析,研究了11到15世纪比利时 Lier 地区的考古遗址地层形成过程,揭示了该地区从农业活动区域到城市市场区域的转变^[60]。Goldberg 和 Berna 采用土壤分析的方法记录考古出土遗物所处的微环境及特征,并用该方法更为准确的解释考古记录^[61]。Gutiérrez-Rodríguez 等提出倡议,将土壤微形态的高分辨率动态图用于出版物中并共享研究数据^[62]。

3 沉积物古 DNA 研究

古 DNA 不仅存在于考古出土的动物骨骼、植物遗存中,也存在于古代沉积物中,被称为沉积物古 DNA(sediment ancient DNA, sedaDNA)^[63]。古环境 DNA(ancient environmental DNA/palaeoenvironmental DNA, ancient eDNA)是散布于古环境样品中的生物古 DNA^[64],与沉积物古 DNA 的概念基本一致,因而国内外学者经常将这两者混用。这些 DNA 主要是从冰川、冻土、湖泊沉积物、泥炭沉积物、遗址文化层、牙结石、粪便化石等环境样品中提取得到的混合了古代动物、植物和微生物等遗传信息的古 DNA^[64-65],它们随着生物的遗留物质(遗体、毛发、粪便和尿液等)进入环境并迅

速降解、缓慢变性,最终吸附在矿物等颗粒上,或者被微生物整合到自身基因组上而长期保存^[66]。沉积物古 DNA 分析发轫于 1998 年^[67-68],发展至今形成了宏条形码技术(metabarcoding)和鸟枪法宏基因组(shotgun metagenomic)技术为主流的检测方法^[69-70]。宏条形码技术属于靶向分析方法,使用特异性引物对目标生物类群的基因进行扩增,并通过高通量测序技术增加测序深度,获得主要生物类群的分类信息^[71-72]。鸟枪法宏基因组技术属于非靶向分析方法,将环境中的全部生物遗传物质通过高通量技术进行测序,然后通过生物信息学算法将这些遗传信息与标准数据库比对,将基因信息破译为物种组成信息,从而分析古环境生物群落的组成^[73-74]。

国内学者侯卫国等在 2017 年撰写的关于沉积物古 DNA 的综述文章强调了沉积物 DNA 在古生态、古环境和古气候研究中的应用,但并未涉足在考古学研究中的应用^[75]。2020 年,顾政权等从技术发展、研究方法、应用方向和存在问题等方面详细介绍了古环境 DNA 及其在环境考古中的应用,总结了国外采用较为成熟的条形码技术和宏基因组技术开展的分析案例,研究对象包括冻土、湖泊沉积物、冰川下沉积物、粪便化石、牙结石等古环境样品,在古生态环境重建、古代农业发展、古代人类食性、人类扩散历史和人类活动对环境影响等环境考古领域取得了良好进展并发表了大量研究成果^[66]。国内关于沉积物古 DNA 的考古学研究尚处于起步阶段,但前景广阔。第一个成功案例是甘肃白石崖溶洞沉积物的相关研究。通过对溶洞沉积物古 DNA 的分析,研究人员成功提取并确认了属于丹尼索瓦人的线粒体 DNA,这是首次在俄罗斯丹尼索瓦洞之外找到丹尼索瓦人的 DNA(见图 3)^[76]。顾政权等将沉积物古 DNA 技术应用于西藏廓雄遗址(3 160 ~ 2 954 cal a BP)的调查剖面,鉴定出的大麦等农作物和绵羊等家养动物与考古发现的动植物遗存相印证。此外还发现了粟以及多种与农作物伴生的微生物,其中粟在大植物遗存中并没发现,这显示了沉积物古 DNA 技术具有通过旷野遗址文化堆积物复原其中动植物种属信息的潜力^[77]。

沉积物古 DNA 分析与土壤微形态、生物标记物分析等方法相互结合,能够挖掘更多的考古信息。有学者通过古 DNA 分析和脂质分析鉴定湖泊沉积物中的生物来源并将结果相互印证,为先

民定居和动植物管理提供直接证据^[78]。Morley 等在丹尼索瓦洞中进行土壤微形态分析研究时发现,土壤微形态分析可以帮助确定沉积物中有利于保存古 DNA 的区域^[79]。Massilani 等借鉴土壤微形态中的方法,尝试用树脂包埋的方式保存和固定沉积物样品,结果表明该方法便于进行古 DNA 保存,且 DNA 在沉积物中的迁移程度较小^[80]。

