

# 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

杨青<sup>①③</sup>, 李小强<sup>②\*</sup>, 周新郢<sup>①②</sup>, 赵克良<sup>①③</sup>, 纪明<sup>③④</sup>, 孙楠<sup>①③</sup>

① 中国科学院地球环境研究所, 黄土与第四纪国家重点实验室, 西安 710075;

② 中国科学院古脊椎动物与古人类研究所人类演化实验室, 北京 100044;

③ 中国科学院研究生院, 北京 100049;

④ 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 南京 210008

\* 联系人, E-mail: lixiaoqiang@ivpp.ac.cn

2010-12-08 收稿, 2011-01-26 接受

国家重点基础研究发展计划(2010CB9502004)和中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX2-YW-Q1-03)资助

**摘要** 粟、黍炭化种子遗存是研究早期人类活动的重要植物考古材料。通过不同温度条件下的室内炭化实验及野外火焙实验, 研究现代粟、黍种子形态和亚显微结构特征, 拟揭示粟、黍种子遗存形成的条件与原因。200℃以下种子形态变化呈缩小趋势, 胚乳淀粉粒保持结晶结构; 250℃粟形态呈膨胀增大趋势, 黍种子形变较严重, 粟和黍胚乳淀粉粒都过渡为无定形结构; 300℃种子部分灰化, 炭化种子出现多孔现象, 亚显微结构呈蜂窝状的孔洞。北牛遗址史前窖穴中的种子遗存仍保持结晶结构, 显示水分子不参与淀粉结晶, 为脱水炭化作用而成。野外火焙实验结果显示火堆底部地表的炭化粟、黍种子亚显微结构呈无定形, 考古文化堆积中炭化种子遗存亚显微结构也呈无定形, 与250℃条件下的炭化种子结构特征相一致, 判定文化层的种子遗存形成并不受明火直接烧烤, 而是在250℃左右的温度条件下烘焙而形成的。

## 关键词

粟  
黍  
炭化过程  
亚显微结构  
植物考古

从考古埋藏中采集和鉴定植物遗存, 是植物考古学(Archaeobotany)研究的第一步<sup>[1]</sup>, 也是探讨农业起源与传播<sup>[2]</sup>, 认识和了解先民农业活动及其与植物间的相互关系, 重建古环境和早期农业经济结构的基础<sup>[3]</sup>。

植物遗存类型一般可归为两大类: 植物大化石(种子、果实、木材等)和植物微体化石(孢粉、植硅体及淀粉粒等)<sup>[4]</sup>。由于有机物质容易腐烂, 地层中新鲜的种子及果实受埋藏环境的影响, 通常不易保存下来, 而经过炭化作用以后, 植物种子、果实、木材的化学性质变得非常稳定, 受埋藏环境变化影响甚小, 能够长久地保存在文化堆积中<sup>[5,6]</sup>。有关考古遗址中植物炭化遗存形成原因有多种解释, 一般认为它们的形成与火有关, 是高温烤焙的结果<sup>[4]</sup>, 但也存在自然脱水炭化的植物遗存<sup>[7-9]</sup>。目前, 植物炭化过

程与原因、温度条件以及形态和结构变化等尚缺乏系统研究, 影响了考古埋藏学、形态学以及早期农业活动研究的深入。

粟(*Setaria italica*)和黍(*Panicum miliaceum*)是中国北方早期旱作农业的代表作物, 其栽培历史可以追溯到距今约10000年前<sup>[10]</sup>, 并广泛分布于我国北方新石器时代不同文化期(如裴李岗文化、磁山文化、仰韶文化、大汶口文化、龙山文化、马家窑文化和齐家文化)的遗址中<sup>[4,11]</sup>。粟、黍农业的起源、扩散与传播对东亚文化和文明的发展意义重大。

近年来, 随着浮选法在植物考古中的广泛应用, 考古遗址中粟和黍的研究取得了许多重要成果<sup>[12-15]</sup>。以现代种子籽粒的外部形态特征为基础, 开展粟和黍炭化颖果(俗称米粒)的形态学鉴定是直接且有效

英文版见: Yang Q, Li X Q, Zhou X Y, et al. Investigation of the ultrastructural characteristics of foxtail and broomcorn millet during carbonization and its application in archaeobotany. Chinese Sci Bull, 2011, 56, doi: 10.1007/s11434-011-4423-1

的方法<sup>[16-18]</sup>。一些学者也通过粟和黍谷粒稃片的扫描电子显微镜分析来鉴定粟和黍<sup>[19]</sup>。然而,谷粒炭化后发生形变,容易破碎而不完整,常常缺失重要的鉴定部位,如稃片、胚区、果疤等,使得种子种类的区分变得困难。一些学者认为可以通过区别种子内部结构差异以鉴定植物种属,提高鉴定的精度<sup>[20-22]</sup>。现代粟和黍苞叶等植物组织的植硅体研究为史前粟和黍的鉴定提供了新途径<sup>[10]</sup>。

