

青海喇家遗址出土 4000 年前面条的成分分析与复制

吕厚远^{①②*}, 李玉梅^③, 张健平^①, 杨晓燕^④, 叶茂林^⑤, 李泉^④, 王灿^①, 吴乃琴^①

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

② 中国科学院青藏高原地球科学卓越创新中心, 北京 100101;

③ 中国科学院大学, 北京 100049;

④ 中国科学院地理科学与资源环境研究所, 北京 100101;

⑤ 中国社会科学院考古研究所, 北京 100710

* 联系人, E-mail: houyuanlu@mail.iggcas.ac.cn

2014-06-14 收稿, 2014-09-15 接受, 2015-02-09 网络版发表

国家自然科学基金(41230104)、国家重大科学研究计划(2015CB953801)、中国科学院战略性先导科技专项(XDA05130602)和国家科技支撑计划(2013BAK08B02)资助

摘要 面条是世界性大众食品, 古代人类在什么时间、什么地方、用什么材料与何种方法发明了面条, 一直是有争议的. 2005年*Nature*杂志曾简要报道了青海省喇家遗址齐家文化层出土的粟类面条. 但对齐家文化时期古人是如何利用粟类粮食做成面条的, 迄今仍然存在疑问. 本文通过对喇家遗址出土陶碗中面条残留物的植硅体、淀粉和生物标志化合物等系统分析, 提供了4000年前古代人类以粟(小米)、黍为主制作面条的综合证据. 进一步利用传统的制作饅饅面条的工具, 参考挤压糊化凝胶成型的方法, 复制了与出土面条成分、形态一致的粟类面条. 本文的研究结果为深入认识史前人类饮食文化特点提供了新证据和新视角.

关键词

喇家遗址
植硅体
淀粉
生物标志物
面条起源
粟类面条

现代面条按照制作材料的性质可分成两大类^[1-3], 一类是利用农作物“面筋蛋白”(gluten)的黏性来制作的面条, 面筋蛋白主要来自硬粒小麦(*Triticum durum* Desf)、普通小麦(*Triticum aestivum* L.)、黑麦(*Secale cereale* L.)和大麦(*Hordeum vulgare* L.). 尤以小麦类面条种类多、产量大, 亚洲小麦产量的约40%被做成了面条^[4]. 第二类是利用农作物“淀粉凝胶”(starch gels)的黏性来制作的淀粉面条^[2,5], 包括豆类淀粉面条, 如绿豆(*Vigna radiata*(L.)Wilczek)、红豆(*Phaseolus radiatus* var. *Aurea*)^[6]、云豆(*Phaseolus vulgaris*)、蚕豆(*Vicia faba* L.)和豌豆(*Pisum sativum* L.)面条等^[5]; 块茎类淀粉面条, 如木薯(*Manihot esculenta* Crantz)^[7]、红薯(*Ipomoea batatas*(L.)Lam)和马铃薯(*Solanum tuberosum* L.)面条^[8]等; 禾谷类淀粉面条, 如玉米(*Zea mays* L.)^[9]、水稻(*Oryza sativa* L.)^[10,11]、高粱(*Sorghum vulgare* Pers)^[12,13]、粟(*Setaria*

italica(L.)Beauv.)^[14]、黍(*Panicum miliaceum* L.)^[15,16]和荞麦(*Fagopyrum esculentum* Moench)面条^[2]等. 淀粉面条早期制造方法已然被记录在北魏时期贾思勰所写的《齐民要术》中^[5,17]. 淀粉面条的制作并不需要加入含面筋蛋白的小麦类面粉, 不同植物淀粉做成的不同形质的面条, 极大丰富了面条的种类.

不同种类的面条不仅是世界性的大众食品, 而且在世界各国被赋予了不同的文化内涵. 但涉及面条是在什么地方起源的, 却一直是争议的话题, 中国、意大利和阿拉伯等国家都主张过面条的发明权^[1,18]. 在所有国家有关面条的文献记录中, 中国的文献记录最早, 可以追溯到距今约2000年前后的东汉时期^[19]. 但在没有文献记录的史前时期, 古代人类是什么时候开始制作面条的, 是用什么材料和方法制作的? 一直是个迷^[1,3,18], 这主要是由于面条极难长期保存, 缺少可考证的材料.

引用格式: 吕厚远, 李玉梅, 张健平, 等. 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, 2015, 60: 744-756

英文版见: LÜ H Y, LI Y M, ZHANG J P, et al. Component and simulation of the 4000-year-old noodles excavated from the archaeological site of Lajia in Qinghai, China. *Chin Sci Bull*, 2014, 59: 5136-5152, doi: 10.1007/s11434-014-0663-1

青海省喇家遗址,是由灾难性地震和洪水泥石流摧毁的属于齐家文化的聚落遗址^[20,21],考古发掘出大量灾难环境下被埋藏的人体骨格、陶器、玉石和动物骨骼等。灾害性事件造成的泥沙快速堆积、掩埋、密封,得以保存了喇家遗址中一个盛有面条的陶碗。2002年,考古发掘出土的这个陶碗中的面条,不仅提供了世界上最早的面条实物证据,也为利用近年来发展起来的植硅体分析^[22-25]、淀粉粒分析^[26,27]和分子标志物分析^[28]等方法,研究古代面条成分、以及利用传统方法重现古代面条的制作工艺等,提供了难得的机遇。

1 材料与方 法

1.1 遗址和面条出土层位

喇家遗址位于青海省民和县官厅盆地黄河北岸二级阶地上,海拔为1780~1800 m(图1)。阶地边缘沟谷底部见河流相砂砾层,向上覆盖细粒的河漫滩沉积,以及晚更新世马兰黄土和全新世古土壤残留沉积。官厅盆地北部山地沉积第三纪红色黏土地层。官厅盆地现代主要的栽培植物,包括大麦、青稞(*Hordeum vulgare* L.var. *nudum* Hook.)、小麦、黍、粟、高粱、玉米和马铃薯等,遗址周边地区常见果树乔木,如:苹果(*Malus domestica* Borkh)、梨(*Pyrus communis* L.)和核桃(*Juglans regia* L.)等。

2002年9~12月,在遗址V区小广场上的东南角位置上,发掘的一个编号为F20的房址^[29],面积约5 m×5 m。遗址侧壁剖面上部为黄褐色耕作层,厚约

0.3~0.5 m,下伏约3 m厚的洪积-冲积层(图1(c))。冲积层之下为包含有史前面条的新石器文化层和史前人类室内活动的古地面。

F20房址古地面上散落大量陶器、石器等各类遗物,存有面条的陶碗位于房址的东北部(图2(a))^[29,30]。陶碗埋藏于棕黄色-灰色粉沙质黏土层中,覆盖在陶碗上的黏土层被清理后,可见陶碗倒扣在地面上,碗底部向上,底部直径约5.5 cm,碗口向下,碗口直径约14 cm,从碗底到碗口的高度,约6~6.3 cm(图2(b)和(c))。

当陶碗被揭开时,陶碗和里面的泥土沉积物已经能够自然分离,附着在地面上的碗内沉积物呈现圆台形,在圆台体的顶部发现有像面条一样的东西,但当时现场的工作人员并不肯定是面条,也曾怀疑是某种真菌类物质(图2(c)和(d))^[30],考古人员从多角度进行了拍照记录。

倒置陶碗内部的沉积物圆台体厚约6 cm,根据颜色和成分可以分两层。圆台体下部约3 cm厚的充填物,是相对纯净的棕黄色-灰色粉沙质黏土层,与覆盖在陶碗外的黏土层成分基本是一样的。其上部约3 cm厚的充填物为暗灰褐色粉沙质黏土层,向上表面略疏松泛浅灰白色的沉积物中,多处露出弯曲的浅黄色面条,是含有面条的沉积层。在圆台顶部,卷曲缠绕着粗细均匀、直径约0.3~0.4 cm的浅黄色面条,已风化中空,断面略呈圆形,只见一根面条端头出露在圆台顶部中部,从缠绕情况看,以端头为起点,估计面条长度约有50 cm(图2(d))^[30]。

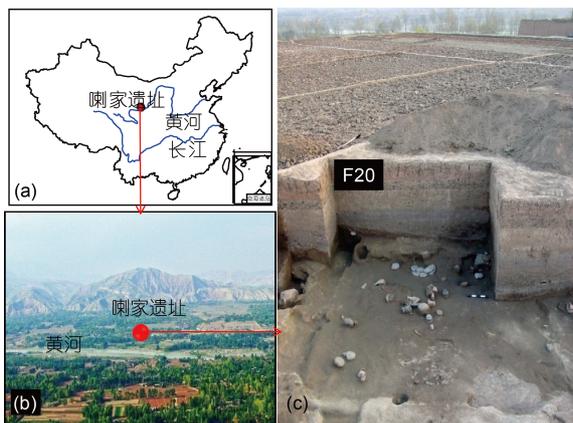


图1 研究遗址的位置。(a) 喇家遗址位置示意图。黄河和长江分别是 中国北方和南方的主要水系;(b) 喇家遗址位于黄河北岸二级阶地上;(c) 喇家遗址F20 房址发掘现场

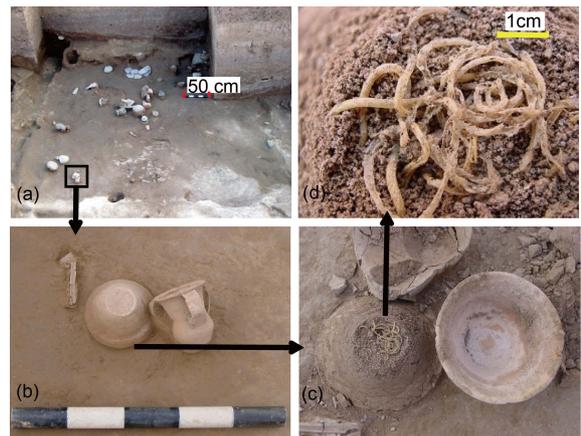


图2 喇家遗址F20 房址陶碗和面条的发掘过程。(a) 存有面条的陶碗位于房址的东北角;(b) 打开之前在原位倒扣的陶碗;(c) 打开陶碗之后,显示出史前面条位于内填沉积物圆台体的顶部;(d) 内填沉积物圆台体顶部史前面条特写照片

1.2 样品采集

(i) 考古样品采集. 为了分析陶碗内的面条是由什么组成的, 2004年, 对陶碗内充填的沉积物、面条残留物和遗址自然沉积层进行了取样.