4 有机残留物分析

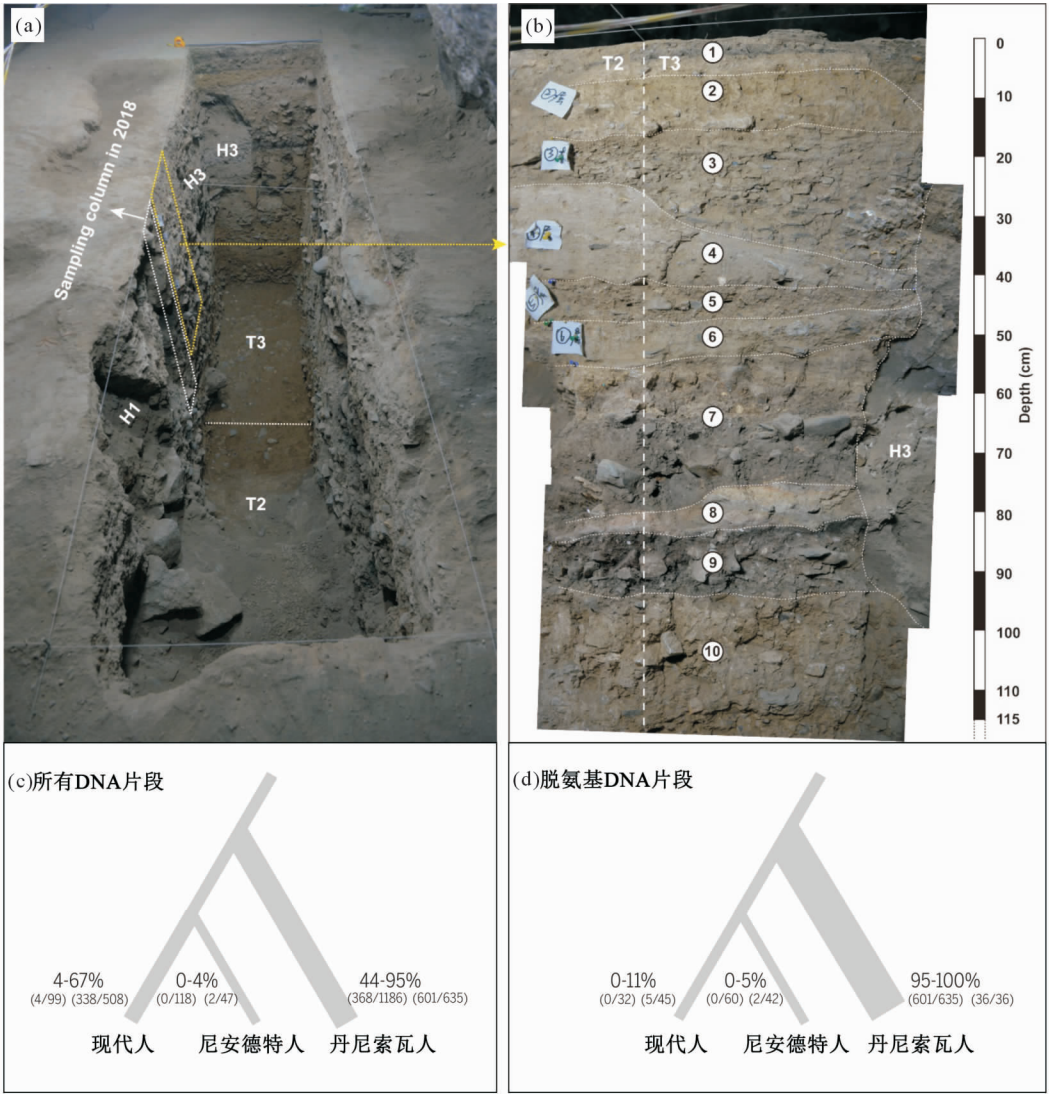
这里的有机残留物是指除 DNA 外的蛋白质、脂类分子和其他生物标记物。经过几十年的发展,目前陶器吸附残留物的研究已经成为考古有机残留物分析中的显学,特别是陶器吸附脂质的研究,方法成熟,成果丰硕。陶器吸附蛋白质和其他生物标记物(如黍素),也有不少成功鉴定的案例^[81-82]。相比之下,考古土壤中的有机残留物研究则十分薄弱。特殊的矿物结构能够为陶器壁内部有机残留物分子提供保护,从而减少有机残留物降解^[83]。与陶器相比,考古土壤的两个特点导致其有机残留物分析更加困难。①陶器的成分相对单一,不同地区的考古遗址土壤或沉积物组成复杂且差异巨大。②陶器内壁提供了相对封闭的空间,而土壤或沉积物的环境更加开放,存在多种导致有机物分子降解的因素。此外,有机残留物在土壤中降解后,很容易和其他分子混杂,从而难以区分出古代残留物,目前主要依靠考古学背景和设置阴性对照来区分古代和现代有机物分子,通过残留物本身的特征直接区分的相关研究还需加强。古代 DNA 可以通过特有的损伤模式识别^[84],蛋白质、脂类和其他生物标记物还缺乏十分成熟的直接判断方法。区分古代蛋白质可以通过评估蛋白质老化程度实现,目前有 3 种方法,分别是检测蛋白质降解的脱酰胺率、氨基酸外消旋分析和氨基酸单体碳同位素测年^[85-87]。

4.1 考古土壤中脂质残留物研究

脂质具有疏水性,在水中溶解度低,并且容易和土壤有机物聚集和胶联形成物理屏障,从而限制微生物的降解,可使脂质残留物能够在沉积物中保存长达百万年^[88]。土壤中脂质的检测方法借鉴了成熟的陶器吸附脂质残留物的检测方法,普遍采用基于气相色谱(gas spectrometry, GS)的分析方法,除气相色谱外还包括气相色谱火焰离

子化检测器联用 (GC-FID)、气相色谱质谱联用 (GC-MS)、气相色谱燃烧同位素质谱联用 (GC-C-IRMS) 等。Green 曾对考古土壤脂质残留物开展系统性研究,通过对众多墓葬尸骨周边土壤进行

系统性采样和脂质分析,发现一些列包括脂肪酸、甾醇、树脂酸、正构醛、正构烷烃等在内的生物标记物^[89]。国外学者运用土壤脂质分析方法主要解决以下 2 个考古学问题。



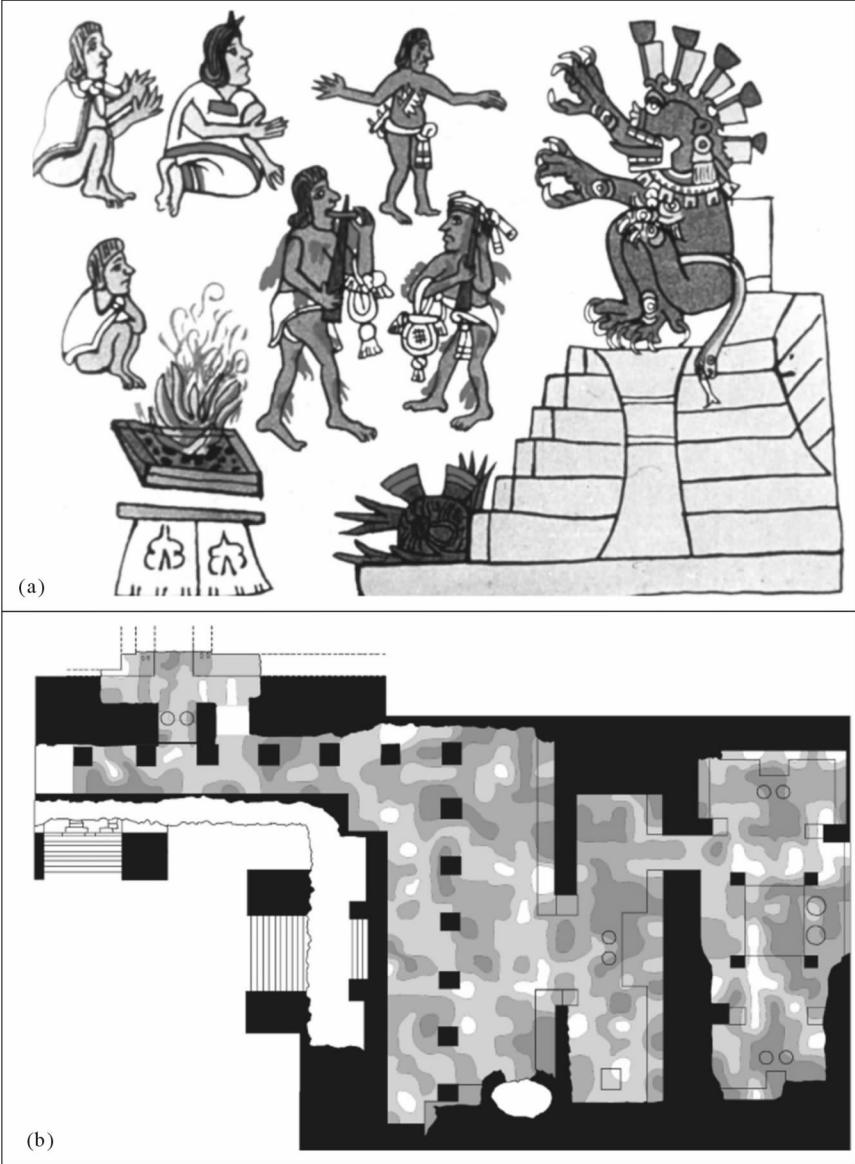
注:(a)白石崖溶洞发掘现场;(b)白石崖溶洞发掘现场沉积物地层,其中丹尼索瓦人 DNA 发现于沉积物地层 2、3、4、7;(c)沉积物地层 4 中所有 DNA 片段的谱系推断;(d)沉积物地层 4 中脱氨基 DNA 片段的谱系推断。