目前,考古遗址中粟和黍种子遗存的炭化过程及其形成条件与原因(燃烧炭化或脱水炭化)等方面,还缺少细致的工作与可信的数据,影响了炭化种子形态学鉴别,早期粟和黍籽粒的储存与埋藏,先民火活动特征以及有机碳同位素示踪等研究工作。本文选择现代粟和黍种子,设计不同的烤焙温度和时间,进行人工炭化实验,了解种子颗粒在炭化过程中外部形态以及内部亚显微结构特征变化,确定粟和黍种子炭化的温度范围,同时通过野外火焙炭化实验进行验证,并与相对应的考古粟、黍遗存进行对比,判断炭化粟、黍种子形成的温度条件,探讨炭化种子遗存形成的原因,为早期农业活动及环境效应研究提供基础证据。

## 1 样品的采集与分析

(i) 实验材料的选择。现代粟、黍种子样品在2008年采集于黄土高原地区,其中粟样品采自陕西省宜君县、延安市、神木县及甘肃省肃南县,黍样品采自陕西省甘泉县、绥德县、内蒙古伊金霍洛旗及包头市。考古遗存样品来自关中盆地灰堆坡遗址、马南遗址、北牛遗址、南沙遗址以及北牛遗址史前窖穴的炭化粟黍种子遗存。现代样品自然晾干后,根据采样点将采自4个不同地点的现代粟和黍样品分别分为4组,每组样品各随机选取22份,每份由5粒种子随机组成,使用测微尺测量种子长、宽和厚度以及胚区长度和宽度,以平均值表示。

(ii) 人工炭化方法。将上述测量好的8组176份现代粟、黍样品分别装入开口指形瓶内,分别设置50, 100, 150, 200, 250和300℃6个不同的恒温条件,每组各取1份样品等距离置于电热干燥箱中部网架上,其中,50和100℃下以时间间隔3h加热;150, 200, 250和300℃下分别以时间间隔0.5, 1, 2, 4, 8h加热,进行人工炭化实验。

(iii) 人工炭化样品的形态特征观察。用双筒实

体显微镜观察不同温度和加热时间下粟、黍种子的形态特征,并测量加热处理后每份样品全部5粒种子长、宽和厚度以及胚区长度和宽度,以平均值表示。

(iv) 野外火焙炭化实验。野外空地掘坑(深约15cm),用干燥的木材及其枝叶生火进行粟、黍样品炭化实验,时长约45min。采取土埋法和散布法,将样品置于火堆的不同部位,包括:(1)火堆底部土埋法(土埋厚度约3~5cm);(2)火堆底部地表散布法;(3)火堆外围散布法;(4)火堆中部散布法。

(v) 种子胚乳淀粉粒的扫描电子显微镜观察。对粟和黍种子作切面观察,可见其主要由种皮、胚和胚乳3部分组成。种皮为一单层大细胞组成,胚乳由位于最外层的糊粉层和内层的淀粉层组成<sup>[23]</sup>。禾本科植物成熟籽粒中,淀粉体为胚乳细胞的主要积累物<sup>[24,25]</sup>。淀粉是一种天然多晶聚合物,淀粉颗粒是由直链淀粉和支链淀粉有序地聚集而成,其结构主要是由结晶区和非结晶区交替构成<sup>[26]</sup>。因此,对粟、黍籽粒胚乳细胞淀粉体的大小、形状、结构及排列分布等特征进行扫描电子显微镜观察,对于分析和研究不同炭化条件下的种子亚显微结构特征及变化具有十分重要的意义。

选取部分样品进行亚显微结构扫描电子显微镜观察,包括:(1)未经处理的现代粟、黍种子;(2)经过人工炭化实验的部分粟、黍种子;(3)各遗址文化层和北牛遗址史前窖穴出土的炭化粟、黍种子遗存;(4)野外炭化实验的部分粟、黍样品。将样品架在侧置开叉的镊子上,用双面刀片在中部旋压敲击,使其中部在压力下自然断裂,用刀片切下断裂部,断裂面即观察面。用导电双面胶将待观察样品分别黏附于样品台上,置于ZEISS EVO Ma10型扫描电子显微镜下观察种子断面的胚乳部分并拍照。

## 2 研究结果

### 2.1 炭化样品外部形态特征变化

图1显示了不同加热温度条件下粟和黍形态特征变化。加热处理所获取的种子样品,在50和100℃恒温条件下加热3h,粟和黍种子和胚区都未显示炭化迹象,150℃恒温条件下胚区明显炭化,但种皮并未炭化,仅种皮颜色随加热时间延长略微加深,受热8h后黍种皮变成棕色。低于200℃的低温条件处理的粟、黍种子的外部形态除胚区宽度明显缩小(<-5%),