在沉积物圆台顶部曾经出露的面条已经破碎或风化. 但在上部约3 cm厚的含面条层中, 仍然保存有残留的面条残段, 长度多在1~3 cm, 以及许多小于1 cm的面条残片(图3(a)~(d)), 对所有发现的面条残段和残片, 进行了取样. 考虑到在面条破碎风化过程中, 更细小的碎片、淀粉和其他成分等已经散落到了面条沉积层的泥土中, 决定对沉积物圆台体自上而下, 每1 cm取样, 取6个样, 分别编号①~⑥. 在圆台体上部约3 cm厚的含面条的沉积层, 所取的①②③这三个样品中, 偶尔见到细粒的面条碎末或碎片. 从F20房址附近地层取一份黄土样品, 进行对比分析.

(ii) 现代样品采集. 为准确利用植硅体、淀粉粒和生物标志化合物分析方法鉴定古代面条的成分, 对采集的有关现代植物及农作物样品进行分析, 明确鉴定标志.

采集的西北常见栽培植物和相关作物, 包括: 大麦、青稞、小麦、高粱、水稻(*Oryza sativa*)、粟、青狗尾草(*Setaria viridis*(L.)P. Beauv.)、黍、玉米和马铃薯等. 除此之外, 我们利用了已发表的植硅体、淀粉粒、生物标志化合物资料来辅助鉴定^[22,24,28,31,32].

1.3 分析方法

(i) 植硅体分析方法. 考古沉积物样品植硅体

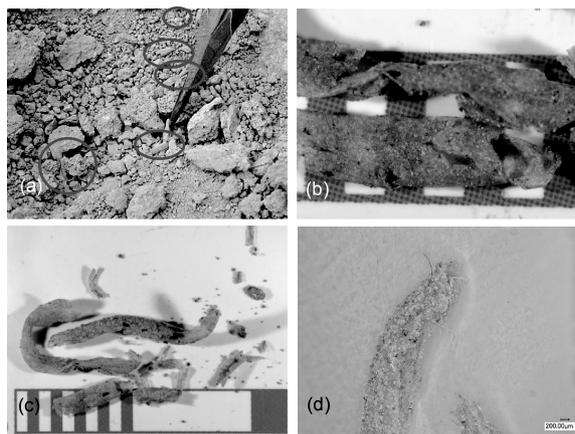


图3 喇家遗址F20房址陶碗中残留的面条样品. (a) 陶碗内沉积物圆锥体上部残留的部分面条, 圈内为面条残段和残片; (b)~(d) 残留面条的特写照片

分析, 参照Piperno^[33]和Lü等人^[34]的方法稍做改动, 首先利用焦磷酸钠($\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7$)分散沉积样品, 再利用浓度为30%的过氧化氢(H_2O_2)去除有机质, 利用浓度为15%的盐酸(HCl)去除钙质胶结物, 最后利用 ZnBr_2 重液(比重 2.35 g/cm^3)浮选. 将浮选出的植硅体用加拿大树胶制片. 使用莱卡生物显微镜400倍相差镜头进行植硅体的统计和鉴定.

现代植物植硅体分析, 重点选取农作物小穗进行分析. 参见Lü等人^[22]的方法: (1) 将植物小穗的每一部分剥离后用蒸馏水洗净, 并水浴除去附着的杂质颗粒; (2) 所有样品均置于20 mL的浓硝酸中, 浸泡12 h以上, 使有机质完全氧化; (3) 将溶液在2000 r/min的转速下离心10 min, 倾倒出上层液体, 并将残留物用蒸馏水清洗2次, 然后用95%乙醇清洗, 直到上清液清洗干净; (4) 将洗净的植硅体转移到干净的试管中, 取数滴均匀涂抹于载玻片上, 用加拿大树胶覆盖, 加盖片用于显微镜下观察和测量; (5) 在400倍放大倍数下, 利用显微镜的相差和微分干涉功能观察颖片和稃片的解剖学特征和硅质结构; (6) 利用图像分析软件进行植硅体形态参数测量.

(ii) 淀粉分析方法. 考古沉积物样品淀粉分析, 参照Piperno^[35]和杨晓燕等人^[36]方法稍做改动: 称取0.5 g样品倒入50 mL离心试管中, 加入20 mL的6% H_2O_2 溶液, 静置12 h; 离心倒掉4/5上清液, 加入40 mL六偏磷酸钠(Calgon)振荡10 min, 清洗至中性; 离心倒掉上清液, 利用氯化铯重液(比重 1.8 g/cm^3)浮选, 将浮选出的淀粉清洗, 用10%甘油作介质; 使用400倍莱卡偏光相差显微镜进行照相、观察、鉴定和统计.

考古面条碎片质地类似粮食颗粒, 且碎片少、质量小、难以浮选, 采用了现代植物淀粉的分析方法.

现代植物淀粉分析, 参照文献^[22,31]的方法稍做改动: 将植物果实(或食物)在蒸馏水中浸泡后, 揉压破碎, 用10%甘油作介质. 在配备有微分干涉相差(DIC)及偏振光装置的400倍生物显微镜下进行观察. 将视野中所有颗粒都进行统计, 每个样品随机观察不少于100粒, 测量记录淀粉粒形态特征.

(iii) 生物标志化合物分析方法. 由于面条碎片质量小, 无法满足试验需要, 面条的主要成分已经散落在面条沉积层中, 对含有面条碎片成分的①②号样品进行分析, 并分析了全新世、更新世黄土样品和大气降尘样品以进行对比. 同时选择并分析了华北

地区现生黍、粟、小麦样品各3种进行分析。

首先将样品风干，每个样品取1 g，用丙酮和戊烷(1:1)的混合超声液萃取3次。将萃取液过滤后，通过柱色谱分离为饱和烃、芳烃和非烃3个馏分，洗脱剂分别为正己烷、二氯甲烷和甲醇。将芳烃馏分送入气相色谱-质谱联用仪(GC/MS)。

利用 Agilent 6890N GC-5973 N MSD系统进行气相色谱-质谱联用分析(70 eV, 离子源温度230℃), 该系统配备液相填充石英毛细管柱(J&W DB-5; 直径0.25 mm, 长度30 m, 膜厚度0.25 μm)。每个样品均在280℃下进行不分流注射。经过1 min 50℃恒温控制后, 将毛细管中的温度以30℃/min的速率升高到120℃; 再以3℃/min的速率升高到290℃, 290℃恒温控制30 min。传输用的氦气流动速率为1.2 mL/min(40 cm/s)^[24]。

通过测量总离子流黍素(miliacin)的峰面积, 计算出黍素的相对含量。值得注意的是, 黍素的相对含量在不同设置的色谱-质谱联用仪上的结果可能略有不同, 离子源浓度的差异可能导致结果产生微小变化。

(iv) 年代分析。先后在喇家遗址被灾害埋葬的灰坑、墓葬、房址共17个处遗存中, 获得12个碳屑样品和5个骨骼样品, 送中国社会科学院考古研究所科技中心碳十四实验室(ZK)、北京大学加速器质谱(AMS)碳-14实验室(BA)进行年代测试。

2 分析结果

2.1 植硅体分析结果

我们检查了从倒置陶碗内填沉积物中提取的6份植硅体样品(图4; 编号①~⑥), 并将其与从遗址剖面取的1份土壤样品(图4)进行了对比。所有样品都发现多种植硅体类型, 其中可以鉴定到禾本科亚科水平的特征植硅体类型, 像黍型(*Panicoid*)、虎尾草型(*Chloridoid*)和早熟禾型(*Festucoid*)(图4)。引人注目的是, 靠近碗底部(沉积物圆台体上部)的3份样品(编号①~③)含丰富的农作物颖壳类植硅体, 共有3种类型。基于它们的形状和图案, 以及和现代农作物颖壳植硅体形态对比(图5), 并参考已发表的农作物和近缘野生植物植硅体研究结果^[22,23,37,38], 我们发现这3种植硅体分别属于禾本科农作物的粟(小米)稃壳表皮长细胞硅化的Ω形(*Setaria italica*-Ω), 粟稃壳表皮