图 3 白石崖溶洞丹尼索瓦人 DNA 的取样位置和谱系推断^[76]

Fig. 3 Sampling locations and lineage inferences of Denisovan DNA from Baishiya Karst Cave

1) 研究古代食物及加工利用方式。Heron 等学者使用 GCMS 的脂质分析结合碳氮稳定同位素 ($\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$) 分析对挪威北极地区约 900 ~ 1 700 BP 的长方形坑中的胶结状沉积物和木炭展开分析,检测出长链不饱和脂肪酸和异戊烯脂肪酸,以及不饱和酸的氧化和热分解产物,如二羧酸 (dicarboxylic acid)、二羟基脂肪酸 (dihydroxyfatty acid) 和 ω -(邻烷基苯基) 烷酸 (ω -(o-alkylphenyl)

alkanoic acid), 指示了水生生物脂肪的存在,从而推断这些坑是先民加工海洋动物油脂的场所^[90]。古代食物的一种特殊使用情况是作为祭祀时的祭品。通过对墨西哥城阿兹特克神庙内不同区域地面脂质残留物的分析,研究人员确认了脂质浓度高的区域为先民祭祀活动中放置祭品的祭台所在 (见图 4)^[91]。



注:(a)Tudela 法典中记录的阿兹特克人在神灵前的放血仪式;(b)阿兹特克神庙旁雄鹰勇士之家地面脂肪酸分布图。颜色较深的区域代表脂质含量较高。

图4 阿兹特克人祭祀仪式图像和祭祀所在地面的脂肪酸分布^[10]

Fig.4 Image of Aztec rituals and fatty acid distribution in the floor of the ritual site

2) 炉灶遗迹的研究。Lejay 先后做过两次炉灶模拟实验,探究了使用木材和动物骨骼作为燃料加工肉类后炉灶土壤中脂质残留物的差异,完善了炉灶加工肉类后有机残留物的特征数据库,包括支链二元酸、酮、短链酸和正烷烃/正烯烃双酯等动物脂肪的受热产物^[92-93]。Buonasera 也开展过类似的模拟实验,进一步测试了残留物不同层位的温度,为残留物受热分解提供依据,并采用土壤微形态方法观察炉灶沉积物空间形态和组成,指出某些对称和轻微不对称饱和长链酮类(14-nonacosanone、16-hentriacontanone、16-tritria-

contanone 和 18-pentatriacontanone),特别是与十七烷(C_{17} 正构烷烃)一起存在,是陆生动物脂肪热降解的分子指标^[94]。

4.2 考古土壤中蛋白残留物研究

相较于脂质,蛋白质和糖类更容易因化学变化和微生物的影响而降解,其保存潜力不如脂质^[95]。然而,蛋白质可通过吸附在黏土和腐殖质上从而得到保存,其中角质蛋白在考古土壤中已成功检测到^[96-97]。整体而言,考古土壤蛋白的研究尚不成熟,研究案例较少,研究方法仍然以古蛋白分析方法为主,包括氨基酸分析、免疫学方法和

蛋白质组学分析(包括肽质量指纹图谱分析、自下而上和自上而下的液相色谱质谱联用(LC-MS/MS)分析)^[98]。

1996年,Evershed通过直接水解粉末状土壤和陶器样品,并通过高效离子交换色谱对一批萨克逊晚期/中世纪早期陶器及相关墓葬土壤进行蛋白质和氨基酸分析。结果表明,检测到的微量氨基酸和蛋白质难以作为考古解释的证据,只有两件陶器中检测到的明胶可以作为微量动物胶原蛋白的证据^[99]。这是首个考古土壤蛋白研究的案例。2012年,Oonk等通过牛血清蛋白在不同类型土壤中的埋藏进行模拟实验,探究不同溶剂的提取效果,并将结果应用于古罗马一处房址地板的研究中,检测到了古代残留的角质蛋白,并提出角质蛋白可能成为考古居址的生物标记物^[96]。尽管该研究考古意义有限,但这是首次将蛋白质组学方法应用于考古土壤研究的案例。此后,有研究使用靶向分析的方法,采用专为识别熟制动物材料而设计的ELISA(酶联免疫)试剂盒和蛋白质组学技术,检测捷克Katovice附近的一处中世纪早期遗址(公元9—10世纪)的陶器吸附和所在地层的土壤样本中的蛋白残留物,鉴定出陶器吸附了熟制的猪肉蛋白残留,通过对照土壤中含有未经加工的猪蛋白残留,判断其可能来自于野猪的粪便^[100]。

4.3 考古土壤中生物标记物分析

除上文提及的脂质分析中的一些生物标记物[如指示水生生物的 ω -(邻烷基苯基)烷酸]外,考古土壤中的相关生物标记物种类较少。具有高水溶性的生物标记物在受到地下水影响的考古土壤中难以保存^[101],包括常作为识别酒类残留物的有机酸(酒石酸、琥珀酸、马酸、富马酸、柠檬酸等)^[102]。考古沉积物中发现较多的是粪便生物标记物,包括coprostanol、 β -stigmastanol、 5β -stanols、24-ethylcoprostanol等^[103-104],其中24-ethylcoprostanol来源于食草动物粪便^[105]。Shillito等利用粪便生物标记分析确认了约14万年前Paisley洞穴中存在人类,证实了之前对相同粪化石进行的古DNA分析结果^[106]。Evershed等根据类固醇生物标志物含量来区分考古遗址土壤中不同粪便的输入来源,结果表明,人类(杂食动物)与反刍动物(食草动物)的粪便可以区分,人类粪甾醇(coprostanol)与 5β -stigmastan- 3β -ol的比例约为5.5:1,而反刍动物这一比例约为1:4^[107]。Prost

等也试图通过对土壤中不同家畜粪便残留物中类固醇(Δ^5 sterols, 5α -stanols, 5β -stanols, epi- 5β -stanols, stanones和胆汁酸(bile acids))的分类来区分动物来源,但同时指出,类固醇生物标记物在降解后会失去特异性,因此很难应用于考古研究,只有胆汁酸具有良好的鉴定效果^[108]。此外,烷基酰胺(alkyl amides)在考古和古环境研究中可能具有作为新生物标志物的潜力,其在考古地层中的变化可以指示环境差异,这在安徽蒙城县尉迟寺考古遗址的沉积物研究中得到了验证^[109]。