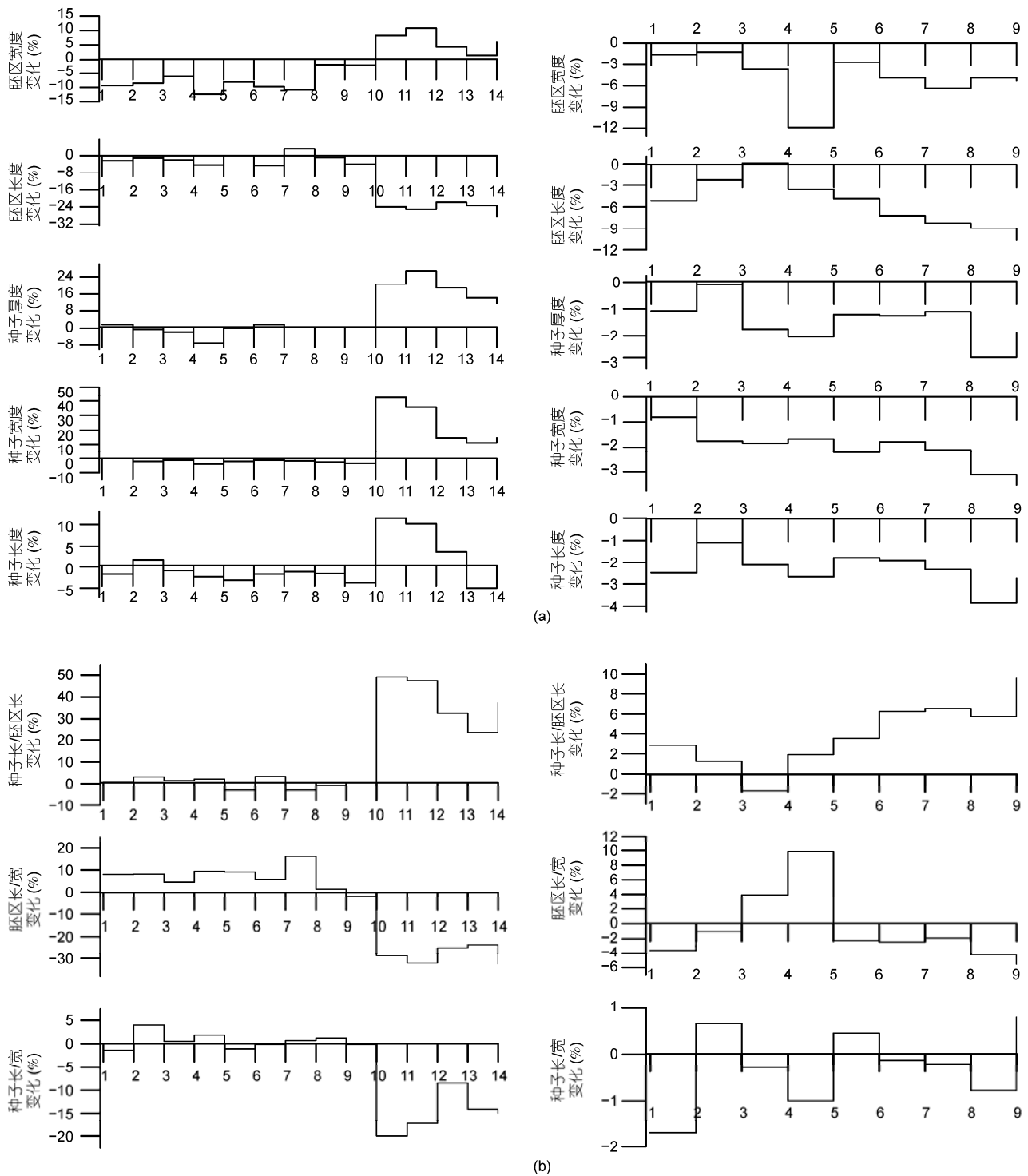


图1 不同温度控制条件下的栗和黍种子形态各部位变化(a)和各部分比例变化(b)

左图为栗样品, 右图为黍样品. 横坐标 1~14 分别代表不同的炭化条件: 1, 50℃下加热 3 h; 2, 100℃下加热 3 h; 3, 150℃下加热 2 h; 4, 150℃下加热 8 h; 5, 200℃下加热 0.5 h; 6, 200℃下加热 1 h; 7, 200℃下加热 2 h; 8, 200℃下加热 4 h; 9, 200℃下加热 8 h; 10, 250℃下加热 0.5 h; 11, 250℃下加热 1 h; 12, 250℃下加热 2 h; 13, 250℃下加热 4 h; 14, 250℃下加热 8 h

其他特征如种子长、宽、厚度和胚区长度都没有显著变化。但测量数据表明随温度升高和加热时间增长, 种子形态有逐渐缩小的趋势, 粟种子长度由增大 1.80% 过渡为缩小 3.10%, 宽度由缩小 0.28% 到缩小 3.79%, 厚度由增大 1.83% 到缩小 7.00%; 黍种子长度由缩小 1.10% 到缩小 2.66%, 宽度由缩小 0.80% 到缩小 1.84%。

在 200℃ 恒温条件下样品受热 0.5 h 即炭化变黑, 但样品的外形并未随加热时间延长而发生显著变化。测量数据表明, 除了粟种子厚度略微增大外, 种子其他特征如种子长、宽, 胚区长、宽上都有不同程度的缩小(表 1), 而其形态特征及不同形态之间的比例关系也随之变化: 种子长与宽之比变化不显著; 粟的胚区长与宽之比有增大趋势, 而黍的变化趋势正好相反, 呈缩小趋势; 粟的种子长与胚区长之比变化趋势不显著, 而黍的变化呈增大趋势。