长细胞和角质层联合硅化的表面呈现线状雕纹的π形(*Setaria italica*-π), 以及黍稃壳表皮长细胞硅化的η形(*Panicum miliaceum*-η)植硅体^[22]。

η形只在碗底①样品中出现, 含量只有0.5%左右。Ω形、π形在碗底面条层的3个样品中都有出现, 含量达到10%~15%以上。在面条碎片样品中发现2粒Ω形植硅体, 碗口3个沉积物样品和遗址剖面黄土样品中则没有发现这三类(Ω, π, η)粟、黍稃壳植硅体类型。如果仅以粟、黍植硅体数量计算总数, 粟植硅体含量占绝对优势, 约95%以上。

2.2 淀粉粒分析结果

在史前面条碎片样品中发现了丰富的淀粉粒(图6(b)~(e)), 同时从碗底部的3份样品(编号①~③)提取出较多的淀粉粒(图6(a)), 在其他层位的样品中则没有提取到淀粉颗粒。

面条沉积层和面条碎片中的淀粉颗粒都呈现出一定的糊化特点, 部分淀粉糊化严重, 十字消光特征消失(图6(d)); 部分淀粉形态糊化后, 十字消光特征已不明显(图6(e))。但在部分面条碎片上仍然可发现许多边缘呈圆形、近圆形的淀粉, 脐点在中心, 十字消光特征仍比较明显(图6(b))。

从面条沉积层提取到的淀粉颗粒一般平均粒径相对偏大。对所有沉积层和面条碎片中完整淀粉颗粒的测量表明, 淀粉粒平均大小为 $8.2 \pm 2.8 \mu\text{m}$ 。通过

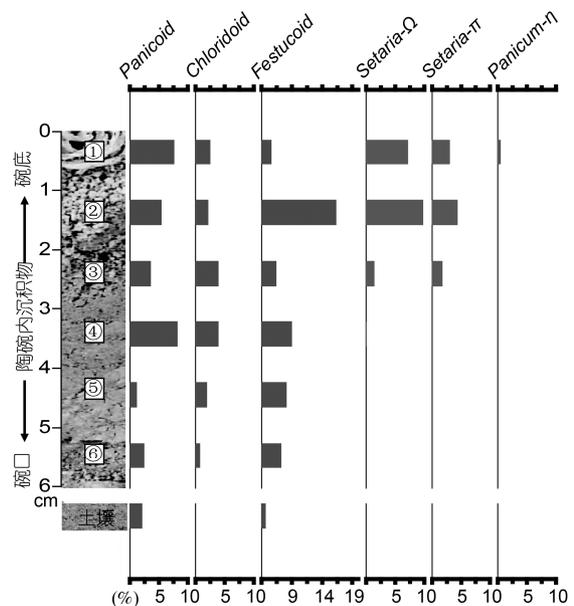


图4 陶碗内圆台体沉积物典型植硅体变化及与遗址土壤植硅体对比

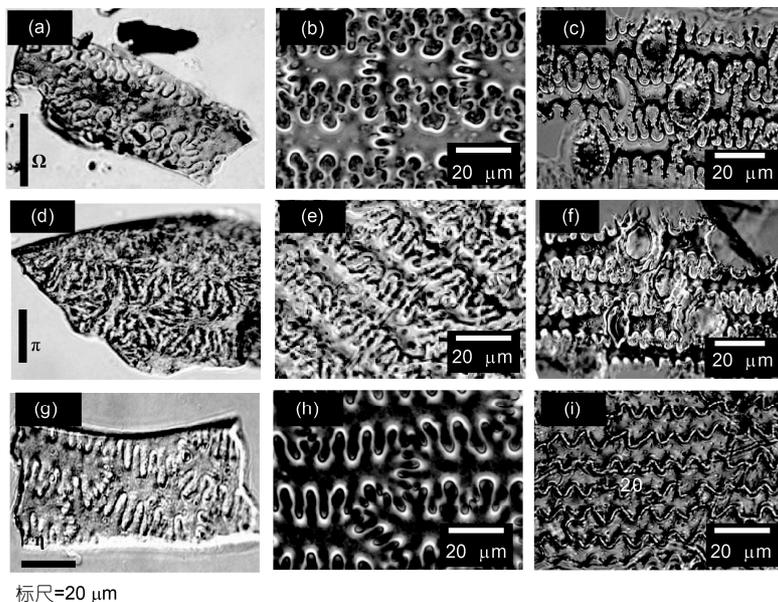


图5 面条沉积层中的稗壳植硅体与现代植物稗壳植硅体。(a), (d), (g)分别是面条碎片或面条层中发现的Ω, π, η形植硅体; (b), (e)分别是现代粟Ω, π形植硅体; (h)是现代黍η形植硅体; (c), (f), (i)分别是现代小麦、大麦、高粱稗壳植硅体

与西北地区现代植物淀粉形态(图7)与大小的对比(表S1), 面条考古样品淀粉颗粒大小明显小于大麦(18.4±8.7 μm)、青稞(16.8±5.9 μm)或小麦(15.7±6.1 μm)等淀粉颗粒, 而与粟(8.6±2.0 μm)、黍(7.8±2.1 μm)等淀粉粒形态与大小相近。

淀粉糊化后, 许多淀粉形态鉴定特征消失或发生变化, 很难准确鉴定其来源的植物种类。从目前面条碎片和面条沉积层中发现的淀粉颗粒看, 制作面条的材料可以肯定是由植物淀粉做成的, 从淀粉大小特征上判断更接近粟、黍淀粉。

2.3 生物标志化合物分析结果

已有研究表明, 黍素(miliacin)是黍和粟中的特定成分^[24,28], 黍和粟中黍素的含量是不一样的, 其伴随出现的衍生物也不同^[24], 据此可将黍和粟区分开来。

图8(a)和(b)展示了现代黍、粟中所含的5种黍素衍生物组合特征。这5种化合物分别是: 1号峰(化合物1), olean-12-en-3β-ol ME, β-amyrin ME, β-香树脂素甲醚; 2号峰(化合物2), olean-18-en-3β-ol ME, miliacin, 黍素; 4号峰(化合物4), urs-12-en-3β-ol ME, α-amyrin ME, α-香树脂素甲醚; 3和5号峰(化合物3和5)是还未确定结构的PTMEs(pentacyclic triterpene methyl ethers: 五环三萜甲基醚)。

图8(a)和(b)分别显示了在54~62 min, 黍、粟芳烃

馏分(包括黍素衍生物)的连续分布情况。其中一种重要的化合物黍素(miliacin)(化合物2)(图8(d))在黍、粟中都存在, 测得其在可溶有机质中的含量在两种作物中有明显差别, 分别占89.0%±1.64%(黍)和33.8%±22.2%(粟)。更重要的是化合物1, 4和5只存在于黍中, 而化合物3则只存在于粟中。根据这些化合物含量及组合特征, 能够区分鉴定出黍、粟。

图8(c)显示了陶碗含面条碎片沉积样品的分子标志物分析结果, 其化合物2号峰相形态分布特征与现代粟一致, 缺少现生黍中1, 4和5化合物组合。这说明样品中的分子标志物明确来自于粟, 与植硅体和淀粉分析结果是一致的。

使用等量的样品, 用相同的分析方法对现代小麦进行分析, 在54~62 min连续分布的芳烃馏分中, 未检测到黍素成分(图9(a))。同样对全新世、更新世黄土样品、现代降尘样品进行分析, 也未检测到黍素成分(图9(b)), 排除了样品在沉积埋藏和发掘过程中被污染的可能性。综合植硅体分析, 淀粉粒分析, 和生物标志化合物的分析结果, 可进一步明确, 喇家面条中的主体成分是粟, 可能混有少量的黍。

2.4 年代分析结果

遗址文化层内17个炭化植物遗存和骨骼的¹⁴C测年数据, 经过日历年校正后的范围是4260~3840 a BP,

主要的年代聚集在4070 a BP, 与齐家文化的年龄是吻合的(表S2).

3 模拟试验

(i) 目的. 针对喇家遗址出土4000 a BP面条的分析结果, 探索利用简便易行方法, 制作出粗细均匀的、长度至少大于30 cm, 能够在水中加热成型的粟米面条.

(ii) 材料与工具. 小米面(购自甘肃西峰), 脱壳小米(购自甘肃西峰), 谷子(带壳, 采集自河北、辽宁、山西和北京中国农业科学院), 自来水, 研钵, 蒸

锅, 镀铬压面机(大、小型号两种, 购自甘肃西峰), 电磁炉.

(iii) 模拟方法. 制造淀粉面条的黏性物质(凝胶)与小麦面条的黏性物质(面筋蛋白)不同, 淀粉面条的凝胶黏性物质只有在淀粉加热并适度糊化过程中形成, 因此简单地用制作小麦面条的压、砸、碾、擀、挤等方法都无法制作出细长的淀粉面条.