5 总结与展望

土壤是考古遗址中最常见的各类遗迹和遗物载体,同时其本身也是重要的考古研究材料。以考古土壤自身为研究对象,通过土壤地球化学分析、土壤微形态分析、沉积物古DNA分析和有机残留物分析这4种研究方法,可发掘更多考古潜信息,逐渐将考古学研究对象从宏观拓展到微观。从研究趋势来看,考古土壤研究在以下几个方面需要持续发力。

1)多方法综合研究。国外学者将多种研究方法综合应用于同一考古学问题研究称为多方法(multi-proxy)研究。考古土壤是古代遗留下的各种遗存及其残留物的综合反映,将上述各研究方法按照需要汇聚并开展多方法研究,才能充分挖掘考古土壤信息,有效解决考古学问题。上文提及的一些研究或多或少涉及到多方法研究,不少学者也主动开展多方法研究,包括地球化学和土壤微形态分析相结合^[110-111],生物标记物、土壤微形态、植物微体化石分析相结合^[112],土壤微形态和植物微体化石分析相结合^[113],生物标记物和古DNA分析相结合^[114]等,这已成为考古土壤研究的趋势。

2)考古土壤保存方法研究。考古土壤研究中的DNA、蛋白质、脂质等有机残留物均易污染、易降解,需要相对严格的防污染和保存措施。目前的保存方法可以参考已有的古DNA^[68]、蛋白质^[85]、脂质^[115]的保存方法。然而,不同保存条件对古DNA、蛋白质、脂质等残留物的具体影响机制和它们降解的规律尚未厘清。同时,不同方法的有机结合也是值得探索的方向。近期,有研究借鉴土壤微形态的树脂包埋方法固定和保存沉积物古DNA^[80],对于树脂包埋脂质也有初步尝

试^[116],树脂包埋是否能成为保存考古土壤的统一方法是值得探索的方向。

3) 土壤有机残留物研究。在考古土壤有机残留物研究中,沉积物古 DNA、脂质分析的方法比较成熟,而考古土壤蛋白质的研究在方法上仍处于起步阶段,亟待加强研究。生物标记物数据库也需要扩充成为提高分析效率的工具,这有赖于从更多已经验证的考古研究中进行总结,以及通过开展模拟老化实验的方式来发现。

国内开展考古土壤研究具有良好的基础。首先,残留物分析在考古遗址发掘中日益受到重视,考古遗址内样品尽可能全部留存也成为一种趋势,2021 年开始的四川广汉三星堆祭祀区发掘是这一趋势下的成功实践。其次,考古土壤的分析方法可继承已有的残留物分析方法,因为土壤中的残留物类型与已有的残留物分析内容有重合,不少高校和科研院所已经配备了相关科技检测设备,积累了数据和经验。最后,土壤微形态分析、沉积物古 DNA 分析等研究方法日趋成熟,在考古中的应用案例日益增多,为考古土壤分析创造了条件。已有研究充分说明,考古土壤具有重要的研究价值,若在考古发掘中给予重视、妥善保存,能有效扩大考古研究对象,助力考古信息挖掘,为考古和文物保护研究提供依据。

参考文献

- [1] PRICE T D , BURTON J H. Archaeological materials [M] // An introduction to archaeological chemistry. New York, NY: Springer, 2011: 41-72.
- [2] 《考古学概论》编写组. 考古学概论[M]. 北京: 高等教育出版社, 2018: 221.
- [3] 靳桂云. 土壤微形态分析及其在考古学中的应用[J]. 地球科学进展, 1999, 14(2): 197-200.
JIN G Y. Soil micromorphology in archaeology [J]. Advance in Earth Sciences, 1999, 14(2): 197-200.
- [4] 赵志军. 植物考古学: 理论、方法和实践[M]. 北京: 科学出版社, 2010: 7-9.
- [5] 杨益民. 中国有机残留物分析的研究进展及展望[J]. 人类学学报, 2021, 40(3): 535-545.
YANG Y M. The research progress and prospect of organic residue analysis in China[J]. Acta Anthropologica Sinica, 2021, 40(3): 535-545.
- [6] 杨益民. 古代残留物分析在考古中的应用[J]. 南方文物, 2008(2): 20-25.
YANG Y M. The application of ancient residue analysis in archaeology[J]. Cultural Relics in Southern China, 2008(2): 20-25.
- [7] EVERSHED R P. Organic residue analysis in archaeology: The archaeological biomarker revolution [J]. Archaeometry, 2008, 50(6): 895-924.
- [8] SALISBURY R. Advances in archaeological soil chemistry in central Europe [J]. Interdisciplinaria Archaeologica, Natural Sciences in Archaeology, 2020, XI(2): 199-211.
- [9] MIDDLETON W D , PRICE D T. Identification of activity areas by multi-element characterization of sediments from modern and archaeological house floors using inductively coupled plasma-atomic emission spectroscopy [J]. Journal of Archaeological Science, 1996, 23(5): 673-687.
- [10] PRICE T D , BURTON J H. Technology, function, and human activity [M] // An Introduction to Archaeological Chemistry. New York, NY: Springer, 2011: 1-24.
- [11] FERNÁNDEZ F G , TERRY R E , INOMATA T , et al. An ethnoarchaeological study of chemical residues in the floors and soils of Q'eqchi' Maya houses at Las Pozas, Guatemala [J]. Geoarchaeology, 2002, 17(6): 487-519.
- [12] ENTWISTLE J A , DODGSHON R A , ABRAHAMS P W. An investigation of former land-use activity through the physical and chemical analysis of soils from the Isle of Lewis, Outer Hebrides [J]. Archaeological Prospection, 2000, 7(3): 171-188.
- [13] VYNCKE K , DEGRYSE P , VASSILIEVA E , et al. Identifying domestic functional areas. Chemical analysis of floor sediments at the Classical-Hellenistic settlement at Düzen Tepe (SW Turkey) [J]. Journal of Archaeological Science, 2011, 38(9): 2274-2292.
- [14] SALISBURY R B. Interpolating geochemical patterning of activity zones at Late Neolithic and Early Copper Age settlements in eastern Hungary [J]. Journal of Archaeological Science, 2013, 40(2): 926-934.
- [15] SIMNIŠKYTĖ-STRIKAITIENĖ A , SELSKIENĖ A , VAIČIŪNIENĖ J , et al. Tracing archaeology through geochemistry: An example of a disturbed prehistoric hilltop settlement site in south-eastern Lithuania [J]. Interdisciplinaria Archaeologica, 2017, VIII(1): 17-33.
- [16] SOKOLOFF V P , CARTER G F. Time and trace metals in archaeological sites [J]. Science, 1952, 116(3001): 1-5.
- [17] GRIFFITH M A. A pedological investigation of an archaeological site in Ontario, Canada, II. Use of chem-