在 250℃ 恒温条件下样品受热 0.5 h 就发生严重炭化, 在不同受热时间下样品形态特征变化较为一致: 种子受急热而爆裂, 内容物向外膨胀, 产生较大的、不规则形变, 炭化种子中渗出焦油状物质使籽粒凝结成块。通过测量粟种子形态特征, 发现变化明显, 除胚区长度明显缩小以外, 其他特征如种子长、宽、厚度以及胚区宽度都显著变大。由于黍受热膨胀后变形较严重, 无法测量其形态特征。300℃ 条件下, 样品炭化后焦油渗出, 种子严重变形, 膨胀、爆裂、凝成一团块, 出现多孔现象。黍和粟的种子及胚区形态特征均无法测量。

## 2.2 粟和黍现代及炭化样品亚显微结构特征

现代种子胚乳不同部位淀粉体的形状和大小观

测结果表明, 粟淀粉体的分布有一定规律性, 表现为: 晶状结构, 近籽实边缘的淀粉体排列较紧密且呈多角形(图 2(a)), 小淀粉体上覆盖着一薄层蛋白质; 松软的胚乳包含很多空隙, 淀粉粒呈近球形(图 2(b)), 其间不含蛋白质体<sup>[27]</sup>; 淀粉颗粒中心有形状大小不一的空腔(图 2(c))。黍种子淀粉层形状大小及成分也因胚乳部位不同而异, 每个部位的胚乳细胞主要含大小不同的淀粉粒和蛋白质, 蛋白质存在于淀粉粒之间的空隙中<sup>[23]</sup>。黍淀粉粒形态以多角形为主, 也存在近球形颗粒(图 3(a)和(b)), 其淀粉粒的大小总体略小于粟淀粉粒, 这一点与前人研究结果一致<sup>[28]</sup>。同时可见淀粉粒中心存在的空腔(图 3(c))。

人工炭化的粟和黍扫描电子显微镜照片显示, 其亚显微结构特征随温度升高变化明显, 且同一温度条件下粟和黍亚显微结构变化程度一致。150℃ 恒温加热条件下, 胚乳淀粉颗粒完整(图 2(d), 3(d)), 与未经处理的现代种子相比形貌几乎没有变化。200℃ 条件下, 淀粉粒结晶结构没有明显变化(图 2(e), 3(e)), 但胚乳细胞之间出现一些裂纹(图 2(f))。250℃ 条件下, 粟淀粉粒结晶结构被破坏, 呈无定形结构, 无法辨别其颗粒形貌(图 2(g))。而黍淀粉颗粒在 250℃ 恒温条件下加热 0.5 h, 胚乳中部淀粉粒首先失去结晶结构, 呈无定形结构(图 3(f)), 而靠近籽粒边缘的淀粉颗粒仍保持原来的形貌; 当加热时间延长至 8 h, 靠近籽实边缘的淀粉粒也受热变形了(图 3(g))。300℃ 条件下, 粟和黍种子淀粉颗粒不复存在, 出现蜂窝状的空洞(图 2(j), 3(j))。

炭化种子遗存的扫描电子显微镜照片显示, 文化层中获取的种子遗存内部具有显著的无定形结构(图 2(i), 3(i))。而北牛遗址史前窖穴中的种子遗存内

表 1 200℃ 加热条件下粟和黍的形态变化<sup>a)</sup>

种类	加热时间(h)	种子变化程度(%)				胚区变化程度(%)			种子长/胚区长 变化程度(%)
		长	宽	厚	长/宽	长	宽	长/宽	
粟	0.5	-3.10	-2.03	0.21	-1.09	0.06	-8.07	9.07	-3.07
	1	-1.69	-1.53	1.84	-0.12	-4.73	-9.82	5.79	3.29
	2	-1.09	-1.91	0.55	0.68	3.09	-10.85	16.17	-3.10
	4	-1.60	-2.81	0.78	1.25	-0.78	-1.96	1.36	-0.79
	8	-3.65	-3.50	0.54	-0.15	-4.13	-2.26	-1.87	0.55
黍	0.5	-1.76	-2.21	-1.21	0.45	-4.90	-2.72	-2.25	3.49
	1	-1.90	-1.78	-1.26	-0.13	-7.26	-4.86	-2.44	6.25
	2	-2.32	-2.11	-1.12	-0.21	-8.28	-6.35	-1.89	6.53
	4	-3.85	-3.09	-2.82	-0.78	-9.01	-4.84	-4.29	5.75
	8	-2.73	-3.51	-1.90	0.80	-10.65	-5.35	-5.55	9.50

