中国史前农业起源演化研究新方法与新进展

吕厚远^{1,2,3*}

1. 中国科学院地质与地球物理研究所, 中国科学院新生代地质与环境重点实验室, 北京 100029;

2. 中国科学院大学, 北京 100049;

3. 中国科学院青藏高原地球科学卓越创新中心, 北京 100101

* E-mail: houyuanlu@mail.iggcas.ac.cn

收稿日期: 2017-09-10; 接受日期: 2017-11-15; 网络版发表日期: 2017-12-01

国家自然科学基金项目(批准号: 41230104)、国家重大科学研究计划项目(编号: 2015CB953801)、中国科学院战略性先导科技专项项目(编号: XDA05130602)、中国科学院B类先导科技专项培育项目(编号: XDPB0503)资助

摘要 中国是世界农业起源的主要中心之一, 粟(*Setaria italica*)、黍(*Panicum miliaceum*)和水稻(*Oryza sativa*)等是在中国最早被驯化的农作物。目前对史前粟类旱作和稻作农业起源与演化的时间、地点、种类、过程以及与气候变化和人类适应关系的认识, 仍然是不确定的和有争议的。本文总结了近十多年来中国科学家针对这些问题在史前农业起源、演化研究方面取得的新进展, 重点介绍了早期农作物遗存鉴定的新技术、新方法, 包括部分植物大化石(炭化种子、小穗轴)、微体化石(植硅体、植钙体、淀粉粒、花粉)、生物标志物(蛋白质组学、类脂物分子)等方面研究的新成果; 早期农业起源、发展和传播的部分新证据, 以及气候环境背景等方面的研究。分析了研究中存在的问题和潜在机遇, 对进一步深入研究农业起源、演化以及人类活动对气候变化响应等提出初步建议。

关键词 农业起源, 旱作, 稻作, 植硅体, 淀粉, 微体化石, 生物标志物

1 引言

越来越多的证据揭示, 在最近一个冰消期(约 19000~11000a BP)、在全球平均气温大幅度转暖(约 7~9℃)过程中(Clark等, 2009; Lu等, 2007; 王绍武, 2011), 人类首先在全球三个中心地区(中国、西亚和中美洲)从渔猎采集逐步进入到原始农业社会(Crawford, 2006; 严文明, 1982), 开始了人类控制和创造食物资源的新时代。农业的起源, 是人类社会发展历史进程中的重要事件, 农业的繁盛, 让人类演化走向了一条全新之路。1万多年以来, 气候变化和农业的发展, 在全球加速了人类社会的演化进程, 诞生出形式多样的东、

西方文明(Bellwood, 2005)。在中国滋生了南方稻作和北方旱作两套农业系统, 孕育出历史悠久的农耕文化(严文明, 1982), 其深远影响直至今日。

为什么在末次冰消期-全新世气候变暖过程中, 原始农业在全球几个中-低纬度地区同步出现? 先后有十多种假说或观点来解释人类驯化农作物的过程和机制, 诸如: 进化论说、绿洲说、人口压力说和社会变革说等(Bellwood, 2005; Crawford, 2006; 张光直, 1987), 这些假说无论涉及人类主动驯化农作物、还是被动驯化农作物, 由于受研究材料、方法和学科的限制, 对末次冰消期-全新世气候变化过程、农业起源机制、以及人类适应的认识, 还存在着较多的假设和推理(Bar-

中文引用格式: 吕厚远. 2018. 中国史前农业起源演化研究新方法与新进展. 中国科学: 地球科学, 48: 181–199, doi: [10.1360/N072017-00297](https://doi.org/10.1360/N072017-00297)

英文引用格式: Lu H Y. 2017. New methods and progress in research on the origins and evolution of prehistoric agriculture in China. Science China Earth Sciences, 60: 2141–2159, <https://doi.org/10.1007/s11430-017-9145-2>

Yosef, 1998; Crawford, 2006). 具体到中国稻作、旱作农业起源过程、规律有什么异同? 气候环境变化起到了怎样的作用? 对史前文明发展产生怎样影响等? 是至今没有理清的科学事实和科学问题。

目前影响史前农业起源、演化研究深入开展的关键问题, 集中在研究材料、方法、和机制等几个方面: 在研究材料方面, 越是早期的农作物“大化石”保存的越稀少, 而且更容易腐烂、灰化, 难以发现或无法发现(Harvey和Fuller, 2005; Pearsall, 2015; Piperno, 2006). 长期以来中国南方稻作、北方旱作地区很少有老于8000a BP的农作物以及野生亲缘植物大化石(如炭化种子)证据, 难以对早期的农业起源-发展过程做准确全面了解和分析; 在研究方法方面, 由于缺少早期考古遗存、地层中植物化石准确鉴定的标准, 许多地区的农业起源、演化、传播问题, 更多地被肢解为是否是野生、采集、栽培、驯化等不同阶段、不同种类的争议, 是否是多中心起源和单一起源的争议等问题(Deng等, 2015; Fuller等, 2009; Liu等, 2007); 在多学科研究方面, 特别是缺少对精确年代控制下的考古遗址区域古气候、古环境、地貌演化背景的综合研究, 难以从时间和空间上了解气候-环境变化背景下的农业起源、传播以及人类适应过程和机制。

近年来国际学术界注重考古遗址和沉积地层中农作物分析、鉴定方法的创新(Ball等, 2016; Miller等, 2016; Pearsall, 2015; Piperno, 2006), 特别是在微体化石(植硅体、淀粉、花粉)(Ball等, 2016; Pearsall, 2015; Woodbridge等, 2014)、生物标志物(蛋白质学、同位素、分子化合物, DNA)(Dallongeville等, 2015; Izawa等, 2009)等用于识别不同农作物或野生祖本方面, 取得了许多新成果, 发表了一些重要的专著(Pearsall, 2015; Piperno, 2006). 部分新方法、新技术开始以在线检索方式展示出来, 并以很快的速度充实、丰富和传播. 例如: Pearsall教授在美国密苏里堪萨斯大学植物考古实验室建立的植硅体数据库(<http://phytolith.missouri.edu>); 伦敦大学Dorian Fuller教授建立的植物考古数据库(<http://www.homepages.ucl.ac.uk/~tcrndfu/phytoliths.html>); Linda Perry博士关于国际淀粉命名法的网站(<http://www.fossilfarm.org/ICSN/Code.html>)等, 促进了农业考古研究的深入。

中国学者在利用多指标、多手段开展农业考古, 特别是农作物分析鉴定方法方面, 取得了许多重要成

果(Lu等, 2005; Yang等, 2012b; Zhang等, 2011, 2012; 樊龙江等, 2011; 顾海滨, 2009; 靳桂云等, 2007; 刘长江和孔昭宸, 2004; 秦岭, 2012; 张居中等, 2004; 赵志军, 2014; 郑云飞等, 2007). 近年来, 针对中国史前农业、气候变化与人类适应研究存在的问题, 先后有中国科学院战略性先导科技专项、科技部重点基础研究发展计划项目、国家自然科学基金和国家社会科学基金项目等, 分别从不同角度、不同区域、不同时间, 特别是方法学方面开展了相关研究(Ge等, 2016; Gu等, 2013; Jin等, 2014; Lu等, 2009a, 2009b; Wu等, 2014; Yang等, 2012b; Zhang等, 2012; 侯西勇等, 2016; 李小强, 2013; 邱振威等, 2016; 杨玉璋等, 2016; 张东菊等, 2016; 张双权等, 2016), 部分成果集中在: (1) 如何利用自然科学的手段发现、区分、鉴定早期野生-驯化农作物, (2) 明确早期农业起源时间、空间变化的过程, (3) 建立年代准确的气候变化与农业起源、人类活动的关系等方面. 本文重点选择中国科学家在新方法方面取得的新进展及相关成果做介绍。

2 农业起源、演化研究的农作物分析鉴定新方法

随着科学技术的发展、人类观察-探测自然精度的提高, 农作物“化石”的鉴定也从识别大化石颗粒形态(例如炭化种子颗粒), 逐渐向大化石细胞形态、微体化石形态(植硅体、淀粉粒等)、分子生物结构(生物标志物)、遗传学识别的方向发展(Pearsall, 2015; Piperno, 2006). 其研究方法, 有一个共同点, 通过对大量现代植物样品分析, 寻找可重复、可检验、特征明显的鉴定标志, 而且这些标志能够在地层中长期保存下来; 其研究目标, 有两个方向, 一是不同属种植物间的区分, 例如区分炭化粟(谷子、脱壳为小米)和黍(糜子、脱壳为大黄米, 不黏的黍称稷子)的种子, 或者炭化大麦(*Hordeum vulgare*)和小麦(*Triticum aestivum*)的种子; 另一类是驯化农作物与野生祖本的区分, 例如区分炭化的野生水稻和驯化水稻种子。

2.1 植物大化石鉴定标志的新进展

随着考古遗址浮选方法的推广(赵志军, 2014), 鉴定炭化植物种子的需求增多, 多种现代中国农作物以及植物杂草种子图鉴(郭巧生等, 2009; 刘长江等,

2008; 郭琼霞, 1998; 印丽萍和颜玉树, 1996; 赵志军, 2014)提供了很好的帮助, 但现代植物形态特征与考古遗址中植物炭化颗粒仍然有很大区别(刘长江和孔昭宸, 2004), 研究炭化颗粒鉴定形态特征、埋藏过程依然是植物考古研究需要深入的工作。

2.1.1 野生、驯化水稻小穗轴基盘离层、维管束组织鉴定特征

考古遗址中水稻炭化颗粒的鉴定已经取得了众多成果(陈报章等, 1995; 赵志军, 2014), 但利用水稻炭化颗粒判断水稻是野生还是驯化有许多不确定性。水稻驯化涉及 20 多个形态、生理性状变化(区树俊等, 2012; 郑云飞等, 2016), 种子落粒性降低是其中最重要的变化之一, 种子落粒性直接影响了稻谷小穗轴基盘形态。傅稻镰等(2009)根据水稻炭化小穗轴基盘形态特征, 发现驯化稻穗基盘具有不均匀的轮廓、凹陷的外表和不大对称的伤痕, 而野生型稻谷小穗基盘处常具有连续轮廓, 平而圆的脱落伤痕, 和一个小而独特的维管束。郑云飞等(2016)和Zheng等(2016)进一步对小穗轴基盘离层维管束组织结构进行研究, 发现野生稻、驯化稻、籼稻(*Oryza sativa* subsp. *indica*)、粳稻(*O. sativa* subsp. *japonica*)小穗轴基盘组织结构的差异(图1)。从野生到驯化表现为: 离层组织逐步消失→离层细胞退化形成的维管束组织呈星散状分布→维管束组织密集分布, 是水稻农业考古鉴定方法的突破。进一步通过对约9000a BP前浙江湖西遗址小穗轴基盘研究, 发现为不完全离层组织, 离层细胞退化形成的维管束组织呈现星散状分布, 有粳稻特征, 但不发达; 发现在距今7000a BP前的河姆渡文化时期, 开始出现具有典型粳稻离层特征的水稻小穗轴, 表明水稻驯化经历了落粒性不断降低、粳稻特征逐渐明显的漫长过程。