- ical data to discriminate features of the Benson site [J]. *Geoderma*, 1981, 25(1/2): 27-34.
- [18] BULL I D, EVERSLED R P, BETANCOURT P P. An organic geochemical investigation of the practice of manuring at a Minoan site on Pseira Island, Crete[J]. *Geoarchaeology*, 2001, 16(2): 223-242.
- [19] DAVIDSON D A, SIMPSON I A. The formation of deep topsoils in Orkney[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 1984, 9(1): 75-81.
- [20] DAVIDSON D A, HARKNESS D D, SIMPSON I A. The formation of farm mounds on the Island of Sanday, Orkney[J]. *Geoarchaeology*, 1986, 1(1): 45-59.
- [21] MILLER N F, GLEASON K L. The Archaeology of Garden and Field[J]. *American Antiquity*, 1994, 60(60): 235-237.
- [22] GLASER B. Prehistorically modified soils of central Amazonia: A model for sustainable agriculture in the twenty-first century[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series B, Biological Sciences*, 2007, 362(1478): 187-196.
- [23] DEGRYSE P, MUCHEZ P, WAELEKENS M. Identification of ore extraction and metal working in ancient times: A case study of Sagalassos (SW Turkey) [J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2003, 77(1): 65-80.
- [24] COOK S R, CLARKE A S, FULFORD M G. Soil geochemistry and detection of early Roman precious metal and copper alloy working at the Roman town of *Calleva Atrebatum* (Silchester, Hampshire, UK) [J]. *Journal of Archaeological Science*, 2005, 32(5): 805-812.
- [25] SCOTT C B. Integrating multi-scalar sampling strategies for archaeological sediment chemistry[J]. *Journal of Field Archaeology*, 2020(3): 1-20.
- [26] DIRIX K, MUCHEZ P, DEGRYSE P, et al. Multi-element soil prospection aiding geophysical and archaeological survey on an archaeological site in suburban Sagalassos (SW-Turkey) [J]. *Journal of Archaeological Science*, 2013, 40(7): 2961-2970.
- [27] BINTLIFF J, DEGRYSE P. A review of soil geochemistry in archaeology[J]. *Journal of Archaeological Science: Reports*, 2022, 43: 103419.
- [28] RIMMINGTON J N. The element composition of soils from archaeological landscapes in Boeotia, Greece: A critical evaluation of element soil analysis in the investigation landscapes co-ordinated with the archaeological survey of Boeotia, Greece [D]. Durham, UK: Durham University, 1998.
- [29] ENTWISTLE J A, ABRAHAMS P W, DODGSHON R A. Multi-element analysis of soils from Scottish historical sites. Interpreting land-use history through the physical and geochemical analysis of soil [J]. *Journal of Archaeological Science*, 1998, 25(1): 53-68.
- [30] OONK S, SLOMP C P, HUISMAN D J. Geochemistry as an aid in archaeological prospection and site interpretation: Current issues and research directions [J]. *Archaeological Prospection*, 2009, 16(1): 35-51.
- [31] PASTOR A, GALLELLO G, CERVERA M L, et al. Mineral soil composition interfacing archaeology and chemistry[J]. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 2016, 78: 48-59.
- [32] 赵春燕, 陈星灿, 刘莉. 东下冯遗址圆形建筑土壤的化学成分分析 [C] // 刘庆柱. 考古学集刊: 第18集. 北京: 科学出版社, 2010: 543-548.
- ZHAO C Y, CHEN X C, LIU L. The chemical composition analysis of the soil in the circular architectural foundation at Dongxiafeng site [C] // LIU Q Z. *Papers on Chinese archaeology: No. 18*. Beijing: Science Press, 2010: 543-548.
- [33] 赵春燕. 土壤元素化学分析在考古学研究中的应用 [EB/OL]. (2007-09-04) [2023-08-25]. <http://www.kaogu.cn/cn/kaogusuogaikuang/jigoushezhi/yewujigou/kaogukeji/news/2013/1025/31766.html>.
- ZHAO C Y. The Application of Soil Elemental Chemical Analysis in Archaeological Research [EB/OL]. (2007-09-04) [2023-08-25]. <http://www.kaogu.cn/cn/kaogusuogaikuang/jigoushezhi/yewujigou/kaogukeji/news/2013/1025/31766.html>.
- [34] 董广辉, 夏正楷, 刘德成, 等. 文明起源时期河南孟津地区人类活动对土壤化学性质的影响 [J]. *兰州大学学报(自然科学版)*, 2007, 43(1): 6-10.
- DONG G H, XIA Z K, LIU D C, et al. The impact of human activities on the chemical properties of paleosol in Mengjin, Henan Province during civilization [J]. *Journal of Lanzhou University (Natural Sciences)*, 2007, 43(1): 6-10.
- [35] 查理思, 吴克宁, 鞠兵, 等. 二里头文化遗址区土壤化学成分含量及变化研究 [J]. *土壤通报*, 2013, 44(6): 1414-1417.
- ZHA L S, WU K N, JU B, et al. Research on the chemical constituents' contents and changes of paleosol in Erlitou culture sites [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2013, 44(6): 1414-1417.
- [36] 查理思, 吴克宁, 冯力威, 等. 古人类活动对土壤发育的影响: 以河南仰韶村文化遗址为例 [J]. *土壤学报*, 2016, 53(4): 850-859.
- ZHA L S, WU K N, FENG L W, et al. Influence of