本试验参考: (1) 民间(山西寿阳县、河南浚县、山西应县)淀粉面条制作方法; (2) 古代淀粉面条制作方法文献记载^[17]; (3) 近代淀粉面条的制作方法^[18]等. 这些方法中都有增加淀粉黏度的措施, 主要归纳

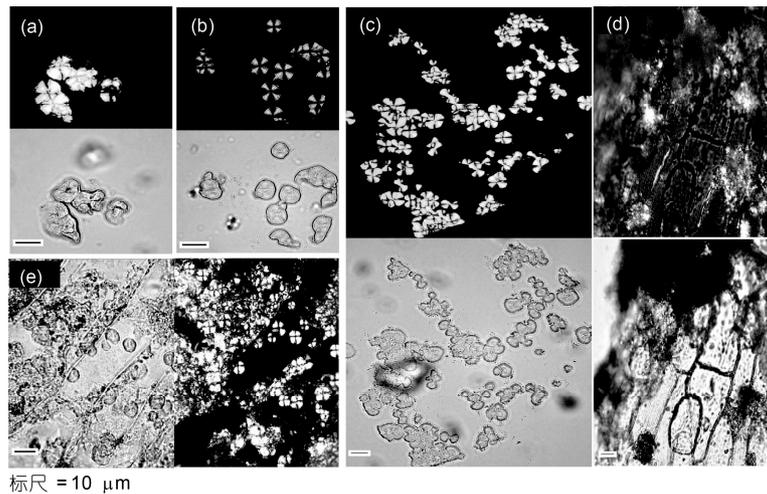


图6 面条沉积层和面条残片中的淀粉颗粒. (a)~(d) 正交偏光图像位于每张照片的上半部分. (e) 正交偏光图像位于照片的右半部分

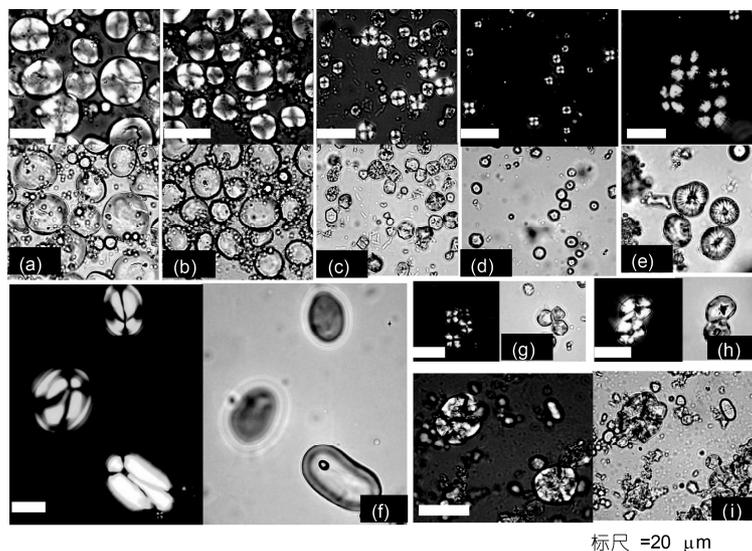


图7 部分现代栽培植物淀粉粒的偏光和光学显微照片. (a) 大麦; (b) 青稞; (c) 粟; (d) 狗尾草; (e) 高粱; (f) 马铃薯; (g) 黍; (h) 玉米; (i) 小麦. (a)~(e) 偏光图像位于每张照片的上半部分; (f)~(i) 偏光图像位于每张照片的左半部分

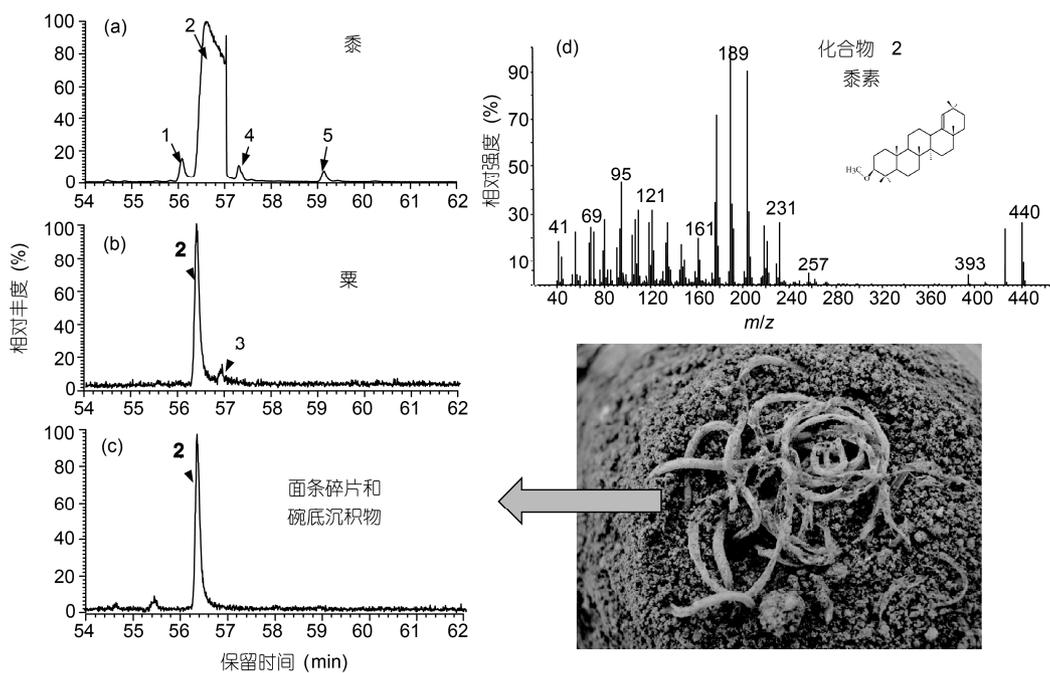


图8 现生黍(a)、粟(b)、喇嘛面条层沉积样品(c)中芳烃离子色谱图。1 谱峰, PTME-1 [M^+440 , m/z , 425, 393, 257, 218, 204, 189, 161, 135, 109 (100%), 95, 69]; 2 谱峰, PTME-2 [miliacin, olean-18-en-3 β -ol ME, M^+440 , m/z , 425, 393, 257, 218, 204, 189 (100%), 177, 161, 135, 109, 95, 69]; 3 谱峰, PTME-3 [M^+440 , m/z , 425, 397 (100%), 365, 261, 229, 218, 204, 189, 175, 161, 135]; 4 谱峰, PTME-4 [α -amyrin ME, urs-12-en-3 β -ol ME, M^+440 , m/z , 393, 259, 218 (100%), 203, 189, 161, 135, 109, 95]; 5 谱峰, PTME-5 [M^+440 , m/z , 425, 408, 393, 257, 221, 203, 189 (100%), 147, 135, 121, 109, 95]。 (d)表示的是PTME-2 (miliacin, olean-18-en-3 β -ol ME)的质谱