不过稻谷小穗轴基盘在早期地层也保存较少, 很难建立水稻驯化演化序列, 另外关于小穗轴基盘离层维管束组织结构的观察分类, 还需要具体量化的指标。

2.1.2 野生、驯化大豆炭化颗粒形态鉴定特征

虽然学术界普遍认为, 大豆(*Glycine max*)起源于中国(赵团结和盖钧铭, 2004), 但一直缺少从野生到驯化的考古学证据, 主要是由于缺少鉴定史前炭化野生大豆和驯化大豆的形态标志。赵志军和杨金刚(2017)

通过对中国大量现代野生、驯化大豆的炭化试验, 发现一个重要的鉴定标志: 驯化栽培大豆炭化后, 豆皮爆裂成碎片状, 大部分豆皮甚至完全脱落; 野生大豆炭化后的豆皮虽然也出现爆裂现象, 但从不脱落, 从而建立了炭化野生大豆和驯化栽培大豆的鉴定标准(表1)。

研究认为栽培(驯化)大豆的豆皮易于脱落, 可能与人类蒸煮食用的选择有关。进一步对河南贾湖遗址出土大豆炭化形态的鉴定发现, 炭化豆类饱满, 豆皮脱落严重, 初步认为出现了栽培(驯化)大豆的特征, 说明中国驯化大豆的起源可以追溯到距今约8000a BP前(赵志军和杨金刚, 2017), 提供了中国是大豆起源地的考古学证据。

中国野生和栽培豆类种类繁多, 还需要深入开展基础研究, 获取可量化的鉴定指标, 特别是从野生到栽培之间的过渡指标, 可以方便将来准确地探索大豆驯化的过程。

2.1.3 粟、黍炭化过程初步分析及在旱作农业研究中的意义

植物(种子)受热(火)炭化后, 成分十分稳定, 可以长期在地层中保存下来, 没有被炭化的富含有机质的植物体在地层中会很快氧化、腐烂(杨青等, 2011), 特别是在中国东部温暖湿润的地区是很难长期保存的。当然超过炭化温度的有机质都已经氧化-灰化成粉, 失去了形态鉴定特征。因此, 从遗址中浮选的炭化植物大化石都是受热(火)炭化后保存下来的, 已经有学者(Märkle和Rösch, 2008; 王祁等, 2015)通过对部分农作物的炭化分析, 了解到不同农作物种子受热炭化的温度区间、过程是否存在差异, 会不会影响对出土炭化植物的种类、含量的判断。

在黄河流域旱作农业考古记录中, 有粟、黍遗存的新石器遗址多以粟为主, 少有黍的报道(陈文华, 2002; 游修龄, 1993), 近年来考古遗址浮选的结果, 也多以粟为主, 粟被认为在中华农耕文明演化中一直唱主角。然而, 一些学者也发现中原地区粟、黍种子炭化颗粒考古记录和历史记录以及微体化石的记录并不一致, 在历史文献中, 在甲骨文和《诗经》中黍出现的次数远超过粟(陈文华, 2002; 陈有清, 2000; 张健平等, 2010); 最近通过对相同遗址单元浮选的粟、黍炭化种子和植硅体分析出的粟、黍的比例进行对比, 发现炭

图 1 野生水稻、籼稻、粳稻小穗轴基盘离层-维管束组织结构
据Zheng等(2016)和郑云飞等(2016)

表 1 考古出土炭化野生-驯化大豆鉴定标志^{a)}

野大豆		栽培(驯化)大豆
豆粒形态	较扁, 呈肾形或扁圆形, 炭化后变形不明显	饱满, 呈长圆形或圆球形, 炭化后变形明显, 膨胀甚至爆裂
豆粒尺寸	偏小, 长宽比和长厚比值高. 炭化后略有缩小	偏大, 长宽比和长厚比值相对低. 炭化后略有缩小
豆皮特征	豆皮表面覆有一层泥状膜, 显微镜下灰暗无光泽. 炭化后出现裂纹, 整体保存完好.	豆皮表面光滑, 显微镜下观察有光泽. 炭化后豆皮爆裂脱落严重, 残存的豆皮呈片状附在豆粒上
子叶特征	油脂含量少, 显微镜下无光泽. 炭化后一般不爆裂	油脂含量高, 显微镜下有光泽. 炭化后爆裂, 开裂处可以看到不规则的深窝状
豆脐特征	尺寸较小, 炭化后变化不显著	尺寸较大, 炭化后变化不显著

a) 据赵志军和杨金刚(2017)

化种子中黍的比例, 远小于植硅体分析出的黍的比例(王灿等, 2015; 王灿, 2016), 不同的记录指标得出了不同的结果.

张健平等(2010)对现代黍、粟种子的植硅体产量进行分析, 表明相同重量的黍、粟种子籽片的植硅体产量基本相等(约每克45万粒左右/干式法), 其植硅体含量大致反映了黍、粟的相对产量(重量). 王灿(2016)进一步对现代黍、粟种子进行炭化温度区间实验, 发现在正常大气氧化条件下, 粟的炭化温度区间(275~350℃), 远大于黍的炭化温度区间(250~295℃). 说明黍被炭化保存下来的概率要远低于粟, 浮选结果中的黍的含量可能会被低估. 目前的证据表明, 中国

北方最早被驯化的是黍(Lee等, 2007; Lu等, 2009a), 但在全全新世-仰韶文化时期(7000~5000a BP), 是以粟为主还是以黍为主? 不同区域是否存在差别? 关系到对旱作农业结构、发展过程的正确认识, 江山社稷的“稷”, 有可能是黍在唱主角, 需要进一步深入研究.

2.2 植物微体化石鉴定标志的新进展

农业考古分析中常用的植物微体化石, 包括植硅体、植钙体、淀粉粒、花粉、植物炭屑细胞等, 目前发展较快的是植硅体(Piperno, 2006; 近藤鍊三, 2010; 王永吉和吕厚远, 1993)和淀粉粒分析(Hart和Wallis, 2003; Yang等, 2012a).

植硅体(Phytolith)是充填于高等植物细胞组织中的二氧化硅矿物, 由于其潜在的植物属种分类功能、较强的抗风化、抗燃烧能力、丰富的产量, 特别是在植物有机质容易腐烂、灰化的区域和沉积物中, 发挥出越来越重要的作用. 例如在中美洲玉米起源(Piperno, 1984)、东南亚香蕉起源等研究中(Ball等, 2006), 植硅体证据起到决定性的作用.

淀粉(Starch)是几乎所有农作物中必然含有的物质, 以淀粉粒的形式贮藏在植物的根、茎及种子等器官的薄壁细胞细胞质中(Piperno等, 2009; Torrence和Barton, 2006). 由于不同种属的植物淀粉粒具有不同的形态特征, 因此可以进行植物种类的鉴定. 作为半晶体的淀粉粒, 可以在古人遗留下来的生产、生活工具表层、甚至牙结石中保存上百万年, 为研究古代植物利用提供了可能(Yang等, 2012a).

中国学者近几年在植硅体、植钙体、淀粉、花粉鉴定方法方面都作出了重要贡献(Gu等, 2013; Huan等, 2015; Jin等, 2014; Lu等, 2005; Wu等, 2014; Yang等, 2015b; Zuo等, 2016; 靳桂云等, 2007; 李小强等, 2007; 吕厚远等, 2015; 陶大卫等, 2009; 郇秀佳等, 2014; 杨晓燕等, 2009a; 杨玉璋等, 2016; 张东菊等, 2016; 张健平等, 2010; 赵理悱和毛礼米, 2015; 郑云飞等, 2013).

2.2.1 粟、黍、稗以及狗尾草小穗表皮长细胞植硅体形态鉴定特征

粟(*Setaria italica*)和黍(*Panicum miliaceum*)是欧亚大陆最早驯化的两种不同的旱作农作物(Diao和Jia, 2017; 刁现民, 2011), 粟、黍果实小、形态相似, 在早期考古报告中, 由于粟、黍炭化种子难以区分, 常描述为“粟”和“粟类”. 近年来, 随着浮选方法的应用和粟、黍炭化种子鉴定标志进一步明确(刘长江和孔昭宸, 2004), 粟、黍有了科学鉴定的考古记录, 但这些记录多局限在8000a BP以后的考古遗址中, 在新石器早期的考古遗址中, 由于粟、黍大多腐朽、灰化, 不容易发现和区分, 限制了对早期旱作农业的研究.

植硅体形态分析为解决这一难题提供了一个行之有效的方法. Lu等(2009b)利用相差和微分干涉显微镜观察了全国各地100余种现代黍、粟和其近缘草本植物花序苞片中的内、外颖片和内、外稃片的解剖学特征和硅质沉积结构. 发现了5个能够明确区分黍、粟的植硅体形态特征(图2), 分别是: (1) 颖片和下位外稃中

图2 粟、黍稃壳植硅体形态特征

(a) 粟的3级稃片Ω型植硅体形态, (b) 黍的3级稃片η型植硅体形态, (c) 粟稃片硅化表皮长细胞末端的形态呈现波状交叉纹饰, (d) 黍稃片硅化表皮长细胞末端的形态呈现指状交叉纹饰. 据Lu等(2009b)

植硅体的形态, 粟为十字型, 黍为哑铃型; (2) 稃片中是否发育乳头状突起, 粟有突起, 黍没有突起; (3) 稃片长细胞纹饰粟呈现Ω型, 黍呈现η型, 并分三级, 第三级多位于稃片中部; (4) 稃片硅化表皮长细胞末端的形态, 粟呈现波状交叉纹饰, 黍呈现指状交叉纹饰; (5) 粟的稃片表面角质层和长细胞同时硅化常常形成雕纹形态, 而黍则形成锯齿状或斑点状. 综合考虑这五个特征, 为利用植硅体区分黍、粟考古遗存提供了可靠的标准.