- ancient human activities on development of soil: A case study of Yangshao village cultural relic site, Henan Province[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2016, 53 (4): 850-859.
- [37] 李中轩, 朱诚, 张广胜, 等. 湖北辽瓦店遗址地层记录的环境变迁与人类活动的关系研究[J]. 第四纪研究, 2008, 28(6): 1145-1159.
- LI Z X, ZHU C, ZHANG G S, et al. Multi-element records of the deposits for ancient human activities at the Liaowadian site in Hubei Province[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2008, 28 (6): 1145-1159.
- [38] 段清波. 秦始皇帝陵园考古研究[M]. 北京: 北京大学出版社, 2011: 102-104.
- [39] ZHANG S, YANG Y, STOROZUM M J, et al. Copper smelting and sediment pollution in Bronze Age China: A case study in the Hexi Corridor, Northwest China [J]. *CATENA*, 2017(156): 92-101.
- [40] YANG Y S, DONG G H, ZHANG S J, et al. Copper content in anthropogenic sediments as a tracer for detecting smelting activities and its impact on environment during prehistoric period in Hexi Corridor, Northwest China [J]. *The Holocene*, 2017, 27 (2): 282-291.
- [41] WU M L, JIA Y N, ZHANG Y Z, et al. Heavy metal pollution from copper smelting during the Shang Dynasty at the Laoniupo site in the Bahe River valley, Guanzhong Basin, China [J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2021, 31(11): 1675-1693.
- [42] COOK S R, CLARKE A S, FULFORD M G, et al. Characterising the use of urban space: A geochemical case study from Calleva Atrebatum (Silchester, Hampshire, UK) Insula IX during the late first/early second century AD [J]. *Journal of Archaeological Science*, 2014(50): 108-116.
- [43] HOLLIDAY V T, GARTNER W G. Methods of soil P analysis in archaeology [J]. *Journal of Archaeological Science*, 2007, 34(2): 301-333.
- [44] WILSON C A, DAVIDSON D A, CRESSER M S. Multi-element soil analysis: An assessment of its potential as an aid to archaeological interpretation [J]. *Journal of Archaeological Science*, 2008, 35 (2): 412-424.
- [45] OONK S, SLOMP C P, HUISMAN D J, et al. Geochemical and mineralogical investigation of domestic archaeological soil features at the Tiel-Passewaaij site, The Netherlands [J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2009, 101(2): 155-165.
- [46] OONK S, SLOMP C P, HUISMAN D J, et al. Effects of site lithology on geochemical signatures of human occupation in archaeological house plans in the Netherlands [J]. *Journal of Archaeological Science*, 2009, 36 (6): 1215-1228.
- [47] GAUSS R K, BÁTORA J, NOWACZINSKI E, et al. The Early Bronze Age settlement of Fidvár, Vrábce (Slovakia): Reconstructing prehistoric settlement patterns using portable XRF [J]. *Journal of Archaeological Science*, 2013, 40(7): 2942-2960.
- [48] SAVE S, KOVACIK J, DEMARLY-CRESP F, et al. Large-scale geochemical survey by pXRF spectrometry of archaeological settlements and features: New perspectives on the method [J]. *Archaeological Prospection*, 2020, 27(3): 203-218.
- [49] LUBOS C, DREIBRODT S, BAHR A. Analysing spatio-temporal patterns of archaeological soils and sediments by comparing pXRF and different ICP-OES extraction methods [J]. *Journal of Archaeological Science: Reports*, 2016(9): 44-53.
- [50] FRAHM E, MONNIER G F, JELINSKI N A, et al. Chemical soil surveys at the Bremer Site (Dakota County, Minnesota, USA): Measuring phosphorous content of sediment by portable XRF and ICP-OES [J]. *Journal of Archaeological Science*, 2016 (75): 115-138.
- [51] 申朝瑞, 庞奖励. 土壤微形态学研究进展及前瞻 [J]. 固原师专学报, 2005, 26(6): 34-40.
- SHEN C R, PANG J L. Development and prospect of soil micromorphology [J]. *Journal of Guyuan Teachers College (Natural Science)*, 2005, 26(6): 34-40.
- [52] 徐祥明, 何毓蓉. 国外土壤微形态学研究的进展 [J]. 山地学报, 2011, 29(6): 721-728.
- XU X M, HE Y R. Review of soil micromorphology in foreign [J]. *Journal of Mountain Science*, 2011, 29 (6): 721-728.
- [53] 吴克宁, 王文静, 查理思, 等. 文化遗址区古土壤特性及古环境研究进展 [J]. 土壤学报, 2014, 51 (6): 1169-1182.
- WU K N, WANG W J, ZHA L S, et al. Review of paleosol and palaeoenvironment in ancient culture sites [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2014, 51 (6): 1169-1182.
- [54] 李海群. 土壤微形态分析在环境考古中的应用研究 [C]//中国人民大学北方民族考古研究所, 中国人民大学历史学院考古文博系. 北方民族考古(第4辑). 北京: 科学出版社, 2017: 143-149.
- LI H Q. Soil micromorphology analysis in the applica-

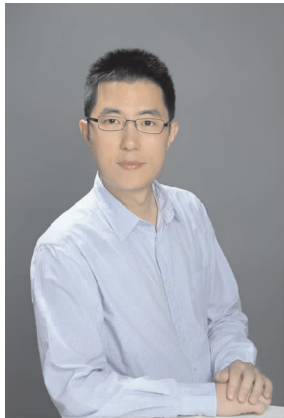
- tion of environmental archaeology research[C]// Institute of Northern Ethnicity Archaeology, Renmin University of China&Department of Archaeology and Museology, School of History, Renmin University of China. The Archaeology of Northern Ethnicity (No. 4). Beijing: Science Press, 2017:143-149.
- [55] 姜钰, 吴克宁, 查理思, 等. 土壤微形态分析在考古应用方面的研究进展[J]. 土壤通报, 2016, 47(4):1007-1015.
- JIANG Y, WU K N, ZHA L S, et al. Review of soil micromorphological analysis in archaeological research [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2016, 47(4): 1007-1015.
- [56] ZHANG Y Z, HUANG C C, PANG J L, et al. Identification of the prehistoric catastrophes at the Lajia Ruins using micromorphological analysis within the Guanting Basin, Minhe County, Qinghai Province[J]. Archaeological and Anthropological Sciences, 2018, 10(3): 711-723.
- [57] 张海, 庄奕杰, 方燕明, 等. 河南禹州瓦店遗址龙山文化壕沟的土壤微形态分析[J]. 华夏考古, 2016(4): 86-95.
- ZHANG H, ZHUANG Y J, FANG Y M, et al. Soil micromorphological analysis of Longshan culture moat at Wadian site, Yuzhou, Henan Province[J]. Huaxia Archaeology, 2016(4): 86-95.
- [58] ZHUANG Y, ZHANG H, FANG Y, et al. Life cycle of a moat: A detailed micromorphological examination and broader geoarchaeological survey at the late Neolithic Wadian site, Central China[J]. Journal of Archaeological Science: Reports, 2017(12): 699-711.
- [59] LANG C, STUMP D. Geoarchaeological evidence for the construction, irrigation, cultivation, and resilience of 15th-18th century AD terraced landscape at Engaruka, Tanzania [J]. Quaternary Research, 2017, 88(3): 382-399.
- [60] WOUTERS B, DEVOS Y, MILEK K, et al. Medieval markets: A soil micromorphological and archaeobotanical study of the urban stratigraphy of Lier (Belgium)[J]. Quaternary International, 2017(460): 48-64.
- [61] GOLDBERG P, BERNA F. Micromorphology and context[J]. Quaternary International, 2010, 214(1/2): 56-62.
- [62] GUTIÉRREZ – RODRÍGUEZ M, TOSCANO M, GOLDBERG P. High-resolution dynamic illustrations in soil micromorphology: A proposal for presenting and sharing primary research data in publication[J]. Journal of Archaeological Science: Reports, 2018(20): 565-575.
- [63] POLLARD A M, ARMITAGE R A, MAKAREWICZ C, et al. Handbook of archaeological sciences[M]. 2nd ed. New Jersey: John Wiley & Sons, 2023: 233.
- [64] RAWLENCE N J, LOWE D J, WOOD J R, et al. Using palaeoenvironmental DNA to reconstruct past environments: Progress and prospects[J]. Journal of Quaternary Science, 2014, 29(7): 610-626.
- [65] WILLERSLEV E, COOPER A. Ancient DNA[J]. Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences, 2005, 272(1558): 3-16.
- [66] 顾政权, 王昱程, 刘勇勤, 等. 古环境 DNA 与环境考古[J]. 第四纪研究, 2020, 40(2): 295-306.
- GU Z Q, WANG Y C, LIU Y Q, et al. Ancient environmental DNA and environmental archaeology [J]. Quaternary Sciences, 2020, 40(2): 295-306.
- [67] POINAR H N, HOFREITER M, SPAULDING W G, et al. Molecular coproscopy: Dung and diet of the extinct ground sloth *Nothotheriops shastensis* [J]. Science, 1998, 281(5375): 402-406.
- [68] COOLEN M J, OVERMANN J. Analysis of subfossil molecular remains of purple sulfur bacteria in a lake sediment[J]. Applied and Environmental Microbiology, 1998, 64(11): 4513-4521.
- [69] TABERLET P, COISSAC E, POMPANON F, et al. Towards next-generation biodiversity assessment using DNA metabarcoding[J]. Molecular Ecology, 2012, 21(8): 2045-2050.
- [70] KEY F M, POSTH C, KRAUSE J, et al. Mining metagenomic data sets for ancient DNA: Recommended protocols for authentication [J]. Trends in Genetics, 2017, 33(8): 508-520.
- [71] TABERLET P, COISSAC E, POMPANON F, et al. Towards next-generation biodiversity assessment using DNA metabarcoding[J]. Molecular Ecology, 2012, 21(8): 2045-2050.
- [72] SEERSHOLM F V, COLE T L, GREALLY A, et al. Subsistence practices, past biodiversity, and anthropogenic impacts revealed by New Zealand-wide ancient DNA survey[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2018, 115(30): 7771-7776.
- [73] PEDERSEN M W, RUTER A, SCHWEGER C, et al. Postglacial viability and colonization in North America's ice-free corridor[J]. Nature, 2016, 537(7618): 45-49.
- [74] QUINCE C, WALKER A W, SIMPSON J T, et al. Shotgun metagenomics, from sampling to analysis[J].