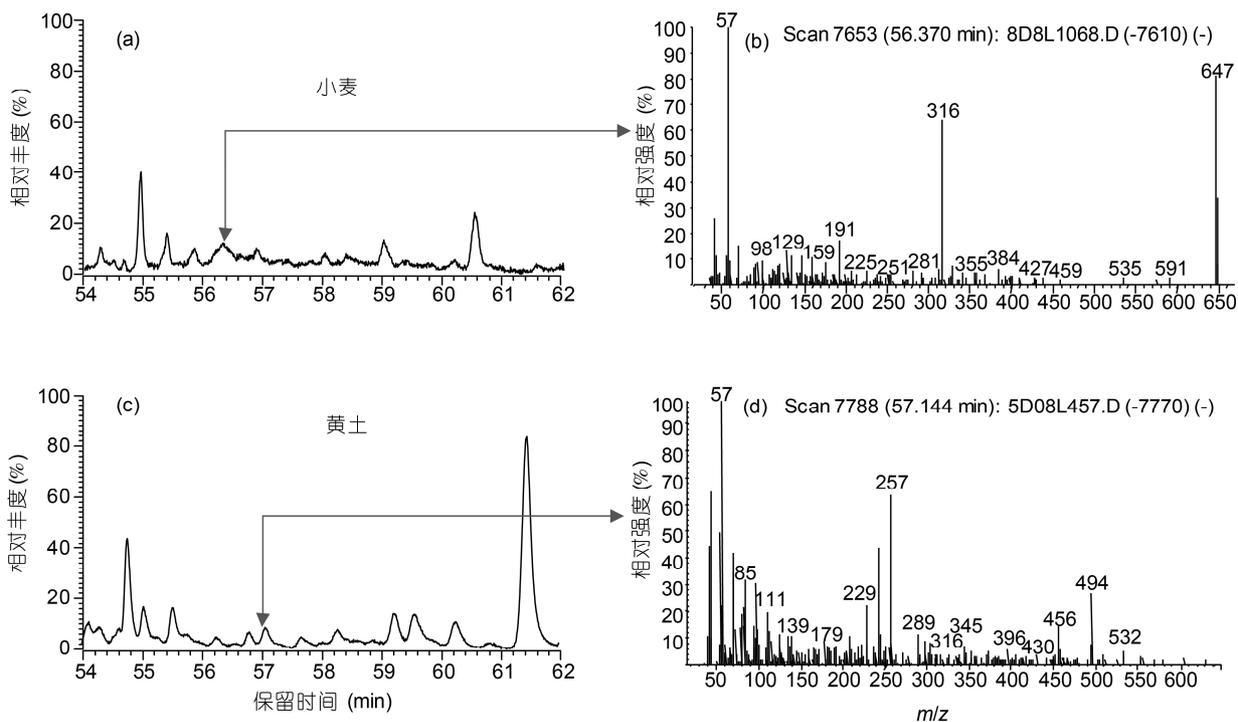


图9 现生小麦和沉积黄土样品中芳烃离子色谱和质谱图。(a), (c) 色谱图; (b), (d) 质谱图。质谱图呈现出与黍素完全不同的芳烃馏分

为3种增加淀粉黏度的途径: 饧面、反复捶砸、适度加热. 因而设计了3组对比试验. 1) 饧面, 方法1: 小米面加适量水(30%~40%), 手工揉制成面团, 直接用小型饧饧机压制面条; 方法2: 小米面加适量水(30%~40%), 手工揉制成面团, 盖上湿布饧面(4 h, 室温25℃), 用饧饧机压制面条. 2) 反复捶砸, 方法3: 小米面加适量水, 揉制成面团, 在研钵中捶砸(约20 min), 用饧饧机压制面条. 3) 加热, 方法4: 脱壳小米煮熟之后, 捶砸成稠糊状, 变凉后, 用饧饧机压制面条; 方法5: 用温水(30~40℃)来揉制小米面团, 直接用饧饧机压制面条; 方法6: 小米面团揉制、蒸热后(呈直径8 cm面团, 水开后分别蒸约15和60 min), 直接用饧饧机压制面条.

表S3是对小米面团进行不同方法处理后, 用饧饧机压制面条的结果, 表明: 饧面和反复捶砸过程, 都会适当增加淀粉黏度和面团的剪切力, 从而增加饧饧面的长度, 但增加的长度有限, 煮熟后面条易断, 长度不超过15~20 cm. 把小米煮熟之后, 捶砸成稠糊状, 变凉后, 或温水揉制小米面团, 用饧饧机压制面条, 也能够增加长度, 但长度不超过15~20 cm(图S1).

小米面团揉制、蒸热后, 直接用饧饧机压制面条, 能够明显增加长度效果, 可以挤压出30~50 cm及以上的面条. 但如果蒸热时间过长, 长度又会下降.

最终模拟方法. 综合前面几种增加淀粉黏性的方法, 选用以下步骤来制作小米面条: (1) 称带壳小米500 g, 在研钵中捶砸、碾磨脱壳, 保留20%~30%

带壳谷粒; (2) 室温浸泡12 h以上, 在研钵内捶砸成面团, 室温饧面1 h; (3) 捶砸面团2~3 h, 放入蒸锅加热约15 min, 捶砸面团; (4) 趁热用饧饧机压制面条, 放进开水中. 面条长度可达到120 cm以上(图10). 采用不同的小米品种都获得了相似的结果.

2011年6月, 中央电视台《走进科学》节目组在中国科学院地质与地球物理研究所古生态实验室全程录制了小米面条的模拟复制过程, 我们用大号饧饧机挤压面条, 挤压出长度达520 cm的小米面条(<http://kejiao.cntv.cn/science/zoujinkexue/classpage/video/20110610/100115.shtml>)

4 讨论

4.1 面条的埋藏与保存

喇家遗址F20房址出土的陶碗, 是按照严格的考古工作程序发掘出土的^[30], 碗口朝下、碗底向上倒扣的埋藏状态, 意味着碗底和内部沉积物圆台体顶部之间, 可能存在细微的空间, 这个空间应该是碗内沉积物倒置、收缩过程形成的, 长期的密封和缺氧, 使顶部面条形状极好地保存4000年成为可能. 无论是出土现场面条的拍照记录, 还是室内从陶碗内提取面条残片样品, 都真实地记录到面条实物样品的存在. 尽管碗内沉积物圆台体顶部的面条出土后风化破碎, 但碗底面条泥土沉积层中依然保存有大量的面条残段、残片以及面条散落的微细颗粒成分, 可供分析与研究. 这是在地震洪水灾害过程^[20]中极罕见

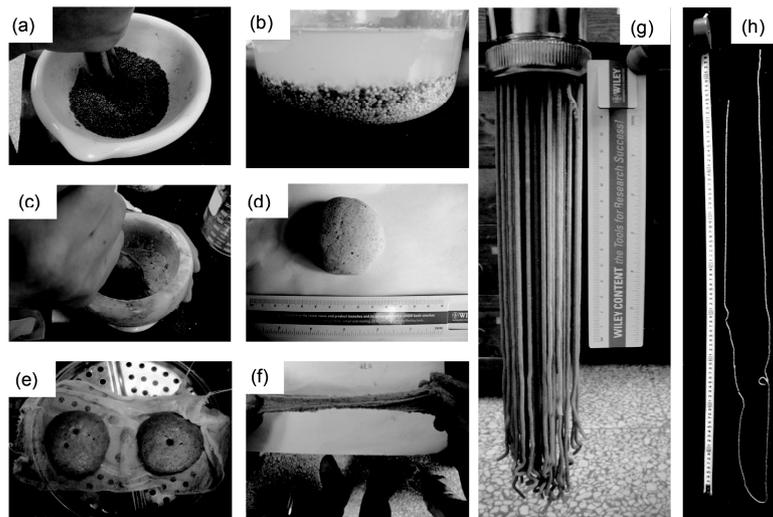


图10 最终面条模拟方法和结果. (a)~(f) 面条模拟步骤; (g), (h) 面条模拟结果

地被泥土封闭、保存,又极偶然被发现的史前面食考古样品。

从现场发掘和室内取样分析来看,充填在碗口内泥土和碗外封闭的泥土样品成分是一致的,是相对纯净的棕黄色—灰色粉沙质黏土,但与遗址中常见的层状或片状分布的冲—洪积红色黏土层成分并不一致。盛面条的陶碗很有可能在强烈地震中,先后经历了被泥土充填、翻转倒置、随后被泥土和冲积物掩埋的过程,这种情况与在喇家发掘的许多房址出土情况是一样的,在一些房址内发掘的器物上或人体遗骸上先覆盖的是与黄土成分类似的泥土,然后被来自第三纪的红黏土泥石流迅速掩盖^[29,39]。

从分析的结果看,粟、黍稷片植硅体、淀粉、黍素分子标志物,只出现在碗底保存面条碎片遗存的3个沉积样品中,而且相同的植硅体、淀粉也出现在面条碎片样品中,而在碗口的3个泥土样品以及遗址剖面泥土和黄土对比样品中都没有出现。显然我们分析出的粟黍稷片植硅体、淀粉、黍素分子标志物,不是充填物从外面带进来的,而是碗内面条样品所具有的。

4.2 淀粉的糊化与消光

所有分析的面条碎片样品中,都发现了丰富的淀粉颗粒,一些面条碎片中的淀粉被破坏或糊化,消光特征和纹饰已经模糊,但残留淀粉的颗粒轮廓还是清楚的。而一部分面条碎片中的淀粉粒形态特征明显,从部分面条沉积层中提取到的淀粉颗粒十字消光特征比较清楚,在一些淀粉颗粒上还可以看到粟类淀粉表面经常见到的放射线纹饰(图6(c))。

除了用偏光显微镜观察、鉴定这些淀粉外,还可以用Congo Red stain染色、荧光显微镜观察,以及碘染色等许多简单易行的方法^[40-42],很容易地判断出面条碎片中发现的这些颗粒不是其他矿物颗粒,而是淀粉。而不需要用难以排除污染的、繁琐的成分分析法(例如SEM-EDS扫描电子显微镜和能谱仪方法)来推断其是否是矿物,有人认为“石膏球晶”和“真菌孢子”也具有十字消光^[43],实际上石膏是单斜晶系,不会形成球晶,而且自然界所有的矿物,属于三大晶族、七大晶系、三十二晶类,都不能形成球晶,即使像球晶的等轴晶系矿物,也不存在全方位十字消光。自然界不存在所谓“石膏球晶”这样的矿物,球晶是

淀粉或高聚物(例如聚氯乙烯分子)中存在的结晶形态,当然聚氯乙烯分子颗粒不存在糊化、碘染色等方面的特性。真菌孢子具有明显的孢子壁、纹饰、颜色、菌丝和透明特征,淀粉没有外壁等这些特征,在普通光学显微镜下很容易和孢子区别,是从事显微镜下微体化石鉴定者所必备的技能。而且目前仅发现少量 $<3\ \mu\text{m}$ 的新鲜孢子有十字消光(可能有辐射状内含物),一旦孢子死亡腐烂后就不具备消光特征。另外淀粉能够鉴定的颗粒都在 $3\ \mu\text{m}$ 以上,本文面条残留物发现的淀粉颗粒平均为 $8.2\ \mu\text{m}$ 。

从面条淀粉消光特征和轮廓纹饰破损情况看,面条应该是经历了加热过程,部分淀粉还保留十字消光特征,最合理的逻辑解释是面条中部分淀粉还没有全部糊化。淀粉没有全部糊化可能由许多原因或者某一个原因造成。