狗尾草属(*Setaria* sp.)和稗草(*Echinochloa* sp.)不仅是田间杂草, 而且青狗尾草(*S. viridis*)还是粟的野生祖本. 由于他们炭化后种子颗粒大小、形态与粟、黍相似, 能否找到区分粟、黍与青狗尾草、稗草植硅体的形态特征, 是旱作农业起源研究的关键. Zhang等(2011)和Ge等(2016)通过对现代旱作农作物粟、黍、稗以及多种狗尾草小穗表皮长细胞形态研究, 发表了区分粟与青狗尾草、稗草的植硅体形态和测量标准, 发现稗草的植硅体特征形态β型. 但是由于黍的野生祖本还不清楚(Hunt等, 2014), 有关黍的起源时间、过程背景的探索有许多不确定性. 目前能够采集到的所谓的野生黍(*P. miliaceum* ssp. *ruderales* (Kitag.) Tzvel)或野糜子, 被认为是栽培黍退化的品种.

2.2.2 驯化、野生水稻植硅体形态鉴定特征研究进展

在稻作农业起源和传播的研究中, 水稻特有的三种植硅体(并排哑铃型、双峰型、水稻扇型)(Fujiwara, 1976; 近藤鍊三, 2010; 吕厚远等, 1996; 王永吉和吕厚远, 1993), 对于发现、鉴定水稻遗存起到了重要的作用, 但在如何利用水稻植硅体区分野生稻和驯化稻的标准方面, 并没有得到广泛认可(Gu等, 2013; Pearsall等, 1995), 限制了植硅体在早期稻作起源研究中的应用。

赵志军等通过对亚洲野生稻品种和各类传统栽培水稻稻壳上双峰型植硅体形态参数(TW、MW、H1、H2、CD)的系统测量, 利用判别分析的统计方法, 建立了区分野生和栽培水稻双峰型植硅体的判别函数(Zhao等1998), 获得了很高的判别概率, 被国内外同行广泛利用(Atahan等, 2008; Ball等, 2016; 王灿和吕厚远, 2012)。一般情况下扇型植硅体相对双峰型植硅体在地层中的含量更多, 如何利用扇型植硅体判别野生和栽培水稻经历了较长时间的探索过程, Lu等(2002)早期的研究发现, 水稻扇型植硅体边缘鱼鳞状纹饰一般在8~14个左右, 多数 ≥ 9 个鱼鳞状纹饰, 野生水稻扇型植硅体边缘鱼鳞状纹饰一般小于9个, 但也有多于9个的植硅体(图3a), 因此依据单个或少量扇型植硅体很难判断水稻的野生和栽培性状。

Huan等(2015)进一步通过对中国63处现代野生水稻土壤和栽培水稻田土壤中水稻扇型植硅体进行了研究, 发现在野生稻田表土样品中具有 ≥ 9 个的鱼鳞状纹饰的水稻扇型植硅体的比例是 $17.46 \pm 8.29\%$, 在栽培稻田表土样品中具有 ≥ 9 个的鱼鳞状纹饰的扇型植硅体的比例是 $63.70 \pm 9.22\%$ (图3b)。说明 ≥ 9 个鱼鳞状纹饰的扇型植硅体比例, 不仅可以作为区分野生稻和驯化稻统计指标, 而且某种程度上指示了水稻驯化的程度和驯化速率。例如: 如果统计出地层中鱼鳞纹饰 ≥ 9 的扇型植硅体含量M(%), 理论上可以计算水稻被完全驯化的比例F(%), 则 $M = F \times 63\% + (1 - F) \times 17\%$, $F = (M - 0.17\%) / (63\% - 17\%)$, 如果 $M = 40\%$, 则 $F = 0.5 = 50\%$ 。这类似于利用土壤中有有机碳同位素计算C3、C4生物量的贡献。

目前有关扇型植硅体鱼鳞状纹饰的数量如何反映水稻驯化程度的机制还在讨论中(Huan等, 2015), 由于扇型植硅体来自禾本科植物机动细胞, 又叫泡状细胞,

图3 野生水稻和驯化水稻扇型植硅体特征

(a) 野生和驯化水稻扇型植硅体形态, (b) 野生稻土壤和栽培稻土壤中扇型植硅体含量差别。据Lu等(2002)和Huan等(2015)

能够有效地通过快速失水达到控制叶片卷缩, 适应叶片的蒸腾, 与植物的抗旱性有关。一个可能的机制, 野生水稻向栽培、驯化水稻演化过程中, 脱离水环境的几率增加, 泡状细胞卷缩功能增强, 促进了鱼鳞状纹饰的增加, 某种程度上是与驯化有关的人工干预程度的体现。

2.2.3 植钙体分析及其在经济作物鉴定中的应用

植钙体(Calciphytolith), 即草酸钙晶体, 主要以一水草酸钙($\text{CaC}_2\text{O}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$, COM, 单斜晶系)的形式存在, 是高等植物在生长发育过程中形成的最常见的微体矿物之一(Zhang等, 2014; 李秀丽等, 2012), 几乎在所有高等植物体内都有分布, 广泛形成于植物的根、茎、叶、花、果、苞片、种子等器官的晶异细胞中, 可长期且稳定的在多种沉积物中包括灰烬层、动物粪便等保存下来。由于晶体形态存在多样性(不同种)和专一性(同种), 植钙体也可以和植硅体一样, 作为鉴定依据之一, 可以将植物鉴定到科、属、种甚至不同器官。Zhang等(2014)通过分析中国45种现代茶(*Camellia sinensis*)、茶科(Theaceae)以及野生植物的植钙体形态, 发现了茶叶植钙体形态和组合特征, 其中植钙体簇晶和毛状体基部是茶叶最显著的鉴定特征(图4): (1) 茶叶植钙体全部为簇晶, 晶簇直径 $11.65\text{--}3.64\mu\text{m}$, 在所有被测样品中最小, (2) 毛状体基部具有4个明显的笔直而规则的裂隙, 与十字消光交叉面类似, (3) 簇晶与毛状体基部同时存在。这些形态鉴定特征, 为区分茶叶和其他植物提供了鉴定标准。

图4 茶叶植钙体形态以及参数特征

(a) 茶叶植钙体的三个形态特征: (1) 晶簇, (2) 簇晶与毛状体基部同时存在, (3) 毛状体基部具有4个明显的笔直而规则的裂隙. (b) 茶叶以及近缘植物植钙体植硅体晶簇大小变化范围. 样品编号请见原文, 据Zhang等(2014)

吕厚远等通过对西藏阿里古如江寺和西安汉阳陵考古遗址出土的植物样品开展植硅体、植钙体和生物标志物分析(Lu等, 2016), 发现这些考古植物样品中都含有只有茶叶才同时具有的植钙体、丰富的茶氨酸和咖啡因等可以相互验证的系统性证据, 确认古如江寺和汉阳陵出土的植物遗存都是茶叶, 由于他们的年龄距今分别有1800和2100a BP, 成为目前世界上最老的茶叶实物证据.

2.2.4 粟、黍、小麦族、块茎类等农作物淀粉粒鉴定标志的突破

从20世纪80年代末开始, 淀粉粒分析逐渐成为一种重要的研究手段, 在欧美和澳洲开始发展, 取得了许多重要的成果(Hart和Wallis, 2003; Piperno等, 2009). 由于部分植物器官(例如植物块茎)不生产植硅体, 淀粉粒分析可以弥补大植物遗存和植硅体分析的不足(Piperno等, 2004; Torrence和Barton, 2006). 国内最早应用淀粉粒进行农业考古研究的案例是鉴定4000a BP前的面条成分(Lu等, 2005), 但当时国内的基础研究工作还非常有限(杨晓燕等, 2005).

过去十多年, 杨晓燕等采集了1000多份现代植物样品, 对每种样品的淀粉颗粒进行系统的形态分析(Yang等, 2013, 2012b, 2015b), 建立了中国现代植物淀粉粒形态数据库(<http://cmsgd.igsnr.ac.cn/>), 包括了

30多科100多属300多种植物, 基本涵盖了各类农作物及其野生祖本、药用植物及其他野生经济作物, 为开展古代淀粉粒研究, 分析东亚农业起源和传播奠定了基础.

为提高淀粉粒鉴定的分辨率, 将鉴定推进到属, 甚至种一级的分类, 杨晓燕等通过对粟类(*Setaria*、*Panicum*)、稗属(*Echinochloa*)、薏苡属(*Coix*)等和小麦族(The Tribe Triticeae)植物大量淀粉粒形态数据的采集与分析, 建立了粟类和小麦族等淀粉粒形态分类检索表, 提出了区分粟、黍及其野生祖本淀粉粒的鉴定标准, 并将小麦族淀粉粒鉴定推进到属一级(Yang和Perry, 2013; Yang等, 2012a), 促进了国内淀粉植物考古研究的深入开展 (Yang等, 2013, 2012b, 2015b; 刘莉等, 2010; 陶大卫, 2011; 吴文婉, 2015; 杨晓燕, 2017; 杨晓燕等, 2009b; 杨玉璋等, 2015).

2.2.5 禾本科农作物花粉粒鉴定进展

花粉分析是研究人类活动、农业考古、气候环境变化的有效方法(周昆叔, 2002). 由于多数农作物属于禾本科(Poaceae)植物, 禾本科1万多种植物中, 花粉都是圆球形, 形态都非常相似. 如何利用花粉分析鉴定出禾本科农作物, 人们做了许多努力, 曾先后用一般光学显微镜, 相差光学显微镜, 扫描电子显微镜(SEM), 透射电子显微镜(TEM)对形态特征进行过全方位的研究

(Hesse等, 2009; Pearsall, 2015), 目前可以明确鉴定的只有玉米 (*Zea mays*) 花粉, 颗粒大于60~70 μm 以上 (Fearn和Liu, 1995), 其他能够用于农作物禾本科种类鉴定的标志并不多, 有些指标因为操作技术复杂(如: TEM), 而难以广泛应用。

禾本科农作物花粉颗粒相对野生禾本科植物花粉普遍变大, 不同学者试图用禾本科花粉大于35、38和40 μm , 甚至45 μm 以上 (Faegri和Iversen, 1992; 王开发和王宪曾, 1983; 许清海等, 2010), 作为禾本科农作物花粉的标志, 并达到一定含量以上(如>15~20%)以上, 解释有农业活动发生, 不同学者给出的农作物花粉大小的标准很不统一。

最近Mao和Yang(2015)通过对9种农作物: 粟、黍、水稻、二粒小麦(*Triticum dicoccum*)、硬粒小麦(*Triticum durum*)、普通小麦(*Triticum aestivum*)、大麦(*Hordeum vulgare*)、高粱(*Sorghum bicolor*)玉米等, 和亲缘野生植物: 青狗尾草、普通野生稻(*Oryza rufipogon*), 节节麦(*Aegilops tauschii*)的花粉形态, 进行测量分析。图5可以看出, 不同农作物花粉大小是不一致的, 玉米花粉大于70 μm 以上, 与过去的结果一致; 小麦类花粉一般在53~65 μm 左右, 与大麦和野生节节草花粉约35~50 μm 相比, 明显大许多; 水稻和野生水稻花粉大小相似, 一般在30~45 μm 左右, 无法区分; 粟、黍花粉25~40 μm , 比青狗尾草花粉20~33 μm 要大许多, 但没有绝对的界线, 因此在不同的农作物分布区, 可以考虑用不同的判断标志, 无法用统一的标志判断是否存在农作物。