- Nature Biotechnology, 2017, 35(9): 833-844.
- [75] 侯卫国, 董海良, 蒋宏忱, 等. 沉积物中古 DNA 在古生态、古环境和古气候研究中的应用[J]. 地学前缘, 2017, 24(2): 286-291.
- HOU W G, DONG H L, JIANG H C, et al. Applications of ancient DNA preserved in sediment in paleo-ecology, paleo-environment and paleo-climate studies [J]. Earth Science Frontiers, 2017, 24(2): 286-291.
- [76] ZHANG D J, XIA H, CHEN F H, et al. Denisovan DNA in late Pleistocene sediments from baishiya Karst cave on the Tibetan Plateau[J]. Science, 2020, 370(6516): 584-587.
- [77] 顾政权, 高玉, 王一如, 等. 堆积物古 DNA 揭示西藏廓雄遗址的食物构成[J]. 中国科学(地球科学), 2023, 53(4): 823-835.
- GU Z Q, GAO Y, WANG Y R, et al. Food resources of the Khog Gzung site on the Tibetan Plateau revealed by sedimentary ancient DNA[J]. Science China Earth Sciences, 2023, 66(4): 840-851.
- [78] BROWN A G, HARDENBROEK V M, FONVILLE T, et al. Ancient DNA, lipid biomarkers and palaeoecological evidence reveals construction and life on early medieval lake settlements[J]. Scientific Reports, 2021(11): 11807.
- [79] MORLEY M W, GOLDBERG P, ULIYANOV V A, et al. Hominin and animal activities in the microstratigraphic record from Denisova Cave (Altai Mountains, Russia) [J]. Scientific Reports, 2019, 9: 13785.
- [80] MASSILANI D, MORLEY M W, MENTZER S M, et al. Microstratigraphic preservation of ancient faunal and hominin DNA in Pleistocene cave sediments[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2022, 119(1): e2113666118.
- [81] HENDY J, COLONESEA A C, FRANZ I, et al. Ancient proteins from ceramic vessels at Catalhöyük West reveal the hidden cuisine of early farmers[J]. Nature Communications, 2018(9): 4064.
- [82] HAN B, SUN Z W, CHONG J R, et al. Lipid residue analysis of ceramic vessels from the Liujiawa site of the Rui State (early Iron Age, North China) [J]. Journal of Quaternary Science, 2022, 37(1): 114-122.
- [83] EVERSHERD R P. Organic residue analysis in archaeology: The archaeological biomarker revolution[J]. Archaeometry, 2008, 50(6): 895-924.
- [84] JÓSSON H, GINOLHAC A, SCHUBERT M, et al. mapDamage2.0: Fast approximate Bayesian estimates of ancient DNA damage parameters[J]. Bioinformatics, 2013, 29(13): 1682-1684.
- [85] HENDY J, WELKER F, DEMARCHI B, et al. A guide to ancient protein studies[J]. Nature Ecology & Evolution, 2018, 2(5): 791-799.
- [86] HENDY J. Ancient protein analysis in archaeology [J]. Science Advances, 2021, 7(3): eabb9314.
- [87] CASANOVA E, KNOWLES T D J, MULHALL I, et al. Generation of two new radiocarbon standards for compound-specific radiocarbon analyses of fatty acids from bog butter finds[J]. Radiocarbon, 2021, 63(3): 771-783.
- [88] POYNTER J, EGLINTON G. The biomarker concept-Strengths and weaknesses [J]. Fresenius' Journal of Analytical Chemistry, 1991, 339(10): 725-731.
- [89] GREEN K A. The fate of lipids in archaeological burial soils[D]. York, UK: University of York, 2013.
- [90] HERON C, NILSEN G, STERN B, et al. Application of lipid biomarker analysis to evaluate the function of 'slab-lined pits' in Arctic Norway[J]. Journal of Archaeological Science, 2010, 37(9): 2188-2197.
- [91] BARBA L A, ORTIZ A, LINK K F, et al. Chemical analysis of residues in floors and the reconstruction of ritual activities at the templo mayor, Mexico [M] // ACS Symposium Series. Washington, DC: American Chemical Society, 1996: 139-156.
- [92] LEJAY M, ALEXIS M, QUÉNÉA K, et al. Organic signatures of fireplaces: Experimental references for archaeological interpretations[J]. Organic Geochemistry, 2016(99): 67-77.
- [93] LEJAY M, ALEXIS M A, QUÉNÉA K, et al. The organic signature of an experimental meat-cooking fireplace: The identification of nitrogen compounds and their archaeological potential[J]. Organic Geochemistry, 2019(138): 103923.
- [94] BUONASERA T, HERRERA-HERRERA A V, MALLOL C. Experimentally derived sedimentary, molecular, and isotopic characteristics of bone-fueled hearths[J]. Journal of Archaeological Method and Theory, 2019, 26(4): 1327-1375.
- [95] EVERSHERD R P. Biomolecular archaeology and lipids [J]. World Archaeology, 1993, 25(1): 74-93.
- [96] OONK S, CAPPELLINI E, COLLINS M C. Soil proteomics: An assessment of its potential for archaeological site interpretation[J]. Organic Geochemistry, 2012(50): 57-67.
- [97] FREI K M, FREI R, MANNERING U, et al. Provenance of ancient textiles: A pilot study evaluating the strontium isotope system in wool [J]. Archaeometry,