糊化是淀粉在水分充足的条件下,加热到一定温度而发生溶胀、分裂形成均匀糊状溶液的特性。淀粉糊化从开始到完成一般需要经历3个阶段(可逆吸水阶段、不可逆吸水阶段和颗粒解体阶段),从糊化开始温度到糊化结束温度的温度区间一般有 $5\sim 20\ ^\circ\text{C}$ 。如玉米的糊化温度范围是 $62\sim 84\ ^\circ\text{C}$, $62\ ^\circ\text{C}$ 开始糊化, $84\ ^\circ\text{C}$ 以后98%的淀粉干涉色消失(以98%的淀粉干涉色消失为糊化结束标志)。因此在 $62\sim 84\ ^\circ\text{C}$ 期间的未完全糊化的淀粉颗粒,仍然会保持有干涉色特征,淀粉十字消光的强弱,逻辑上可以用于讨论淀粉糊化的程度。

淀粉能否完全糊化还与水分、盐、碱类溶液,以及是否有油脂和蛋白物质的进入等许多因素有关^[44]。

(1) 淀粉水分含量:淀粉水分含量低于 $50\%\sim 60\%$ 时,常压加热难以使淀粉完全糊化^[45]。极端情况下,由于没有水的加入,即使加热到 $200\ ^\circ\text{C}$ 淀粉形态也不会发生改变^[46]。Jang和Pyun^[47]的试验表明,小麦淀粉加热到 $212\ ^\circ\text{C}$,颜色才发生变化,至 $257\ ^\circ\text{C}$ 十字消光才会完全消失;最近,Raviele^[48]从加热到 $232\ ^\circ\text{C}$ 的食品残渣中仍然发现了可以鉴定的淀粉颗粒。这些现象都可能是由于缺少足够水分子的参与,淀粉难以完全糊化。(2) 盐、碱类溶液,油脂和蛋白的参与都会显著提高淀粉的糊化温度。盐类能破坏淀粉粒表面的水化膜,降低水分活度,使糊化温度升高。实验表明,加入 $7\%\sim 9\%$ 的食盐溶液,可以让小麦淀粉糊化温度增加 $18\ ^\circ\text{C}$ 左右^[49];加入 1% 的氢氧化钙(calcium hydroxide,熟石灰)溶液,一般可以让淀粉糊化温度增

加10~15℃左右^[46]，直链淀粉可以与硬脂酸形成复合物，加热至100℃以上也不会糊化。

尽管目前对喇家遗址面条中是否加入盐类或其他电解质还不清楚，但遗址面条样品中分析出大量油脂和维生素成分(待发表)。虽然目前还无法证明这些成分是否是在面条制作过程中加入的，但至少说明面条成分或者其溶液成分可能并不单纯，这些复杂成分的存在有可能提高了面条淀粉的糊化温度。另外，考虑到喇家遗址海拔较高的影响，以及4000年的历史提供了淀粉回生的机会，即由支链淀粉的重结晶引起的淀粉回生作用^[50]，都有可能保留或是恢复部分十字消光的特征。

检验经过蒸煮模拟面条的淀粉、植硅体保存情况(图S2)，在没有添加任何盐、碱类溶液、油脂溶剂的情况下，在开水中加热3~5 min后取样分析，如图S2(b)显示，绝大多数面条淀粉颗粒失去了十字消光的特性(红点线圈)，同时也发现部分团聚状态的淀粉具有十字消光特性，这有可能是因为挤压在一起的团块淀粉，不像溶液中的淀粉那样容易获得水分，使其糊化温度升高造成的。现代粟、黍淀粉颗粒中约有20%~30%是呈现圆形(或球形)、近圆形的形态轮廓，70%~80%颗粒为不规则的多边球形，糊化试验表明^[42]，在60~90℃糊化温度下，所有淀粉颗粒边缘糊化逐渐趋向于圆形，并且在5~20 min加热过程内，淀粉会逐渐失去十字消光特征。

事实上，从考古遗址出土的蒸煮用陶器上^[46]和经过蒸煮的古代食品上^[51]经常会发现没有糊化的淀粉颗粒。正如Crowther^[46]所说，“淀粉糊化会来自烹调加热，但烹调加热不一定导致淀粉糊化”^[46]。因此出土面条中部分淀粉有十字消光是正常的，更何况我们没有办法去证明这碗面条一定是完全煮熟和全部糊化的面条。甚至有考古学家倾向于把这碗面条看作祭品，祭品成型和美观才是最重要的，或许它不需要把食物煮得那么熟。

淀粉是由直链淀粉(amylose)和支链淀粉(amylopectin)组成的半结晶结构的颗粒。结晶区和非结晶区围绕脐点交替排列，结晶区由双螺旋排列的支链淀粉形成，构成了淀粉颗粒的紧密层，非结晶区构成了淀粉颗粒的稀疏层，两者交替排列形成环层结构。理论上讲，所有淀粉颗粒都具有环层结构，分辨率高的显微镜可能获得更清楚的图像。但由于不同种类植物的淀粉双螺旋排列的形式是不同的，这

决定了它们的环层结构显示度不同，一般来说小麦淀粉的环层结构显示度较高，但其他植物淀粉在经过物理或化学变性影响后，同样也会显示环层结构，有时只需要用热水处理或冷水长期浸泡，或用稀薄的铬酸溶液或其他电解质溶液慢慢作用后，都会表现出来环层结构。

目前为止，淀粉颗粒形态鉴定的基础研究非常有限，对本来鉴定特征有限的粟类淀粉来说，糊化和半糊化后多边形特点常被破坏，淀粉边缘轮廓多呈圆形、半圆形态或不规则形，原来淀粉颗粒的形态和鉴定特征已经无法准确用于植物种类鉴定。喇家考古遗址出土面条中所发现的糊化-半糊化淀粉颗粒，虽然个体远小于小麦或大麦的淀粉，而和粟类淀粉大小类似，我们并不将此作为鉴定粟类面条成分的充分证据。但是，这足以作为面条淀粉的直接实物证据，并和植硅体化石、分子标志物形成相互支持的证据链，证明喇家遗址出土面条的成分主要是粟和少量的黍。

4.3 小米是可以做成面条的

在最初的报道中，我们介绍这碗面条的形状“类似于拉面”(“They resemble the La-Mian noodle”)^[1]，并没有说这就是拉面，因为小米没有面筋蛋白的黏性，用做拉面的办法自然是无法做成面条的。用错误的方法去验证正确存在的结果，常常会得到错误的认识。本文的模拟试验是在吸取民间捶砸、烫面增加黏性的知识基础上，利用饴饴面制作工具，借鉴挤压糊化凝胶成型方法^[52-54]，在没有添加任何增黏剂的情况下，成功制作出小米面条，由此证明小米是可以制作面条的。

事实上中国古代有许多黏性小米品种，由于其产量不高，目前仅在华北及周边山区有少量种植。图S3(a)是从辽宁省绥中县山区采集的黏谷子，可以更为容易地做出小米饴饴。在中华人民共和国国家标准GB8232-87中，将粟(谷子)分成粳粟和糯粟(俗称黏谷子)两大类，目前在中国农业科学院北京郊区的试验田中，仍种植着近30种黏谷子(图S3(b))。虽然我们目前无法了解喇家遗址齐家文化时期的谷子是否是黏谷子，但这些传统作物种类的存在，给我们提供了更多模拟、解释空间。

考古学证据：在新疆苏贝西墓地，发现了2400年前由粟类作物(黍)制作的完整面条^[16]。新的考古学

证据进一步提示我们,具有黏性的粟类作物是可以制成面条的。

民俗学证据:在我们所调查的河南、河北、山西乡村,目前仍然有许多地方做小米饸饹,就是将一种木头做的“床子”架在锅台上,把和好的面塞入饸饹床子底部带眼儿的空腔里,人在饸饹床子的木柄上使劲加压,即可做成小米饸饹面条。图S4是河南省浚县传统小吃小米饸饹的加工工具和加工过程,做出的小米饸饹面的形态特点与喇家出土的面条十分相似(图S4)。河南省鹤壁市当地电视台专门报道过浚县著名小吃——小米饸饹面(<http://www.hebitv.com/a/hebixinwen/2012/0204/6452.html>)。

实际上,用小麦面粉做传统的拉面,一般需要添加少量蓬草灰做黏性剂。但目前尚无证据表明喇家面条中加入过增加黏度的成分。综合民俗学证据、考古证据和模拟试验结果都说明,无论添加少量或不加黏性剂,小米都是可以做成面条的。即使在模拟古人可能不完全脱壳的条件下(即保留20%~30%未脱壳谷子),利用最终模拟方案,同样可以做出5 m多长的面条。实际上在民俗学调查中,谷壳也名谷糠,富含营养,是乡民困难时期重要的食物。山西应县农民在20世纪70年代前,经常在不脱壳的情况下,将谷物压碎制作不同的食物。

如何利用小米淀粉或缺少小麦面筋蛋白黏性的其他淀粉,制作面条,已经是现代食品加工工业开拓的重要领域,类似的玉米淀粉面条^[9]、高粱淀粉面条^[12,13]、黍淀粉面条^[15,16]、粟淀粉面条^[14]的加工制作,已经从理论和方法上得到深入研究。挤压糊化凝胶成型的方法^[54]已是淀粉面条生产普遍采用的方法。这些杂粮淀粉含有丰富的营养成分,还可以避免部分人群对“面筋蛋白”的过敏反应^[55],已经成为被广泛消费的食物。有理由相信,小米不仅可以被做成面条,而且还会被制成品种多样的面条。