a) 表内数字均取该项平均值

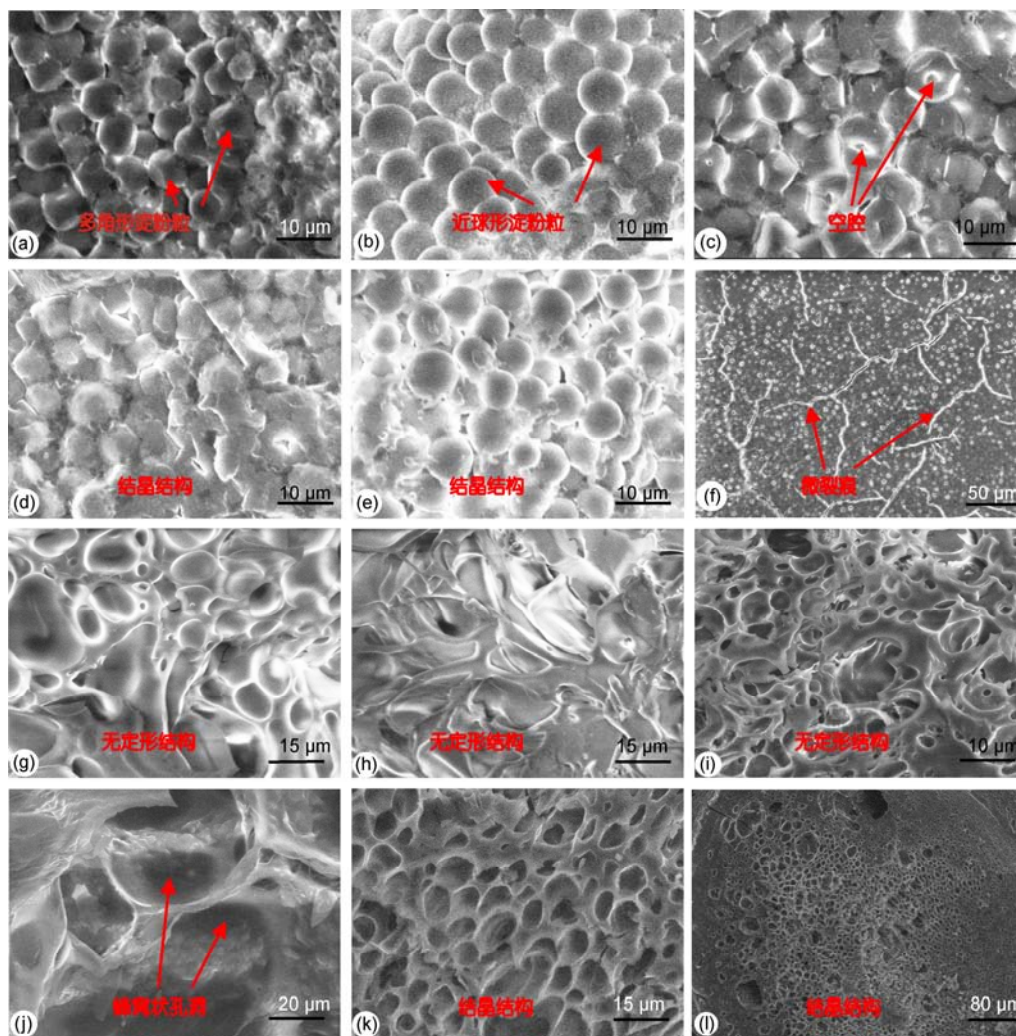


图2 粟的扫描电子显微镜(SEM)照片

(a)~(c) 未经处理的现代粟; (d) 150℃加热条件下的粟; (e), (f) 200℃加热条件下的粟; (g) 250℃加热条件下的粟; (h) 野外炭化实验中火堆底部地表的粟; (i) 南沙遗址文化层出土的粟遗存; (j) 300℃加热条件下的粟; (k), (l) 北牛遗址窖穴中的粟遗存

部存在密集排列的空洞,但仍保持良好的结晶结构(图2(k), 3(k)),同时可以清楚地看到粟种子胚乳的孔洞具有从表层到内部逐渐变大的特点(图2(l)).

### 2.3 野外炭化实验结果

从形态方面看,土埋法得到的样品表面没有任何炭化迹象,而散布法得到的样品都有不同程度的炭化迹象,其中(1)火堆底部地表的粟、黍样品大多数表面炭化成黑色,其中大部分样品仍保持完整的颗粒,其外部形态几乎没有发生变化;但也有少数样品发生爆裂,焦油渗出并黏附在籽粒周围,种子形态发生变化;(2)火堆外围的粟、黍样品炭化程度较严重,

多数种子发生爆裂,有机物质被燃烧,种子形态不完整;(3)火堆中部的粟黍样品炭化程度相当严重,多数被烧成灰烬。

观察各组样品的内部结构特征发现,土埋法得到的样品内部仍然保持其新鲜程度,而散布法得到的样品 SEM 照片显示,火堆底部地表的样品具有无定形结构(图2(h), 3(h)),与250℃下的室内炭化实验得到的样品及文化层出土的遗存样品结构相当一致。而火堆外围散布法炭化得到的粟黍样品,其淀粉粒亚显微结构未显示为结晶或无定形结构(图3(l)),与以上各种炭化条件所得到的样品亚显微结构特征显著不同。