2.3 生物标志物新进展

由于生物标志化合物基本保存了原始生物生化组分的碳骨架, 记载了原始生物母质的相关信息, 被广泛应用在古生态、古环境、古气候研究中。在农业考古和环境考古研究中, 四种生物化学组分(蛋白质、碳水化合物、类脂物和木质素)都有应用的案例(彼得斯等, 2011; 谢树成等, 2003)。在这四类生物标志化合物中, 研究最广泛的是类脂物和蛋白质(核酸)。

2.3.1 蛋白质组学方法鉴定标志的进展

蛋白质是动植物的重要组成部分, 在利用动植物的过程中产生的有机残留物中, 一般含有或多或少的蛋白质, 对其开展分析能为动植物利用提供丰富的信

息。蛋白质组学技术的成熟是和蛋白质数据库的日趋庞大密不可分的, 本世纪初蛋白质组学才开始应用于古代遗存的分析 (Solazzo等, 2008)。蛋白质组学分析能鉴定样品中所含蛋白质的种属和种类, 而后者往往和蛋白质的来源部位相关, 这是蛋白质分析的独特优势。例如, 动物的肉、皮、血、骨、角、奶或毛等, 以及不同器官往往含有不同种类的蛋白质; 因此蛋白质组学通过鉴定蛋白质的种类可以判断蛋白质的来源部位, 对了解先民开发动物产品的深度至关重要。近年来, 使用蛋白质组学方法在新疆小河墓地中发现了3600a BP前的固体奶制品, 大部分样品中主要含酪蛋白和微量的开菲尔乳酸菌, 说明其为开菲尔奶酪 (Yang等, 2014)。

植物的根茎叶中蛋白质含量很低, 种子中的蛋白质含量较高, 在植物种子(比如粮食作物和油料作物)的加工过程和最终制品中, 有可能保留有种子蛋白。比如, 在北京圆明园建筑彩绘的地仗层(基础层)中鉴定出小麦面粉为胶结材料 (Rao等, 2014)。蛋白质(核酸)的生物学信息在所有生物标志物中是相对丰富的, 但它们在考古遗址或地层中保存相对其他指标来说不太稳定。

2.3.2 类脂物分子类生物鉴定标志的进展

相比蛋白质而言, 类脂物在地层沉积物中要稳定得多, 可以在许多环境中长期保存下来, 但它所携带的生物学信息相对较少。目前在农业考古、古生态、古植被研究中, 研究最多的生物标志化合物是类脂物分子 (赖旭龙, 2001), 包括烷烃、芳烃、酸、醇、酮和酯等, 主要涉及这些生物标志化合物的种类、含量、分布、具有种属特异性的生物分子或者分子组合(多指有机小分子), 它们在加工、埋藏中产生的衍生物, 有望判断相关残留物的生物来源。对古代残留物中的生物标记物, 首先使用合适的化学试剂进行提取, 再分析对象的属性, 选择合适的光谱或质谱方法鉴定分子的组成、结构或同位素组成。比如, 黍素(miliacin)是粟、黍的生物标记物, 吕厚远等人曾用气质联用方法和植硅体方法在磁山文化窖穴的灰化样品中识别出早期黍的存在, 为粟作农业的起源研究提供了重要证据 (Lu等, 2009a)。茶氨酸和咖啡因是茶叶的生物标记物 (Lu等, 2016)。桦木醇(图6)、羽扇豆醇和桦木酸是桦树皮的生物标记物等, 利用该方法在中国新疆地区鉴定出古代桦树皮制品 (Rao等, 2017)。

图 5 常见农作物和野生禾本科植物花粉形态与直径测量结果

(a) 13种农作物和禾本科植物花粉直径分布范围; (b) 常见农作物和禾本科野生植物花粉形态: 1. Maize(*Zea mays*), 2. Barley(*Hordeum vulgare*), 3. Grain sorghum(*Sorghum bicolor*), 4. Millet(*Setaria italica*), 5. Weed, 6. Emmer wheat(*Triticum dicoccum*), 7. Common wheat(*Triticum aestivum*), 8. *Oryza sativa*(JX). 据Mao和Yang(2015)

2.3.3 遗传学生物鉴定标志的进展

通过DNA分析方法研究农作物的起源、演化, 可以从遗传学角度提供了全新的证据。许多研究是对现生农作物和亲缘野生植物的DNA片段等做了类似亲子鉴定分析(Huang等, 2012)。例如, 通过对水稻基因片段分析, 发现与水稻驯化相关的一些主要基因变异仅出现过一次, 籼稻所携带的控制落粒性的基因来自于粳稻, 结合考古学证据, 逐渐形成一个主流观点(Choi等, 2017; Fuller等, 2010): 大致在距今10000a BP之前, 在中国已经开始驯化了粳稻, 在距今4000a BP前后传入印度, 与当地被人类利用的野生稻杂交之后, 出现了籼稻, 籼稻大约在2000a BP前后传回中国。中国是水稻起源“原始中心”和印度为“生中心”的遗传学证据似乎越来越多(Choi等, 2017)。

关于在中国最早开始驯化水稻的地点, 部分现代水稻、普通野生稻DNA证据揭示水稻的驯化地在广西珠江流域地区(Huang等, 2012), 还有待更多考古学证据的验证、以及理论的解释, 涉及水稻起源是否应该发生在野生稻种类丰富区、野生稻分布的边缘区、气候环境条件适宜区, 或考古发掘水稻化石最老的地区等, 一直是学界讨论的问题。

DNA分析已经明确了粟的野生祖本是青狗尾草, 初步划分了粟的野生祖本不同类群的分布地区和起源演化信息(Diao和Jia, 2017; Fukunaga等, 2006)。对黍的野生祖本的DNA鉴定还在进行中(Hunt等, 2014), 遗传学分析表明, 中国是黍子遗传多样性最高的地区, 而且黄土高原地区生态型黍子的遗传相似系数显著低于其他地区生态型的黍子, 表明中国很可能是黍子的起源

图6 古代桦木醇硅烷化衍生物的质谱图
据Rao等(2017)

区,其起源中心很可能位于黄土高原(Hu等, 2009)。

另外部分学者已经在考古遗址出土的植物样品中成功提取到DNA(Castillo等, 2016; Jones等, 2016); 20世纪90年代,日本学者佐藤洋一郎在草鞋山遗址的6粒炭化稻米中提取到了DNA,分析认为都是粳稻,提出长江流域最早栽培的水稻是粳稻的观点(严文明和安田喜宪, 2000),尽管学界对草鞋山遗址炭化稻米DNA数据还有些疑问,可以预期,随着从炭化种子提取DNA的技术的进步,遗传学生物鉴定将在农业考古研究中发挥越来越重要的作用。

在目前的农业起源、演化研究中,无论是大化石、微体化石、还是生物标志物,不同的研究方法针对不同研究对象和目标,可能各有优势和弱点,研究设计尽可能利用多种手段,相互补充、相互验证,获取更接近事实的信息。在过去的几年时间,中国学者通过多方法、多指标开展农业考古研究,取得了一些重要的进展。

3 中国农业起源、演化研究的新进展

3.1 中国稻作、旱作农业考古遗存分布

农业考古遗存是研究农业起源、演化的重要实物证据。随着农业考古方法学研究的深入和应用,农业考古研究成果快速增加,包括大化石、微体化石和少量分子生物学证据,目前已经正式发表的旱作(粟、黍)、稻作考古学结果的遗址约有1080处(He等, 2017)。

龚子同等(2007)在《科学通报》发表的“中国古

水稻的时空分布及其启示意义”一文中,利用当时能收集到的学术刊物发表的和途径报道的水稻考古遗址点共280处。目前发现的水稻考古遗址(图7a和c)(He等, 2017),仅学术期刊正式发表的老于2000a BP的水稻遗址有543处,老于4000a BP的424处,老于7000a BP的40处。绝大多数分布于37°N以南的东部季风区,以长江流域和黄河中、下游地区分布最为密集。最北地点为青铜时代的辽宁旅顺口高丽寨遗址(121°57'E, 39°23'N),最南地点为龙山时代的台湾屏东垦丁遗址(120°47'E, 21°57'N),在大陆最东地点为马家浜文化的浙江舟山白泉遗址(122°09'E, 30°04'N),最西地点为青铜时代云南泸水石岭岗遗址(98°52'E, 25°39'N)。目前为止有明确测年数据、10000a BP前后的水稻遗存,主要分布在长江中游的洞穴遗址(江西万年仙人洞与吊桶环和湖南道县玉蟾岩)和下游的旷野遗址(上山文化遗址群),水稻多地驯化的观点认为,长江中游和下游都可能是水稻驯化、演化中心(Choi等, 2017; Deng等, 2015; Zuo等, 2016)。

旱作农业考古遗址,1993年报道有49处(游修龄, 1993),目前共统计正式发表的约2000a BP以前的旱作遗址537处(He等, 2017),老于4000a BP的324处,老于7000a BP的31处(图7a和b)。绝大多数分布于33°N以北的北方地区,东西分布狭长,以黄河流域分布最为密集,且在长江上、中游及辽西地区也有密集分布。最北的地点为青铜时代内蒙古赤峰二道井子(119°11'E, 44°18'N),最南的地点为青铜时代台湾台南牛稠子(120°13'E, 22°57'N),最东的地点为龙山时代的吉林延边新安图(129°46'E, 43°18'N),最西地点为青铜时代新疆和硕新塔拉遗址(86°55'E, 42°13'N)。最早(8000~10000a BP)的粟、黍农作物考古证据分布在内蒙古赤峰、河北北部、山西吉县、陕西宜川、甘肃秦安等地区。

目前共统计中国史前旱作-稻作混作遗址(同时发现旱作、稻作)186处(图7a)(He等, 2017),老于4000a BP的121处,老于7000a BP的5处。绝大多数遗址点位于长江与黄河之间流域之间30°N~37°N的范围内,呈东北-西南向带状分布。最东北遗址点为辽宁大连高丽寨(122°29'E, 39°32'N),最西南遗址点为云南耿马石佛洞(99°43'E, 23°37'N),最东南的地点为台湾台南南关里(120°16'E, 23°07'N),最西北的地点为甘肃灵台桥村(107°30'E, 35°09'N),海拔最高遗址点为青海循化交日