4.4 面条是中华饮食文化的代表

喇家遗址出土的面条实物,是迄今为止所知的最早的面条实物证据。虽然人们习惯把最早出现的

地方作为起源地,但面条起源时间有可能还要早。更早的面条会是在哪里起源?有学者试图利用制作面条的农作物起源的线索,判断面条的起源地,例如韩国KBS电视台李正旭博士在拍摄的所谓纪录片《面条之路》中,无视4000 a BP喇家小米面条的证据,把新疆苏贝西墓地出土的、约2400年前黍做成的面条^[16],说成是小麦做成的面条,并以小麦起源于中东为借口,认为面条起源于中东地区。

中国古代人类很早就学会了栽培耐旱的粟、黍农作物,粟、黍起源于中国已经有了系统的实物证据^[24,27]。喇家遗址齐家文化是黄河文明的一个组成部分,喇家遗址出土的以粟、黍为主制作的面条,无疑增加了中国作为面条起源地的可能性。中国面条种类繁多,源远流长,具体到饸饹面制作方法,则类似贾思勰《齐民要术》(公元533~544年)中《饼法第八十二》的“粉饼法”^[17]。从喇家面条到今天种类众多的面条,中国人具有善于变化食物和烹调创新的传统,在这些创新成果中,面条不仅成为了中华饮食文化的代表,而且也为世界饮食文化做出了独特的贡献。

或许确认哪一人群发明了面条未必那么重要,也可能是源于人类饮食文化发展史上的趋同现象。无论在中国还是其他国家,面条的出现还可能更早,只差保留下来、并发掘出来的机缘巧合——那机率很小。

5 总结

本文详细介绍了喇家遗址出土面条陶碗中面条与充填沉积物样品采集过程和分析方法,通过对出土残留物、面条碎片的植硅体、淀粉和分子标志物等成分的综合分析,证明喇家遗址古代人类以粟、黍为主制作了面条;并进一步利用类似制作饸饹面条的挤压糊化凝胶成型的方法,复制模拟了与出土面条成分、形态较一致的粟类面条。喇家面条是真实存在的罕见的古代食物遗存,对研究古代人类饮食文化体系具有重要的意义。需要指出的是,喇家遗址面条已经提取出了油脂等成分,是否还加入了盐分、汤料等其他物质,仍然需要进一步研究。

致谢 感谢山东大学靳桂云教授、中国农业科学院刁现民教授提供部分黏谷子样品,北京大学吴小红教授、秦岭教授以及中国社会科学院考古研究所袁靖教授提出的宝贵意见。

参考文献

- 1 Lü H, Yang X, Ye M, et al. Culinary archaeology: Millet noodles in Late Neolithic China. *Nature*, 2005, 437: 967–968
- 2 Fu B X. Asian noodles: History, classification, raw materials, and processing. *Food Res Int*, 2008, 41: 888–902
- 3 Hou G. Oriental noodles. *Adv Food Nutr Res*, 2001, 43: 141–193
- 4 刘建军, 何中虎, 赵振东, 等. 小麦面条加工品质研究进展. *麦类作物学报*, 2001, 21: 81–84
- 5 Tan H Z, Li Z G, Tan B. Starch noodles: History, classification, materials, processing, structure, nutrition, quality evaluating and improving. *Food Res Int*, 2009, 42: 551–576
- 6 Lü C Y, Chang S M. Characterization of red bean (*Phaseolus radiatus* var. *Aurea*) starch and its noodle quality. *J Food Sci*, 1981, 46: 78–81
- 7 Nwabueze T, Anoruoh G. Evaluation of flour and extruded noodles from eight Cassava Mosaic Disease (CMD)-resistant varieties. *Food Bioproc Tech*, 2011, 4: 80–91
- 8 Kim Y S, Wiesenborn D P, Lorenzen J H, et al. Suitability of edible bean and potato starches for starch noodles. *Cereal Chem*, 1996, 73: 302–308
- 9 Yuan M L, Lu Z H, Cheng Y Q, et al. Effect of spontaneous fermentation on the physical properties of corn starch and rheological characteristics of corn starch noodle. *J Food Eng*, 2008, 85: 12–17
- 10 Bhattacharya M, Zee S Y, Corke H. Physicochemical properties related to quality of rice noodles. *Cereal Chem*, 1999, 76: 861–867
- 11 Han J A, Seo T R, Lim S T, et al. Utilization of rice starch with gums in Asian starch noodle preparation as substitute for sweet potato starch. *Food Sci Biotechnol*, 2011, 20: 1173–1178
- 12 Suhendro E L, Kunetz C F, McDonough C M, et al. Cooking characteristics and quality of noodles from food sorghum. *Cereal Chem*, 2000, 77: 96–100
- 13 Liu L, Herald T J, Wang D, et al. Characterization of sorghum grain and evaluation of sorghum flour in a Chinese egg noodle system. *J Cereal Sci*, 2012, 55: 31–36
- 14 黄姝洁, 吴妍雯. 小米挂面的研制. *食品工业*, 2010, 1: 71–72
- 15 Taylor J R N, Schober T J, Bean S R. Novel food and non-food uses for sorghum and millets. *J Cereal Sci*, 2006, 44: 252–271
- 16 Gong Y, Yang Y, Ferguson D K, et al. Investigation of ancient noodles, cakes, and millet at the Subeixi Site, Xinjiang, China. *J Archaeol Sci*, 2011, 38: 470–479
- 17 贾思勰(北魏). 齐民要术. 缪启愉, 校释. 北京: 农业出版社, 1982
- 18 Hou G G. *Asian Noodles: Science, Technology, and Processing*. Oxford: Wiley, 2011
- 19 张清宏. 古代的面条. *烹调知识*, 1998, 9: 32–33
- 20 夏正楷, 杨晓燕, 叶茂林. 青海喇家遗址史前灾难事件. *科学通报*, 2003, 48: 1200–1204
- 21 叶茂林. 青海民和喇家史前遗址的发掘. *考古*, 2002, 7: 3–5
- 22 Lü H, Zhang J, Wu N, et al. Phytoliths analysis for the discrimination of foxtail millet (*Setaria italica*) and common millet (*Panicum miliaceum*). *PLoS One*, 2009, 4: e4448
- 23 Zhang J, Lu H, Wu N, et al. Phytolith analysis for differentiating between foxtail millet (*Setaria italica*) and green foxtail (*Setaria viridis*). *PLoS One*, 2011, 6: e19726
- 24 Lü H, Zhang J, Liu K B, et al. Earliest domestication of common millet (*Panicum miliaceum*) in East Asia extended to 10000 years ago. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2009, 106: 7367–7372
- 25 Piperno D R. *Phytolith Analysis: An Archaeological and Geological Perspective*. San Diego: Academic Press, 1988
- 26 Piperno D R, Ranere A J, Holst I, et al. Starch grains reveal early root crop horticulture in the Panamanian tropical forest. *Nature*, 2000, 407: 894–897
- 27 Yang X, Wan Z, Perry L, et al. Early millet use in northern China. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2012, 109: 3726–3730
- 28 Jacob J, Disnar J R, Arnaud F, et al. Millet cultivation history in the French Alps as evidenced by a sedimentary molecule. *J Archaeol Sci*, 2008, 35: 814–820
- 29 叶茂林, 任晓燕, 王国道, 等. 青海民和喇家遗址发现齐家文化祭坛和干栏式建筑. *考古*, 2004, 6: 3–6
- 30 叶茂林. 破解千年面条之谜. *百科知识*, 2006, 7: 46–49
- 31 Yang X, Zhang J, Perry L, et al. From the modern to the archaeological: Starch grains from millets and their wild relatives in China. *J Archaeol Sci*, 2012, 39: 247–254
- 32 Piperno D R. Identifying crop plants with phytoliths (and starch grains) in Central and South America: A review and an update of the evidence. *Quat Int*, 2009, 193: 146–159
- 33 Piperno D R. *Phytoliths: A Comprehensive Guide for Archaeologists and Paleoecologists*. New York: AltaMira, 2006