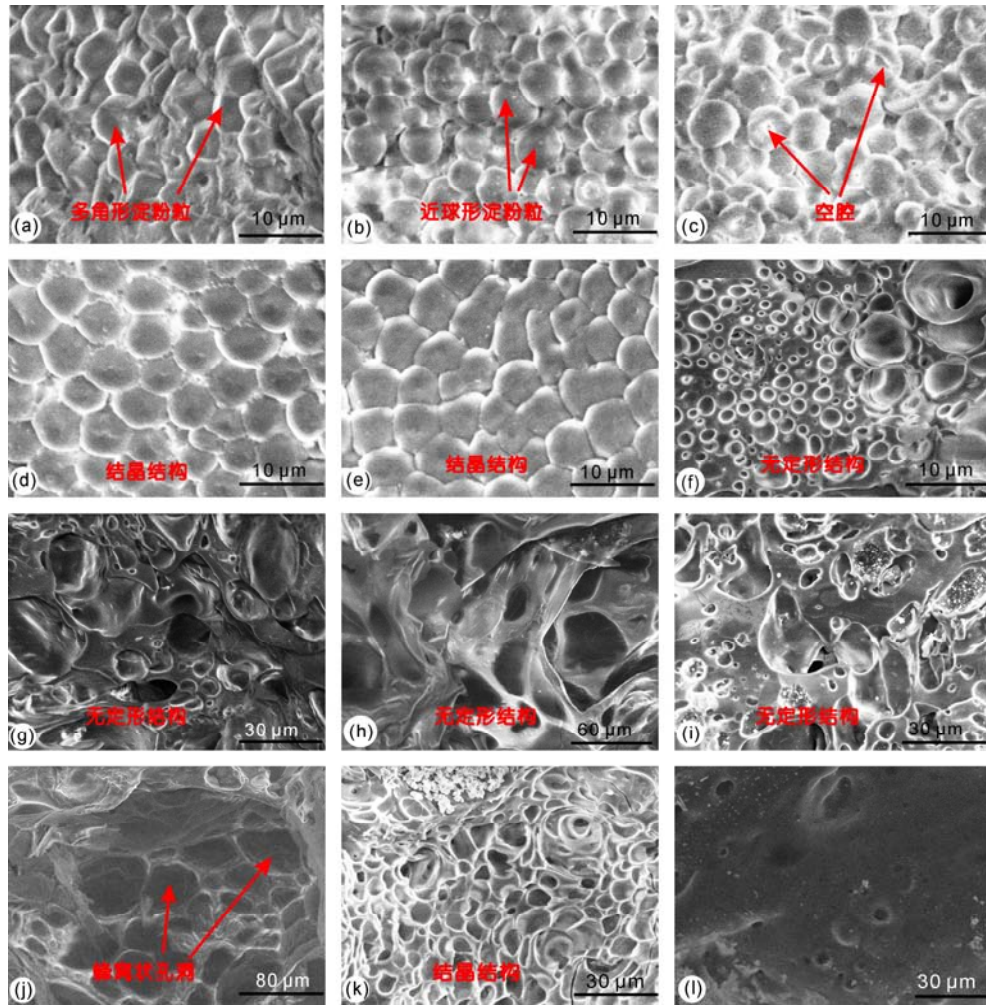


图3 黍的扫描电子显微镜(SEM)照片

(a)~(c) 未经处理的现代黍; (d) 150℃加热条件下的黍; (e) 200℃加热条件下的黍; (f) 250℃加热0.5 h的黍; (g) 250℃加热8 h的黍; (h) 野外炭化实验中火堆底部地表的黍; (i) 马南遗址文化堆积中的黍种子遗存; (j) 300℃加热条件下的黍; (k) 北牛遗址窖穴中的黍种子遗存; (l) 野外炭化实验中火堆外围的黍

### 3 讨论与结论

炭化植物遗存通常存在两种主要类型. 一类炭化植物遗存没有经过高温作用, 而是在特殊埋藏条件下脱水炭化的产物. 窖藏法是史前谷物保存的最普遍方法<sup>[29]</sup>, 关中盆地北牛遗址史前窖穴内保存有大量炭化粟、黍种子, 种子形态没有扭曲和变形, 内部仍保持着完整的结晶结构(图 2(l)), 显示了脱水炭化中水分子不参与结晶这一重要特征<sup>[30]</sup>. 另外, 炭化粟种子形成的孔洞具有从边缘到内部逐渐变大的特征, 与现代粟胚乳内淀粉颗粒近籽实边缘者小、内部颗粒较大的分布特点一致. 因此, 窖穴等特殊埋藏

环境下的植物遗存, 可以不经过高温加热作用, 通过脱水炭化而形成.

另一类, 即考古文化堆积中保存的大量炭化种子遗存. 由于它们常与木炭碎块或炭屑相伴出土, 一般认为其形成与火有关, 是受高温急热烤焙的结果<sup>[4,16]</sup>. 因此, 炭化遗存形成方式、过程和原因一直被植物考古学所关注, 人工炭化实验成为探索并解决这一问题重要途径.