图7 中国农业考古遗址分布点图(11000~2000a BP)

(a) 中国农业考古粟、黍、水稻遗址点以及粟、黍、稻混合遗址点分布图; (b) 中国农业考古粟、黍遗址点分布图; (c) 中国农业考古水稻遗址点分布图。据He等(2017)

当和云南剑川海门口(约2200m)。目前的考古学证据表明, 中国的黄河中下游地区和西辽河流域、长江中-下游地区可能分别是旱作(粟、黍)和稻作起源-驯化的中心地带, 驯化开始的时间都在大约10000a BP前后, 这个时间与西亚、中美洲的农作物开始被人类利用、栽培和驯化的时间是相近的。涉及到具体的驯化过程, 稻作的证据相对更多一些, 旱作的驯化过程研究还在基础和材料的积累过程中。

3.2 中国稻作、旱作农业起源、演化过程初步研究

人类什么时候开始驯化农作物, 是快速驯化还是

缓慢驯化? 什么时间进入稳定的农业发展时期, 目前还存在争议(Fuller等, 2009; Liu等, 2007; Silva等, 2015)。不同的学者曾给以简单分期, 例如: 采集期、栽培利用期、早期驯化期、驯化成熟期(真正的农业)等, 随着野生-驯化鉴定标志的完善和应用, 对这些阶段的认识将会逐渐完善。

马永超、郇秀佳等对长江下游的10多处典型考古遗址(从10000a BP~2000a BP前后)开展水稻植硅体分析(Ma等, 2016; 郇秀佳等, 2014; Zuo等, 2017), 通过统计鱼鳞状纹饰大于和等于9的水稻扇型植硅体的比例, 揭示了长江下游水稻驯化经历了大致三阶段(图8a)。

图8 中国稻作、旱作农业起源、演化过程

(a) 水稻起源演化的植硅体证据, 据Ma等(2016)和郇秀佳等(2014); (b) 粟类农业早期演化的淀粉证据, 据Yang等(2012b)

第一阶段, 大约1万年前后, 驯化型水稻化石的比例达到30%左右, 明显高于野生稻的17%, 说明上山文化早期水稻已经开始被驯化, 直到河姆渡早期, 驯化程度逐渐增加到55%左右, 但尚未达到现代驯化的程度; 第二阶段, 约6500~5600a BP, 从马家浜晚期到崧泽早期, 水稻的驯化程度一度回落到30%左右, 目前原因不明; 第三阶段, 5600a BP以后, 水稻驯化程度逐渐达到现代驯化水平。邓振华等通过对长江中游的水稻小穗轴化石的分析, 发现在8000a BP前后, 水稻已经完全驯化(Deng等, 2015)。是否说明长江中游相对下游更快速地完成水稻驯化过程, 还有待深入研究。

粟、黍的起源、驯化、演化的证据还非常有限, 目前仅有淀粉粒的证据, 揭示了旱作农业早期的粟类农作物变化的过程。杨晓燕等通过对河北徐水的南庄头遗址(早于11000a BP)和北京门头沟的东胡林遗址(距今11000~9500a BP)出土的石器和陶器的表面残留物以及文化层沉积物中的淀粉粒遗存分析(Yang等, 2012b)(图8b), 发现距今11000a BP前后, 淀粉残留物中已经出现了具有驯化特征的粟类淀粉粒, 说明当时人类已经开始了对于粟(*Setaria italica*)或黍(*Panicum milliaceum*)这两种作物野生祖本的驯化。进一步通过对14个新石器早期到中期遗址残留物淀粉粒分析(Yang和

Perry, 2013; Yang等, 2015a, 2012a; 杨晓燕等, 2009b), 发现具有野生性状的粟淀粉粒逐渐减少. 表明粟类的野生祖本被驯化的过程是长期的, 至少需要数千年以上.

3.3 中国稻作、旱作农业传播过程初步研究

3.3.1 水稻起源传播可能的过程和途径

对水稻起源传播过程的认识, 前人曾经给出过不同的传播途径(严文明, 1982; 游修龄, 1993). 根据目前水稻考古证据和气候变化背景(Dykoski等, 2011; He等, 2017), 水稻起源传播大致经历了以下几个过程(图9).

约10000a BP前, 在末次冰消期气候转暖过程中, 粳稻类开始在长江中、下游地区被驯化. 约8000~7000a BP前, 全新世温暖适宜期, 水稻快速向北传播到山东章丘西河、长青月庄、河南郑州朱寨、新郑唐户等地区的10多个遗址(Jin等, 2014; Zhang等, 2012; 王灿, 2016), 水稻向北扩展到旱作区, 应该与8000~7000a BP前全新世温暖湿润的气候有关. 约6000~5000a BP前, 水稻继续向西北传播, 可能存在两条路线, (1) 经洛阳盆地, 关中平原, 继续西进到甘肃河湟地区(Zhang等, 2010, 2011, 2012; 秦岭, 2012), (2) 从汉水下游向西到上游再到甘肃河湟地区. 目前关于水稻南传的研究, 张弛等做过许多工作(Zhang和Hung, 2010; 张弛和洪晓纯, 2009), 结合新近的材料(He等, 2017), 可以初步判断, 约5000~4000a BP前, 全新世气候温度下降过程中, 大致有两支南传路线: (1) 仰韶晚期-马家窑文化时期, 水稻从甘肃天水一带沿着粟作农业南下, 路径进入四川、云贵低海拔地带, 最后可能经藏缅走廊传入中南半岛(He等, 2017); (2) 另一支约在4000a BP前后, 从福建-台湾-快速传播到吕宋岛菲律宾地区(Deng等, 2017; He等, 2017).

3.3.2 旱作农业向中亚、青藏高原传播与史前人类迁徙-定居

基于现有资料(Liu等, 2016; Stevens等, 2016; He等, 2017; 董广辉等, 2017), 约在10000~8000a BP前后, 粟、黍农业在黄河流域或和西辽河流域起源之后, 通过马家窑文化和齐家文化时期的人群流动, 向西传播到达黄土高原西部, 约在4500~4000a BP前后传入中亚东部, 3500a BP后传入西亚和欧洲. 约10500a BP前

后起源于西亚的小麦和大麦在8000a BP前传入欧洲和中亚西部, 4500~4000a BP传入中亚东部和中国西北地区. 表明粟、黍向中亚传播和小麦向东亚传播都经历了数千年的过程, 他们在中亚地区相遇的时间大致在4000a BP前后. 与此同时, 粟、黍通过西、中、东三个通道(西部四川盆地和云贵高原地区, 中部关中盆地-汉水流域, 东部海岱地区)向南传播(He等, 2017). 小麦东传的具体路径和过程目前还有争议(Dodson等, 2013; 靳桂云, 2007; 张东菊等, 2016; 赵志军, 2015; 董广辉等, 2017).

相对来说, 粟、黍、麦如何向青藏高原传播的过程, 过去了解并不多. 最近几年, 陈发虎等调查分析了青藏高原东北部200余处史前遗址, 选择53处保存完好的史前遗址采集样品, 开展了系统植物遗存鉴定分析, 以及精确的碳化种子测年工作, 并结合古气候研究成果, 提出了史前人类向青藏高原扩散的“三步走”模式: 第一步, 距今约2万年至5200a BP前, 旧石器人群在青藏高原低强度季节性狩猎; 第二步, 距今5200a BP前至3600a BP前, 粟、黍农业人群扩散到青藏高原东北边缘, 在海拔2500m以下河谷地区大规模定居; 第三步, 距今3600a BP前以后, 以种植大麦和牧羊为主的农、牧混合人群大规模扩张, 并定居至海拔3000m以上的高海拔地区(Chen等, 2015; 董广辉等, 2017; 陈发虎等, 2016; 张东菊等, 2016). 这项研究为理解史前人类如何在适应气候变化, 和利用新的生产技术定居在高海拔地区提供了新视角.

近年来, 在中国旱作-稻作起源、传播研究有一个重要特点, 大量植物遗存(种子、炭屑、植硅体等)、特别是一年生植物炭化种子被广泛应用于碳十四年代测定, 对厘清农业起源与传播、文明的发展与演化过程, 提供了明确的年代框架(Dodson等, 2013; Chen等, 2015; 董广辉等, 2017; He等, 2017; Zuo等, 2017).

4 中国农业起源、演化研究的问题与机遇

现今, 人类起源、农业起源和文明起源研究, 已经不仅仅是世界考古学的三大战略性课题, 随着生命科学、地球科学等自然科学和社会科学多学科的加入, 方法学的突破、材料的积累和理念的创新, 预计在今后不长的时间内, 史前农业起源演化与人类文明发展以及自然环境变化关系的诸多认识和模式, 将有新的突

图9 水稻起源传播的可能途径与气候变化

(a) 董哥洞全新世气候变化, 据Dykoski等(2011); (b) 水稻遗址分布, 据He等(2017)

破, 成为许多学科关注和参与的重大方向。

人类将重新审视, 为什么在末次冰消期气候升温过程中, 在大约12000a BP前后, 大致只在20°N~35°N以及美洲大陆15°S~20°N的地区, 人类最早驯化了不同种类的农作物? 为什么在人类长期采集植物的过程中, 从开始选择坚果类植物到更多选择双子叶草本植物、单子叶草本植物以及最后更多集中对禾本科植物进行驯化? 今天我们饭桌上一餐简单的饭菜, 可能是数千年来世界各地驯化植物的聚汇, 从西亚“新月沃地”出产的小麦、大麦、多种豆类, 到美洲驯化的玉米、南瓜, 以及中国出产稻米和粟、黍等。这不仅仅是食物的汇聚, 更是世界文明的汇聚。世界农业起源、演化、传播有哪些规律? 对整个人类文化、文明历史演化产生了怎样的影响? 什么机制驱动? 又会向什么方向发展? 我们还面临一系列问题, 也是机遇。

中国是世界三大农业起源中心之一, 是文化连续

传承的文明古国, 有着得天独厚的旱作和稻作农业研究资源和丰富多样的气候环境记录, 是研究东亚农业起源、文明演化和气候变化关系的核心区域。今后相当一段时期, 早期农业起源与传播问题的研究, 将会依然被聚焦在有相互联系的三个方面: (1) 早期农业起源、发展和传播的科学证据; (2) 早期农作物遗存等鉴定的新技术、新方法; (3) 农业起源-传播的气候环境背景与驱动机制等。