- 2009, 51(2): 252-276.
- [98] HENDY J. Ancient protein analysis in archaeology [J]. *Science Advances*, 2021, 7(3): eabb9314.
- [99] EVERSLED R P, TUROSS N. Proteinaceous material from potsherds and associated soils[J]. *Journal of Archaeological Science*, 1996, 23(3): 429-436.
- [100] PAVELKA J, SMEJDA L, KUCKOVA S, et al. Challenge to molecular archaeology-Sediments contaminated by allochthonous animal proteins[J]. *Journal of Liquid Chromatography & Related Technologies*, 2020, 43(19/20): 863-874.
- [101] WHELTON H L, HAMMANN S, CRAMP L J E, et al. A call for caution in the analysis of lipids and other small biomolecules from archaeological contexts [J]. *Journal of Archaeological Science*, 2021(132): 105397.
- [102] MCGOVERN A, ELMORE K L, GAGNE D J II, et al. Using artificial intelligence to improve real-time decision-making for high-impact weather[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2017, 98(10): 2073-2090.
- [103] CURTIN L, D' ANDREAW J, BALASCION L, et al. Sedimentary DNA and molecular evidence for early human occupation of the Faroe Islands[J]. *Communications Earth & Environment*, 2021(2): 253.
- [104] LAUERF, PROSTK, GERLACH R, et al. Organic fertilization and sufficient nutrient status in prehistoric agriculture? : Indications from multi-proxy analyses of archaeological topsoil relicts[J]. *PLoS One*, 2014, 9(9): e106244.
- [105] LEEMING R, BALL A, ASHBOLT N, et al. Using faecal sterols from humans and animals to distinguish faecal pollution in receiving waters [J]. *Water Research*, 1996, 30(12): 2893-2900.
- [106] SHILLITO L M, WHELTON H L, BLONG J C, et al. Pre-Clovis occupation of the Americas identified by human fecal biomarkers in coprolites from Paisley Caves, Oregon [J]. *Science Advances*, 2020, 6(29): eaba6404.
- [107] EVERSLED R P, BETHELL P H. Application of multimolecular biomarker techniques to the identification of fecal material in archaeological soils and sediments[M] // *ACS Symposium Series*. Washington, DC: American Chemical Society, 1996: 157-172.
- [108] PROST K, BIRK J J, LEHNDORFFE, et al. Steroid biomarkers revisited: Improved source identification of faecal remains in archaeological soil material[J]. *PLoS One*, 2017, 12(1): e0164882.
- [109] WANG J J, SIMONEIT B R T, SHENG G Y, et al. The potential of alkyl amides as novel biomarkers and their application to paleocultural deposits in China [J]. *Scientific Reports*, 2017(7): 14667.
- [110] 魏坚,吕学明. 东北亚古代聚落与城市考古国际学术研讨会论文集[M]. 北京: 科学出版社, 2014: 517-525.
- [111] 查理思,吴克宁,庄大昌,等. 河南仰韶村遗址不同功能区土壤特征研究[J]. *土壤学报*, 2020, 57(2): 500-507.
- ZHA L S, WU K N, ZHUANG D C, et al. Soil properties of the Yangshao village cultural relic site, Henan province relative to function[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2020, 57(2): 500-507.
- [112] LANGGUT D, SHAHACK-GROSS R, ARIE E, et al. Micro-archaeological indicators for identifying ancient cess deposits: An example from Late Bronze Age Megiddo, Israel [J]. *Journal of Archaeological Science: Reports*, 2016(9): 375-385.
- [113] SHAHACK-GROSS R, SIMONS A, AMBROSE S H. Identification of pastoral sites using stable nitrogen and carbon isotopes from bulk sediment samples: A case study in modern and archaeological pastoral settlements in Kenya[J]. *Journal of Archaeological Science*, 2008, 35(4): 983-990.
- [114] BROWN A G, VAN HARDENBROEK M, FONVILLE T, et al. Ancient DNA, lipid biomarkers and palaeoecological evidence reveals construction and life on early medieval lake settlements[J]. *Scientific Reports*, 2021(11): 11807.
- [115] DUNNE J. Organic residue analysis and archaeology guidance for good practice: Supporting information [M]. London: Historic England, 2017:13-14.
- [116] RODRÍGUEZ DE VERA C, HERRERA-HERRERA A V, JAMBRINA-ENRÍQUEZ M, et al. Micro-contextual identification of archaeological lipid biomarkers using resin-impregnated sediment slabs[J]. *Scientific Reports*, 2020(10): 20574.

(编辑 邵煜)

作者简介:



温睿,男,西北大学文化遗产学院教授。本硕就读于中国科学技术大学,博士毕业于牛津大学,现任丝绸之路科技考古与文化遗产保护国家“111 引智基地”主任,西北大学科技考古学研究中心主任,文化遗产研究与保护技术教育部重点实验室副主任,入选国家“万人计划”青年拔尖人才、陕西省“百人计划”、国家文物局文物保护科技优秀青年,荣获第十八届陕西省青年五四奖章。主要从事古代有机残留物、古代硅酸盐文物的科技分析。近五年主持国家重点研发计划、国家自然科学基金、国家社会科学基金重大项目子课题、国家文物局优青课题等科研项目 10 余项,以第一作者或通讯作者身份在国内外重要学术期刊发表论文 60 余篇。研究成果获得陕西省哲学社会科学优秀成果奖二等奖、三等奖各 1 项(均为第一完成人),陕西省高等学校人文社会科学优秀成果奖一、二、三等奖各 1 项(均为第一完成人)。主要学术贡献包括:对酒类相关物质遗存进行科技分析与保护研究,首次将红外光谱采集结合 Fisher 判别分析应用于酒类残留物的研究,为考古出土疑似酒残留物的识别和归类奠定了基础;对三星堆遗址祭祀坑内有机残留物的非靶向及靶向分析,深入揭示了其中蕴含的考古信息,为复杂埋藏条件下考古有机残留物的分析鉴定提供依据。