人工炭化处理是将种子置于长时间的干热空气中. 通过测量、对比室内实验中各组不同温度、不同时间条件处理下的样品, 发现在不同受热情况下粟和黍种子的长、宽、厚度均出现不同程度变化, 而同

一炭化温度下,加热时间由 0.5 h 延长至 8 h, 样品炭化程度未发生显著变化. 温度低于 200℃(包括 200℃)时, 加热处理后样品的形态变化总趋势是缩小, 而在 250℃温度条件下, 粟样品的形态变化趋势是膨胀增大, 黍样品爆裂较严重, 爆裂物附着在种子周围, 使得种子形变严重, 难以测量大小. 在 300℃温度条件下, 粟、黍样品已有部分灰化, 炭化种子出现多孔现象. 这可能是由于温度在 200℃及以下时, 加热过程使种子所包含的水分子从细胞中解脱出来, 种子脱水而形态略微缩小, 但温度还不足以使其内部结构发生变化. 而 250~300℃的高温加热过程中水分迅速丧失、有机物质被炭化致使胚乳物质结构发生变化. 因此, 受热温度的高低是控制样品炭化与否及炭化程度的主要因素, 而受热时间对其影响不大.

通过观察测量不同炭化条件下粟、黍种子和胚区形态特征, 对比其测量值的变化, 发现温度低于 200℃时, 种子外形几乎没有变化; 温度为 200℃时, 尽管种子形态大小变化显著, 但其基本形态仍然很容易区分; 温度为 250℃时, 种子形态变化显著, 尤其是黍, 内容物爆出覆盖在籽粒表面, 通过种子和胚区各部分特征来鉴定其种属已显得困难了; 温度为 300℃时, 现代样品出现灰化现象, 基本形态已难以辨认, 此时无法通过形态特征来区分种属.

加热处理后的粟和黍种子亚显微结构显示, 150℃恒温加热条件下, 胚乳淀粉颗粒几乎没有变化. 200℃条件下出现的裂纹, 可能是由失水作用引起. 250℃条件下, 淀粉颗粒被破坏, 无法辨别其颗粒形貌, 呈无定形结构. 这可能是加热作用使淀粉颗粒结晶结构发生改变; 淀粉乳受热作用, 颗粒体积膨胀、破裂, 淀粉糊化, 晶体结构消失. 而黍胚乳中心区域淀粉粒首先发生变化, 说明其中心区域组织化薄弱, 热诱导首先使其受结构无序化的影响<sup>[31]</sup>. 300℃条件下, 淀粉颗粒不复存在, 出现蜂窝状的空洞, 可能是由于较高的温度引起淀粉颗粒炭化, 热分解为炭和其他不易分解残余物质. 由此可见, 随着温度升高, 种子亚显微结构变化显著; 而在同一温度条件下, 加热时间长短对其结构变化没有本质的影响. 这一点与前述种子外貌的炭化程度结果是一致的.

关中盆地灰堆坡遗址、马南遗址、北牛遗址及南沙遗址等文化层中获取的炭化种子, 其亚显微结构呈无定形排列, 这是由于淀粉在逐步加热干燥脱水过程中, 种子中含有的水分子首先参与了结晶, 后来又由于高温干燥, 使水分子脱去, 造成淀粉的结晶结构被破坏, 最后过渡为无定形结构<sup>[31]</sup>. 通过 SEM 照片可见, 炭化种子遗存与室内加热炭化实验中 250℃条件下的样品亚显微结构相当一致, 都呈无定形结构. 可见, 二者具可对比性. 因此, 粟、黍种子人工炭化实验的温度可作为考古炭化种子遗存形成温度条件的重要依据.

野外烤焙实验中不同炭化粟、黍样品的形态和亚显微结构对比研究显示, 土埋法样品受火的影响非常小, 未达到炭化程度; 而散布法样品受火的影响非常显著, 这主要是由于火堆不同部位温度的差异造成样品炭化程度的不一致. 火堆底部地表种子样品亚显微结构与 250℃温度条件下人工炭化实验样品的结构特征非常一致, 说明只有在特定环境下(如: 受热烘焙)形成的种子才可能具有无定形亚显微结构. 而直接接触明火的种子与炭化种子遗存的亚显微结构具有显著差异, 说明炭化种子遗存的形成不受明火直接烧烤.

通过粟、黍种子炭化遗存、现代样品、人工炭化样品以及野外炭化样品亚显微结构的对比研究, 可以发现它们的亚显微结构特征具有可对比性, 其结构异同可为炭化条件的判断提供依据. 结合人工炭化种子外部形态特征, 进一步对比文化层中的种子遗存和人工炭化种子的亚显微结构, 发现温度低于 200℃无法达到破坏淀粉粒结构的条件, 种子内部仍保持结晶结构; 随着温度升高, 种子内部淀粉粒结构逐渐被破坏, 250℃左右开始过渡为无定形结构, 温度达到 300℃或以上时, 籽粒内部空洞、出现灰化现象. 只有在 250℃左右温度条件下, 其淀粉颗粒破坏程度与文化层中的种子遗存最为一致, 既保持了种子的基本形态, 又使种子在埋藏条件下被很好地保存下来, 野外炭化实验也验证了热烤焙对种子产生的炭化作用. 因此, 文化层出土的粟黍种子遗存的形成, 并不受明火的直接烧烤, 其形成方式主要源自热烤焙作用, 炭化温度应该在 250℃左右.