(1) 从材料和证据看: 我们对旧石器晚期人类“食物广谱化”过程的了解还非常有限, 期待更多的旧石器晚期和新石器过渡时期的证据; 末次冰期-冰消期期间, 全球海平面下降120~130m左右, 中国沿海数百万平方公里的大陆架变为陆地(汪品先, 1990), 应该是适合早期人类生存、驯化农作物的良好地区, 但目前能够探索的能力和机会非常有限; 目前的农业起源的关注度最大的是粟、黍、稻几种早期的农作物, 事实上,

全新世中后期许多新的动、植物种类陆续被驯化, 我们对这些农作物被驯化的背景和过程还了解甚少; 农业的传播和交流涉及到我们对中亚、西藏、西南、东南沿海以及周边国家的农业考古资料的了解和把握, 最近几年我们看到了一批非常重要的周边地区农业考古的研究成果, 还期待更多相关研究的深入。

(2) 从方法和技术看: 目前不同的研究方法有可能得出不同结论, 例如我们目前所遇到的, 现代水稻植物 DNA 分析的水稻起源地的结论和水稻考古证据并不匹配; 植物考古浮选的粟、黍炭化颗粒比例与微体化石的数据不匹配等, 都是可以预见的问题, 如果能够找到合理的解释和解决方法, 会在某一方面取得重要的进展; 与材料、方法和技术关系重大的是年代学的数量和质量以及测年技术的突破, 是将来有没有可能取得重要进展的关键。时刻关注新方法的创新和应用, 许多新方法不只是依赖先进的仪器, 更多的是理念的创新。

(3) 关于基本概念和假说: 农业考古的许多争议, 可能因为一些概念不够明确, 例如“农业起源”、“农业起源地”以及“农业起源阶段划分”的标准等, 不同学者常常有不同的理解; 人们对农业起源的认识是阶段性的, 不存在一成不变的理论模式, 目前着重事实可靠是接近真相的关键途径。在农业起源的科学前沿, 地质学、生物学、考古学、农业科学、社会历史文化等学科的界限越来越模糊, 农业起源-演化理论性突破的机遇, 期待多学科的融合。

本文重点介绍了近几年中国科学家在新技术、新方法方面的主要进展和有关研究概况, 许多新的重要的成果和文献可能没有涉及, 许多有意义的问题需要将来深入探讨。

致谢 感谢杨益民、毛礼米、郑云飞、张健平、贺可洋、邹秀佳、赵志军、杨晓燕、董广辉等专家提供相关图件或建议等。感谢两位审稿专家的宝贵意见。

参考文献

- 彼得斯 K E, 沃尔特斯 C C, 莫尔多万 J M. 2011. 生物标志化合物指南: 生物标志化合物和同位素在环境与人类历史研究中的应用. 下册. 北京: 石油工业出版社
- 陈报章, 王象坤, 张居中. 1995. 舞阳贾湖新石器时代遗址炭化稻米的发现、形态学研究及意义. 中国水稻科学, 9: 129–134

- 陈发虎, 刘峰文, 张东菊, 董广辉. 2016. 史前时代人类向青藏高原扩散的过程与动力. 自然杂志, 38: 235–240
- 陈文华. 2002. 农业考古. 北京: 文物出版社
- 陈有清. 2000. 粟名演变考. 中国农史, 4: 93–95
- 刁现民. 2011. 中国谷子产业与产业技术体系. 北京: 中国农业科学技术出版社
- 董广辉, 杨谊时, 韩建业, 王辉, 陈发虎. 2017. 农作物传播视角下的欧亚大陆史前东西方文化交流. 中国科学: 地球科学, 47: 530–543
- 樊龙江, 桂毅杰, 郑云飞, 王煜, 蔡大广, 游修龄. 2011. 河姆渡古稻 DNA 提取及其序列分析. 科学通报, 56: 2398–2403
- 傅稻镰, 黄超, 王玉琪. 2009. 水稻驯化进程与驯化率: 长江下游田螺山遗址出土小穗轴基盘研究. 农业考古, 4: 27–30
- 龚子同, 陈鸿昭, 袁大刚, 赵玉国, 吴运金, 张甘霖. 2007. 中国古水稻的时空分布及其启示意义. 科学通报, 52: 562–567
- 顾海滨. 2009. 遗址水稻硅质体梗粒性质判别方法综述. 湖南考古辑刊(第8集). 长沙: 岳麓书社, 276: 2268–2276
- 郭巧生, 王庆亚, 刘丽. 2009. 中国药用植物种子原色图鉴. 北京: 中国农业出版社
- 侯西勇, 毋亨, 侯婉, 陈晴, 王远东, 于良巨. 2016. 20世纪40年代初以来中国大陆海岸线变化特征. 中国科学: 地球科学, 46: 1065–1077
- 近藤鍊三. 2010. 植物硅酸体图谱. 北海道: 北海道大学出版社
- 靳桂云. 2007. 中国早期小麦的考古发现与研究. 农业考古, 4: 11–20
- 靳桂云, 燕生东, 兰玉富, 王春燕, 佟佩华. 2007. 山东胶州赵家庄遗址4000年前稻田的植硅体证据. 科学通报, 52: 2161–2168
- 赖旭龙. 2001. 古代生物分子与分子考古学. 地球科学进展, 16: 20–28
- 李小强. 2013. 中国全新世气候和农业活动研究新进展. 中国科学: 地球科学, 43: 1919–1928
- 李小强, 周新野, 周杰, Dodson J, 张宏宾, 尚雪. 2007. 甘肃西山坪遗址生物指标记录的中国最早的农业多样化. 中国科学: 地球科学, 37: 934–940
- 李秀丽, 张文君, 鲁剑巍, 王荔军. 2012. 植物体内草酸钙的生物矿化. 科学通报, 57: 2443–2455
- 刘莉, 玖迪丝·菲尔德, 爱丽森·韦斯克珀夫, 约翰·韦伯, 蒋乐平, 王海明, 陈星灿, 葛威. 2010. 全新世早期中国长江下游地区橡子和水稻的开发利用. 人类学学报, 29: 317–336
- 刘长江, 孔昭宸. 2004. 粟、黍籽粒的形态比较及其在考古鉴定中的意义. 考古, 8: 76–83
- 刘长江, 靳桂云, 孔昭宸. 2008. 植物考古: 种子和果实研究. 北京: 科学出版社
- 吕厚远, 吴乃琴, 王永吉. 1996. 水稻扇型硅酸体的鉴定及在考古学中的应用. 考古, 4: 84–88
- 吕厚远, 李玉梅, 张健平, 杨晓燕, 叶茂林, 李泉, 王灿, 吴乃琴. 2015. 青海喇家遗址出土4000年前面条的成分分析与复制. 科学通报,

- 8: 744-756
- 秦岭. 2012. 中国农业起源的植物考古学研究及展望. 见: 北京大学考古文博学院, 主编. 考古学研究(九)——庆祝严文明先生八十年寿辰论文集. 北京: 文物出版社. 260-315
- 郭琼霞. 1998. 杂草种子彩色鉴定图鉴. 北京: 中国农业出版社
- 邱振威, 刘宝山, 李一全, 尚雪, 蒋洪恩. 2016. 江苏无锡杨家遗址植物遗存分析. 中国科学: 地球科学, 46: 1051-1064
- 区树俊, 汪鸿儒, 储成才. 2012. 亚洲栽培稻主要驯化性状研究进展. 遗传, 34: 1379-1389
- 陶大卫. 2011. 淀粉粒的鉴别和分析及在考古学中的应用. 北京: 中国科学院大学. 1-107
- 陶大卫, 杨益民, 黄卫东, 吴妍, 吴耀利, 王昌燧. 2009. 雕龙碑遗址出土器物残留淀粉粒分析. 考古, 9: 92-96
- 汪品先. 1990. 冰期时的中国海——研究现状与问题. 第四纪研究, 10: 13-26
- 王灿. 2016. 中原地区早期农业-人类活动及其与气候变化关系研究. 博士学位论文. 北京: 中国科学院大学. 1-235
- 王灿, 吕厚远. 2012. 水稻扇型植硅体研究进展及相关问题. 第四纪研究, 32: 269-281
- 王灿, 吕厚远, 张健平, 叶茂林, 蔡林海. 2015. 青海喇家遗址齐家文化时期粟作农业的植硅体证据. 第四纪研究, 35: 209-217
- 王开发, 王宪曾. 1983. 孢粉学概论. 北京: 北京大学出版社
- 王祁, 陈雪香, 蒋志龙, 方辉. 2015. 炭化模拟实验在植物考古研究中的意义——以水稻和小麦为例. 南方文物, 3: 192-198
- 王绍武. 2011. 全新世气候变化. 北京: 气象出版社
- 王永吉, 吕厚远. 1993. 植物硅酸体研究及应用. 北京: 海洋出版社
- 吴文婉. 2015. 辽宁阜新查海遗址生业经济初步分析: 来自石器淀粉粒分析结果的指示. 农业考古, 3: 1-9
- 谢树成, 梁斌, 郭建秋, 易轶, Evershed R P, Maddy D, Chambers F M. 2003. 生物标志化合物与相关的全球变化. 第四纪研究, 23: 521-528
- 许清海, 曹现勇, 王学丽, 李月丛, 荆志淳, 唐际根. 2010. 殷墟文化发生的环境背景及人类活动的影响. 第四纪研究, 30: 273-286
- 郇秀佳, 李泉, 马志坤, 蒋乐平, 杨晓燕. 2014. 浙江浦江上山遗址水稻扇形植硅体所反映的水稻驯化过程. 第四纪研究, 34: 106-113
- 严文明. 1982. 中国稻作农业的起源. 农业考古, 2: 19-31
- 严文明, 安田喜惠. 2000. 稻作陶器和都市的起源. 北京: 文物出版社
- 杨青, 李小强, 周新郢, 赵克良, 纪明, 孙楠. 2011. 炭化过程中粟、黍种子亚显微结构特征及其在植物考古中的应用. 科学通报, 56: 700-707
- 杨晓燕. 2017. 中国古代淀粉研究: 进展与问题. 第四纪研究, 37: 196-210
- 杨晓燕, 吕厚远, 刘东生, 韩家懋. 2005. 粟、黍和狗尾草的淀粉粒形态比较及其在植物考古研究中的潜在意义. 第四纪研究, 25: 224-227
- 杨晓燕, 刘长江, 张健平, 杨武站, 张小虎, 吕厚远. 2009a. 汉阳陵外藏坑农作物遗存分析及西汉早期农业. 科学通报, 13: 1917-1921
- 杨晓燕, 郁金城, 吕厚远, 崔天兴, 郭京宁, 刁现民, 孔昭宸, 刘长江, 葛全胜. 2009b. 北京平谷上宅遗址磨盘磨棒功能分析: 来自植物淀粉粒的证据. 中国科学: 地球科学, 39: 1266-1273
- 杨玉璋, 李为亚, 姚凌, 程至杰, 张居中, 信应君. 2015. 淀粉粒分析揭示的河南唐户遗址裴李岗文化古人类植物性食物资源利用. 第四纪研究, 35: 229-239
- 杨玉璋, 程至杰, 李为亚, 姚凌, 李占扬, 罗武宏, 袁增箭, 张娟, 张居中. 2016. 淮河上、中游地区史前稻-旱混作农业模式的形成、发展与区域差异. 中国科学: 地球科学, 46: 1037-1050
- 印丽萍, 颜玉树. 1996. 杂草种子图鉴. 北京: 中国农业科技出版社
- 游修龄. 1993. 黍粟的起源及传播问题. 中国农史, 3: 1-13
- 张弛, 洪晓纯. 2009. 华南和西南地区农业出现的时间及相关问题. 南方文物, 3: 64-71
- 张东菊, 董广辉, 王辉, 任晓燕, 哈比布, 强明瑞, 陈发虎. 2016. 史前人类向青藏高原扩散的历史过程和可能驱动机制. 中国科学: 地球科学, 46: 1007-1023
- 张光直. 1987. 中国东南海岸的“富裕的食物采集文化”. 见: 上海博物馆, 编. 上海博物馆集刊. 上海: 上海古籍出版社
- 张健平, 吕厚远, 吴乃琴, 李丰江, 杨晓燕, 王炜林, 马明志, 张小虎. 2010. 关中盆地6000-2100 cal. a BP期间黍、粟农业的植硅体证据. 第四纪研究, 30: 287-297
- 张居中, 尹若春, 杨玉璋, 王象坤, 孔昭宸, 阙绪杭. 2004. 淮河中游地区稻作农业考古调查报告. 农业考古, 3: 84-91
- 张双权, 张乐, 栗静舒, 高星. 2016. 晚更新世晚期中国古人类的广谱适应生存——动物考古学的证据. 中国科学: 地球科学, 46: 1024-1036
- 赵团结, 盖钧镒. 2004. 栽培大豆起源与演化研究进展. 中国农业科学, 37: 954-954
- 赵理怪, 毛礼米. 2015. 四种稻属植物花粉外壁TEM的超微结构比较研究. 古生物学报, 54: 547-555
- 赵志军. 2014. 中国古代农业的形成过程——浮选出土植物遗存证据. 第四纪研究, 34: 73-84
- 赵志军. 2015. 小麦传入中国的研究——植物考古资料. 南方文物, 5: 44-52
- 赵志军, 杨金刚. 2017. 考古出土炭化大豆遗存的鉴定标准和方法. 南方文物, 3
- 郑云飞, 孙国平, 陈旭高. 2007. 7000年前考古遗址出土稻谷的小穗轴特征. 科学通报, 52: 1037-1041
- 郑云飞, 陈旭高, 王海明. 2013. 浙江嵊州小黄山遗址的稻作生产——来自植物硅酸体的证据. 农业考古, 4: 11-17
- 郑云飞, 蒋乐平, Crawford W. 2016. 稻谷遗存落粒性变化与长江下游水稻起源和驯化. 南方文物, 3: 122-130
- 周昆叔. 2002. 花粉分析与环境考古. 北京: 学苑出版社
- Atahan P, Itzstein-Davey F, Taylor D, Dodson J, Qin J, Zheng H, Brooks A. 2008. Holocene-aged sedimentary records of environ-