**致谢** 感谢陕西省考古研究所胡松梅研究员在考古样品采集与研究中的建议和帮助.

## 参考文献

- 1 科林·伦福儒, 保罗·巴恩. 考古学理论、方法与实践. 北京: 文物出版社, 2004. 240-248
- 2 李小强, 周新郢, 张宏宾, 等. 考古生物指标记录的中国西北地区 5000 a BP 水稻遗存. 科学通报, 2007, 52: 673-678
- 3 赵志军. 植物考古学的学科定位与研究内容. 考古, 2001, 7: 55-61
- 4 刘长江, 靳桂云, 孔昭宸. 植物考古: 种子和果实研究. 北京: 科学出版社, 2008. 11-14, 44-51, 160-171
- 5 赵志军. 有关农业起源和文明起源的植物考古学研究. 社会科学管理与评论, 2005, 2: 82-91
- 6 赵志军. 植物考古学及其新进展. 考古, 2005, 7: 42-49
- 7 刘长江, 李月丛. 宣化辽墓出土植物遗存的鉴定. 见: 河北省文物考古研究所, 编. 宣化辽墓(上). 北京: 文物出版社, 2001. 347-351
- 8 Jiang H E, Li X, Zhao Y X, et al. A new insight into *Cannabis sativa* (Cannabaceae) utilization from 2500-year-old Yanghai Tombs, Xinjiang, China. J Ethnophar, 2006, 108: 414-422
- 9 Jiang H E, Li X, Liu C J, et al. Fruits of *Lithospermum officinale* L. (Boraginaceae) used as an early plant decoration (2500 years BP) in Xinjiang, China. J Archaeol Sci, 2007, 2: 167-170
- 10 Lü H Y, Zhang J P, Liu K-B, et al. Earliest domestication of common millet (*Panicum miliaceum*) in East Asia extended to 10,000 years ago. Proc Natl Acad Sci USA, 2009, 18: 7367-7372
- 11 安志敏. 中国的史前农业. 考古学报, 1988, 4: 369-381
- 12 孔昭宸, 刘长江, 何德亮. 山东滕州市庄里西遗址植物遗存及其在环境考古学上的意义. 考古, 1999, 7: 59-62
- 13 孔昭宸, 刘长江, 张居中. 涪池班村新石器遗址植物遗存及其在人类环境学上的意义. 人类学学报, 1999, 4: 291-295
- 14 凯利·克劳福德, 赵志军, 栾丰实, 等. 山东日照市两城镇遗址龙山文化植物遗存的初步分析. 考古, 2004, 9: 73-80
- 15 李小强, 周新郢, 周杰, 等. 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 D 辑: 地球科学, 2007, 37: 934-940
- 16 刘长江, 孔昭宸. 粟、黍籽粒的形态比较及其在考古鉴定中的意义. 考古, 2004, 8: 76-83
- 17 赵志军, 何弩. 陶寺城址 2002 年度浮选结果及分析. 考古, 2006, 5: 77-86
- 18 杨晓燕, 刘长江, 张健平, 等. 汉阳陵外藏坑农作物遗存分析及西汉早期农业. 科学通报, 2009, 54: 1917-1921
- 19 Matsutani A. Identification of Italian Millet from Esashika Site by means of scanning electron microscope. J Anthropol Soc Nippon, 1986, 94: 111-118
- 20 吉笃学. 植物考古学的研究历史与方法. 农业考古, 2008, 4: 17-28
- 21 刘海虹, 周海鹰, 张文绪. 水稻胚乳淀粉粒显微结构的初步观察. 电子显微学报, 2001, 20: 185-188
- 22 杨晓燕, 吕厚远, 夏正楷. 植物淀粉粒分析在考古学中的应用. 考古与文物, 2006, 3: 87-91
- 23 柴岩, 主编. 糜子. 北京: 中国农业出版社, 1999. 44-45
- 24 李扬汉. 禾本科作物的形态与解剖. 上海: 上海科学技术出版社, 1979. 380-381
- 25 周竹青, 朱旭彤, 王维金, 等. 不同粒型小麦品种胚乳淀粉体的扫描电镜观察. 电子显微学报, 2001, 3: 178-184
- 26 杨景峰, 罗志刚, 罗发兴. 淀粉晶体结构研究进展. 食品工业科技, 2007, 28: 240-243
- 27 Badi S M, Hosney R C, Casad A J. Pearl millet. I. characterization by SEM, amino acid analysis, lipid composition, and prolamine solubility. Cereal Chem, 1975, 4: 478-487
- 28 葛威, 刘莉, 金正耀. 几种禾本科植物淀粉粒形态比较及其考古学意义. 第四纪研究, 2010, 2: 377-384
- 29 孔昭宸, 刘长江, 张居中, 等. 中国考古遗址植物遗存与原始农业. 中原文物, 2003, 2: 4-13
- 30 桧作进. 淀粉科学. 东京: 朝仓书店, 1977. 31-32
- 31 黄强, 罗发兴, 杨连生. 淀粉颗粒结构的研究进展. 高分子材料科学与工程, 2004, 20: 19-23