- mental changes and early agriculture in the lower Yangtze, China. [Quat Sci Rev](#), 27: 556–570
- Ball T, Chandler-Ezell K, Dickau R, Duncan N, Hart T C, Iriarte J, Lentfer C, Logan A, Lu H, Madella M, Pearsall D M, Piperno D R, Rosen A M, Vrydaghs L, Weisskopf A, Zhang J. 2016. Phytoliths as a tool for investigations of agricultural origins and dispersals around the world. [J Archaeol Sci](#), 68: 32–45
- Ball T, Vrydaghs L, Van Den Hauwe I, Manwaring J, De Langhe E. 2006. Differentiating banana phytoliths: Wild and edible *Musa acuminata* and *Musa balbisiana*. [J Archaeol Sci](#), 33: 1228–1236
- Bar-Yosef O. 1998. The Natufian culture in the Levant, threshold to the origins of agriculture. [Evol Anthropol](#), 6: 159–177
- Bellwood P. 2005. *First Farmers: The Origins of Agricultural Societies*. Malden: Wiley-Blackwell. 384
- Castillo C C, Tanaka K, Sato Y I, Ishikawa R, Bellina B, Higham C, Chang N, Mohanty R, Kajale M, Fuller D Q. 2016. Archaeogenetic study of prehistoric rice remains from Thailand and India: Evidence of early *japonica* in South and Southeast Asia. [Archaeol Anthropol Sci](#), 8: 523–543
- Chen F H, Dong G H, Zhang D J, Liu X Y, Jia X, An C B, Ma M M, Xie Y W, Barton L, Ren X Y, Zhao Z J, Wu X H, Jones M K. 2015. Agriculture facilitated permanent human occupation of the Tibetan Plateau after 3600 B.P. [Science](#), 347: 248–250
- Choi J Y, Platts A E, Fuller D Q, Hsing Y I, Wing R A, Purugganan M D. 2017. The rice paradox: Multiple origins but single domestication in Asian rice. [Mol Biol Evol](#), 34: 248–250
- Clark P U, Dyke A S, Shakun J D, Carlson A E, Clark J, Wohlfarth B, Mitrovica J X, Hostetler S W, McCabe A M. 2009. The Last Glacial Maximum. [Science](#), 325: 710–714
- Crawford G W. 2006. East Asian plant domestication. In: Stark M T, ed. *Archaeology of Asia*. Oxford: Blackwell Publishing Ltd. 77–95
- Dallongeville S, Garnier N, Rolando C, Tokarski C. 2015. Proteins in art, archaeology, and paleontology: From detection to identification. [Chem Rev](#), 116: 2–79
- Deng Z, Hung H C, Carson M T, Bellwood P, Yang S L, Lu H. 2017. The first discovery of Neolithic rice remains in eastern Taiwan: Phytolith evidence from the Chaolaiqiao site. [Archaeol Anthropol Sci](#), 68, doi: 10.1007/s12520-017-0471-z
- Deng Z, Qin L, Gao Y, Weisskopf A R, Zhang C, Fuller D Q. 2015. From early domesticated rice of the middle yangtze basin to millet, rice and wheat agriculture: Archaeobotanical macro-remains from Baligang, Nanyang Basin, Central China (6700–500 BC). [Plos One](#), 10: e0139885
- Diao X, Jia G. 2017. Origin and Domestication of Foxtail Millet. In: Doust A, Diao X, eds. *Genetics and Genomics of Setaria*. Plant Genetics and Genomics: Crops and Models. Vol 19. Bern: Springer International Publishing. 61–72
- Dodson J R, Li X, Zhou X, Zhao K, Sun N, Atahan P. 2013. Origin and spread of wheat in China. [Quat Sci Rev](#), 72: 108–111
- Dykoski C A, Edwards R L, Cheng H, Yuan D, Cai Y, Zhang M, Lin Y, Qing J, An Z, Revenaugh J. 2011. A high-resolution, absolute-dated Holocene and deglacial Asian monsoon record from Dongge Cave, China. [Earth Planet Sci Lett](#), 233: 71–86
- Fægri K, Iversen J. 1992. *Textbook of Pollen Analysis*. 5th ed. Chichester: Wiley. 328
- Fearn M L, Liu K. 1995. Maize pollen of 3500 B.P. from Southern Alabama. [Am Antiquity](#), 60: 109–117
- Fujiwara H. 1976. Fundamental studies in plant opal analysis. 1. On the silica bodies of motor cell of rice plants and their near relatives, and the method of quantitative analysis. [Archaeol Nat Sci](#), 9: 15–29
- Fukunaga K, Ichitani K, Kawase M. 2006. Phylogenetic analysis of the rDNA intergenic spacer subrepeats and its implication for the domestication history of foxtail millet, *Setaria italica*. [Theor Appl Genet](#), 113: 261–269
- Fuller D Q, Qin L, Zheng Y, Zhao Z, Chen X, Hosoya L A, Sun G P. 2009. The domestication process and domestication rate in rice: Spikelet bases from the Lower Yangtze. [Science](#), 323: 1607–1610
- Fuller D Q, Sato Y I, Castillo C, Qin L, Weisskopf A R, Kingwell-Banham E J, Song J, Ahn S M, van Etten J. 2010. Consilience of genetics and archaeobotany in the entangled history of rice. [Archaeol Anthropol Sci](#), 2: 115–131
- Ge Y, Lu H, Zhang J, Wang C, He K, Huan X. 2016. Phytolith analysis for the identification of barnyard millet (*Echinochloa* sp.) and its implications. [Archaeol Anthropol Sci](#), 71, doi: 10.1007/s12520-016-0341-0
- Gu Y, Zhao Z, Pearsall D M. 2013. Phytolith morphology research on wild and domesticated rice species in East Asia. [Quat Int](#), 287: 141–148
- Hart D M, Wallis L A. 2003. Phytolith and starch research in the Australian-Pacific-Asian regions: The state of the art. *Terra Australis*, 19: 237–242
- Harvey E L, Fuller D Q. 2005. Investigating crop processing using phytolith analysis: The example of rice and millets. [J Archaeol Sci](#), 32: 739–752
- He K, Lu H, Zhang J, Wang C, Huan X. 2017. Prehistoric evolution of the dualistic structure mixed rice and millet farming in China. [Holocene](#), doi: 10.1177/0959683617708455
- Hesse M, Buchner R, Froschradivo A, Halbritter H, Ulrich S, Weber M, Zetter R. 2009. *Pollen Terminology: An Illustrated Handbook*. Vienna: Springer Vienna
- Hu X, Wang J, Lu P, Zhang H. 2009. Assessment of genetic diversity in broomcorn millet (*Panicum miliaceum* L.) using SSR markers. [J](#)

- Genets Genomics*, 36: 491–500
- Huan X, Lu H, Wang C, Tang X, Zuo X, Ge Y, He K. 2015. Bulliform phytolith research in wild and domesticated rice paddy soil in South China. *Plos One*, 10: e0141255
- Huang X, Kurata N, Wei X, Wang Z X, Wang A, Zhao Q, Zhao Y, Liu K, Lu H, Li W, Guo Y, Lu Y, Zhou C, Fan D, Weng Q, Zhu C, Huang T, Zhang L, Wang Y, Feng L, Furuumi H, Kubo T, Miyabayashi T, Yuan X, Xu Q, Dong G, Zhan Q, Li C, Fujiyama A, Toyoda A, Lu T, Feng Q, Qian Q, Li J, Han B. 2012. A map of rice genome variation reveals the origin of cultivated rice. *Nature*, 490: 497–501
- Hunt H V, Badakshi F, Romanova O, Howe C J, Jones M K, Heslop-Harrison J S P. 2014. Reticulate evolution in *Panicum* (Poaceae): The origin of tetraploid broomcorn millet, *P. miliaceum*. *J Exp Bot*, 65: 3165–3175
- Izawa T, Konishi S, Shomura A, Yano M. 2009. DNA changes tell us about rice domestication. *Curr Opin Plant Biol*, 12: 185–192
- Jin G Y, Wu W W, Zhang K S, Wang Z B, Wu X H. 2014. 8000-year old rice remains from the north edge of the Shandong Highlands, East China. *J Archaeol Sci*, 51: 34–42
- Jones H, Lister D L, Cai D, Kneale C J, Cockram J, Peña-Chocarro L, Jones M K. 2016. The trans-Eurasian crop exchange in prehistory: Discerning pathways from barley phylogeography. *Quat Int*, 426: 26–32
- Lee G A, Crawford G W, Liu L, Chen X. 2007. Plants and people from the Early Neolithic to Shang periods in North China. *Proc Natl Acad Sci USA*, 104: 1087–1092
- Liu L, Lee G A, Jiang L, Zhang J. 2007. Evidence for the early beginning (c. 9000 cal. BP) of rice domestication in China: A response. *Holocene*, 17: 1059–1068
- Liu X, Reid R E, Lightfoot E, Matuzeviciute G M, Jones M K. 2016. Radical change and dietary conservatism: Mixing model estimates of human diets along the Inner Asia and China's mountain corridors. *Holocene*, 26: 1556–1565
- Lu H, Liu Z, Wu N, Berné S, Saito Y, Liu B, Wang L. 2002. Rice domestication and climatic change: Phytolith evidence from East China. *Boreas*, 31: 378–385
- Lu H, Yang X, Ye M, Liu K B, Xia Z, Ren X, Cai L, Wu N, Liu T S. 2005. Culinary archaeology: Millet noodles in Late Neolithic China. *Nature*, 437: 967–968
- Lu H Y, Zhang J P, Liu K B, Wu N Q, Li Y M, Zhou K S, Ye M L, Zhang T Y, Zhang H J, Yang X Y, Shen L C, Xu D K, Li Q. 2009a. Earliest domestication of common millet (*Panicum miliaceum*) in East Asia extended to 10000 years ago. *Proc Natl Acad Sci USA*, 106: 7367–7372
- Lu H, Zhang J, Yang Y, Yang X, Xu B, Yang W, Tong T, Jin S, Shen C, Rao H, Li X, Lu H, Fuller D Q, Wang L, Wang C, Xu D, Wu N. 2016. Earliest tea as evidence for one branch of the Silk Road across the Tibetan Plateau. *Sci Rep*, 6: 18955
- 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 Sci Rev*, 26: 759–772
- Lu H, Zhang J, Wu N, Liu K B, Xu D, Li Q. 2009b. Phytoliths Analysis for the Discrimination of Foxtail Millet (*Setaria italica*) and Common Millet (*Panicum miliaceum*). *Plos One*, 4: e4448
- Ma Y, Yang X, Huan X, Wang W, Ma Z, Li Z, Sun G, Jiang L, Zhuang Y, Lu H. 2016. Rice bulliform phytoliths reveal the process of rice domestication in the Neolithic Lower Yangtze River region. *Quat Int*, 426: 126–132
- Mao L, Yang X. 2015. Pollen morphology of cereals and associated wild relatives: Reassessing potentials in tracing agriculture history and limitations. *Appl Cata B Environ*, 162: 364–371
- Märkle T, Rösch M. 2008. Experiments on the effects of carbonization on some cultivated plant seeds. *Veget Hist Archaeobot*, 17: 257–263
- Miller N F, Spengler R N, Frachetti M. 2016. Millet cultivation across Eurasia: Origins, spread, and the influence of seasonal climate. *Holocene*, 26: 1566–1575
- Pearsall D M. 2015. Paleoethnobotany: A Handbook of Procedures. 3rd ed. Walnut Creek: Left Coast Press
- Pearsall D M, Piperno D R, Dinan E H, Umlauf M, Zhao Z, Benfer Jr. R A. 1995. Distinguishing rice (*Oryza sativa* Poaceae) from wild *Oryza* species through Phytolith analysis: Results of preliminary research. *Econ Bot*, 49: 183–196
- Piperno D R. 1984. A comparison and differentiation of phytoliths from maize and wild grasses: Use of morphological criteria. *Am Antiquity*, 49: 361–383
- Piperno D R. 2006. Phytoliths: A Comprehensive Guide for Archaeologists and Paleoecologists. Lanham: AltaMira Press
- Piperno D R, Weiss E, Holst I, Nadel D. 2004. Processing of wild cereal grains in the Upper Palaeolithic revealed by starch grain analysis. *Nature*, 430: 670–673
- Piperno D R, Ranere A J, Holst I, Iriarte J, Dickau R. 2009. Starch grain and phytolith evidence for early ninth millennium B.P. maize from the Central Balsas River Valley, Mexico. *Proc Natl Acad Sci USA*, 106: 5019–5024
- Rao H, Li B, Yang Y, Ma Q, Wang C. 2014. Proteomic identification of organic additives in the mortars of ancient Chinese wooden buildings. *Anal Methods*, 7: 143–149
- Rao H, Yang Y, Hu X, Yu J, Jiang H. 2017. Identification of an ancient birch bark quiver from a Tang Dynasty (A.D. 618–907) Tomb in Xinjiang, Northwest China. *Econ Bot*, 71: 32–44

- Silva F, Stevens C J, Weisskopf A, Castillo C, Qin L, Bevan A, Fuller D Q. 2015. Modelling the geographical origin of rice cultivation in Asia using the rice archaeological database. *Plos One*, 10: e0137024
- Solazzo C, Fitzhugh W W, Rolando C, Tokarski C. 2008. Identification of protein remains in archaeological potsherds by proteomics. *Anal Chem*, 80: 4590–4597
- Stevens C J, Murphy C, Roberts R, Lucas L, Silva F, Fuller D Q. 2016. Between China and South Asia: A Middle Asian corridor of crop dispersal and agricultural innovation in the Bronze Age. *Holocene*, 26: 1541–1555
- Torrence R, Barton H. 2006. Ancient Starch Research. Walnut Creek: Left Coast Press
- Woodbridge J, Fyfe R M, Roberts N, Downey S, Edinborough K, Shennan S. 2014. The impact of the Neolithic agricultural transition in Britain: A comparison of pollen-based land-cover and archaeological ^{14}C date-inferred population change. *J Archaeol Sci*, 51: 216–224
- Wu Y, Jiang L, Zheng Y, Wang C, Zhao Z. 2014. Morphological trend analysis of rice phytolith during the early Neolithic in the Lower Yangtze. *J Archaeol Sci*, 49: 326–331
- Yang X, Perry L. 2013. Identification of ancient starch grains from the tribe Triticeae in the North China Plain. *J Archaeol Sci*, 40: 3170–3177
- Yang X, Ma Z, Li J, Yu J, Stevens C, Zhuang Y. 2015a. Comparing subsistence strategies in different landscapes of North China 10000 years ago. *Holocene*, 25: 1957–1964
- Yang X, Zhang J, Perry L, Ma Z, Wan Z, Li M, Diao X, Lu H. 2012a. From the modern to the archaeological: Starch grains from millets and their wild relatives in China. *J Archaeol Sci*, 39: 247–254
- Yang X, Barton H J, Wan Z, Li Q, Ma Z, Li M, Zhang D, Wei J. 2013. Sago-type palms were an important plant food prior to rice in Southern subtropical China. *Plos One*, 8: e63148
- Yang X, Wan Z, Perry L, Lu H, Wang Q, Zhao C, Li J, Xie F, Yu J, Cui T, Wang T, Li M, Ge Q. 2012b. Early millet use in northern China. *Proc Natl Acad Sci USA*, 109: 3726–3730
- Yang X, Fuller D Q, Huan X, Perry L, Li Q, Li Z, Zhang J, Ma Z, Zhuang Y, Jiang L, Ge Y, Lu H. 2015b. Barnyard grasses were processed with rice around 10000 years ago. *Sci Rep*, 5: 16251
- Yang Y, Shevchenko A, Knaust A, Abuduresule I, Li W, Hu X, Wang C, Shevchenko A. 2014. Proteomics evidence for kefir dairy in Early Bronze Age China. *J Archaeol Sci*, 45: 178–186
- Zhang C, Hung H. 2010. The emergence of agriculture in southern China. *Antiquity*, 84: 11–25
- Zhang J, Lu H, Huang L. 2014. Calciphytoliths (calcium oxalate crystals) analysis for the identification of decayed tea plants (*Camellia sinensis* L.). *Sci Rep*, 4: 6703
- Zhang J P, Lu H Y, Wu N Q, Li F J, Yang X Y, Wang W L, Ma M Z, Zhang X H. 2010. Phytolith evidence for rice cultivation and spread in Mid-Late Neolithic archaeological sites in central North China. *Boreas*, 39: 592–602
- Zhang J P, Lu H Y, Wu N Q, Yang X Y, Diao X M. 2011. Phytolith analysis for differentiating between foxtail millet (*Setaria italica*) and green foxtail (*Setaria viridis*). *Plos One*, 6: e19726
- Zhang J P, Lu H Y, Gu W F, Wu N Q, Zhou K S, Hu Y Y, Xin Y J, Wang C. 2012. Early mixed farming of millet and rice 7800 years ago in the Middle Yellow River Region, China. *Plos One*, 7: e52146
- Zhao Z, Pearsall D M, Benfer R A, Piperno D R. 1998. Distinguishing rice (*Oryza sativa* poaceae) from wild *Oryza* species through phytolith analysis, II Finalized method. *Econ Bot*, 52: 134–145
- Zheng Y F, Crawford G W, Jiang L P, Chen X G. 2016. Rice domestication revealed by reduced shattering of archaeological rice from the Lower Yangtze valley. *Sci Rep*, 6: 28136
- Zuo X, Lu H, Li Z, Song B, Xu D, Zou Y, Wang C, Huan X, He K. 2016. Phytolith and diatom evidence for rice exploitation and environmental changes during the early mid-Holocene in the Yangtze Delta. *Quat Res*, 86: 304–315