- 34 Lü H Y, Wu N Q, Yang X D, et al. Phytoliths as quantitative indicators for the reconstruction of past environmental conditions in China I: Phytolith-based transfer functions. *Quat Sci Rev*, 2006, 25: 945–959
- 35 Piperno D R, Ranere A J, Holst I, et al. Starch grain and phytolith evidence for early ninth millennium BP maize from the Central Balsas River Valley, Mexico. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2009, 106: 5019–5024
- 36 杨晓燕, 郁金城, 吕厚远, 等. 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D辑: 地球科学*, 2009, 39: 1266–1273
- 37 Ball T B, Gardner J S, Anderson N. Identifying inflorescence phytoliths from selected species of wheat (*Triticum monococcum*, *T. dicoccon*, *T. dicoccoides*, and *T. aestivum*) and barley (*Hordeum vulgare* and *H. spontaneum*)(Gramineae). *Am J Bot*, 1999, 86: 1615–1623
- 38 Berlin A M, Ball T, Thompson R, et al. Ptolemaic agriculture, “Syrian Wheat”, and “*Triticum aestivum*”. *J Archaeol Sci*, 2003, 30: 115–121
- 39 殷志强, 秦小光, 赵无忌, 等. 黄河上游官亭盆地红粘土层成因机制再探讨. *第四纪研究*, 2013, 33: 995–1004
- 40 Lamb J, Loy T. Seeing red: The use of Congo Red dye to identify cooked and damaged starch grains in archaeological residues. *J Archaeol Sci*, 2005, 32: 1433–1440
- 41 Bailey J, Whelan W. Physical properties of starch I. Relationship between iodine stain and chain length. *J Biol Chem*, 1961, 236: 969–973
- 42 郑齐, 王灿. 糯性植物用于北京古北口明长城建筑粘合剂的淀粉粒证据. *第四纪研究*, 2013, 33: 575–581
- 43 葛威, 刘莉, 陈星灿, 等. 小米能否制作面条的实验研究: 兼论喇家面条的成分. *南方文物*, 2010, 4: 26–32
- 44 Haslam M. The decomposition of starch grains in soils: Implications for archaeological residue analyses. *J Archaeol Sci*, 2004, 31: 1715–1734
- 45 胡强, 孟岳成. 淀粉糊化和回生的研究. *食品研究与开发*, 2004, 25: 63–66
- 46 Crowther A. The differential survival of native starch during cooking and implications for archaeological analyses: A review. *Archaeol Anthropol Sci*, 2012, 4: 221–235
- 47 Jang J, Pyun Y. Effect of moisture content on the melting of wheat starch. *Starch-Stärke*, 1996, 48: 48–51
- 48 Raviele M E. Experimental assessment of maize phytolith and starch taphonomy in carbonized cooking residues. *J Archaeol Sci*, 2011, 38: 2708–2713
- 49 Wootton M, Bamunuarachchi A. Application of differential scanning calorimetry to starch gelatinization. III. Effect of sucrose and sodium chloride. *Starch-Stärke*, 1980, 32: 126–129
- 50 杨毅才. 淀粉糊化的过程及影响因素. *农产品加工*, 2009, 2: 18–19
- 51 Samuel D. Investigation of ancient Egyptian baking and brewing methods by correlative microscopy. *Science*, 1996, 273: 488–490
- 52 Meng Y, Liu X, Chen J. Relationship between rice components, stress-relaxation and instant rice noodles quality. *T Chin Soc Agric Eng*, 2011, 27: 375–382
- 53 金征宇. 挤压膨化与后添加技术在饲料工业中的应用. *饲料广角*, 2005, 23: 31–34
- 54 魏云丰. 挤压膨化技术研究现状. *农村牧区机械化*, 2009, (6): 15–16
- 55 李玉阁, 邢冉冉, 李锁平. 栽培一粒小麦 α -醇溶蛋白新基因的克隆与序列分析. *麦类作物学报*, 2012, 32: 387–392

补充材料

表 S1 现代栽培植物和史前面条的淀粉粒尺寸特征

表 S2 喇家遗址发掘样品的碳 14 测年和校正年代

表 S3 不同制作方法的面条长度变化

图 S1 不同制作方法模拟的面条结果

图 S2 模拟面条的淀粉、植硅体保存情况

图 S3 现代黏谷子样品和玉米面条饅饅机

图 S4 河南省浚县小米饅饅面条加工过程

本文以上补充材料见网络版 csb.scichina.com. 补充材料为作者提供的原始数据, 作者对其学术质量和内容负责.

表S1 现代栽培植物和史前面条的淀粉粒尺寸特征^{a)}

	长度平均值(±s.d.) (μm)	范围(μm)*	计数
(a) 研究区域的现代栽培植物淀粉			
玉米(<i>Zea mays</i> L.)	15.7±4.5	5~30	130
马铃薯(<i>Solanum tuberosum</i> L.)	38.5±11.1	15~100	130
大麦(<i>Hordeum vulgare</i> L.)	18.4±8.7	3~38	150
青稞(<i>Hordeum vulgare</i> L. var. <i>nudum</i> Hook.)	16.8±5.9	2~34	150
小麦(<i>Triticum aestivum</i> L.)	15.7±6.1	2~33	150
高粱(<i>Sorghum bicolor</i> (L.) Moench)	14.8 ±3.9	5~25	110
水稻(<i>Oryza sativa</i>)	5.0±?	<2~10	120
粟(<i>Setaria italica</i> (L.) Beauv.)	8.6±2.0	5~18	110
狗尾草(<i>Setaria viridis</i> (L.) P. Beauv.)	5.5±2.9	2~14	120
黍(<i>Panicum miliaceum</i> L.)	7.8±2.1	6~16	110
(b) 史前面条淀粉粒			
面条碎片和沉积物淀粉	8.2±2.8	4~16	150

a) s.d. 淀粉粒长度的标准偏差; * 淀粉粒大小的测量范围

表S2 喇家遗址发掘样品的碳 14 测年和校正年代

实验室编号 ^{a)}	样品出土层位	测年材料	Libby ¹⁴ C 年代 ^{b)}	校正日历年代(Cal BC) ^{c)}	
			和它的 1-sigma 误差 差基于 $t_{1/2}$ 5568 a (a BP, ±1σ)	1σ (68.2%置信度)	2σ (95.4%置信度)
ZK-3132	H18	木炭	3574±73	2029 (54.8%) 1873	2136 (94.8%) 1742
				1844 (7.7%) 1815	1709 (0.6%) 1701
				1800 (5.7%) 1778	
ZK-3133	H20	木炭	3685±42	2139 (66.0%) 2022	2199 (7.4%) 2164
				1990 (2.2%) 1985	2152 (88.0%) 1951
					2268 (0.4%) 2260
ZK-3134	M3	木炭	3637±75	2133 (16.1%) 2081	2206 (89.2%) 1863
				2061 (52.1%) 1910	1851 (5.8%) 1772
					3084 (0.9%) 3065
ZK-3137	H33	木炭	4200±107	2905 (19.1%) 2829	3028 (94.5%) 2481
				2824 (49.1%) 2628	
				2272 (4.4%) 2259	2296 (94.9%) 2021
ZK-3179	T537 H45	木炭	3746±48	2207 (43.1%) 2123	1992 (0.5%) 1984
				2092 (20.7%) 2043	
				2204 (45.0%) 2124	2286 (95.4%) 2028
ZK-3180	T537 H45(2)	木炭	3740±42	2091 (23.2%) 2044	
				2396 (2.5%) 2386	2458 (90.4%) 2196
				2346 (65.7%) 2201	2172 (5.0%) 2146
ZK-3181	T539 H48	木炭	3828±43	2435 (4.9%) 2421	
				2404 (9.0%) 2379	
				2349 (34.4%) 2273	2463 (95.4%) 2200
ZK-3182	T539 H48 (2)	木炭	3846±43	2258 (20.0%) 2208	
				2138 (67.2%) 2023	2198 (6.7%) 2166
				1988 (1.0%) 1986	2151 (88.7%) 1951
ZK-3220	H44	木炭	3684±41	2278 (13.2%) 2251	
				2229 (3.4%) 2221	2294 (80.8%) 2116
				2211 (51.6%) 2135	2100 (14.6%) 2038
ZK-3221	H49	木炭	3764±38	2337 (3.7%) 2323	2459 (90.0%) 2128
				2308 (64.5%) 2140	2089 (5.4%) 2047
				2299 (58.8%) 2129	2457 (4.0%) 2417
ZK-3222	T529J2 (3)	木炭	3800±56	2088 (9.4%) 2048	2409 (91.4%) 2030
					2014 (2.7%) 1998
					1979 (86.5%) 1876
ZK-3223	H41	木炭	3778±66	1944 (68.2%) 1887	1842 (3.9%) 1820
					1796 (2.2%) 1781
					2011 (3.8%) 2000
ZK-3632	2000QMLF3I	人骨	3565±25	1950 (68.2%) 1896	1978 (91.6%) 1886
ZK-3635	2000QMLF4 IV	人骨	3580±20		

BA110817	F4-X	人骨	3575±40	2010 (4.3%) 2001 1977 (63.9%) 1884	2032 (83.5%) 1869 1847 (11.9%) 1776
BA110818	F4-VII	人骨	3580±25	1956 (68.2%) 1891 1955 (52.8%) 1876	2022 (8.9%) 1991 1984 (86.5%) 1882
BA110819	F4-XI	人骨	3555±40	1842 (9.1%) 1820 1797 (6.3%) 1781	2020 (5.1%) 1993 1983 (90.3%) 1768

a) ZK=中国社会科学院考古研究所碳十四实验室; BA=北京大学加速器质谱(AMS)碳-14实验室. b) 传统或“Libby”放射性碳年龄测定的是1950AD之前的年代. 碳-14的半衰期采用的是5568年. c) 碳-14数据日历年代校正通过OxCal v4.2.3程序^[1]和IntCal13^[2]校正曲线完成

参考文献

- 1 Christopher B R. Bayesian analysis of radiocarbon dates. Radiocarbon, 2009, 51: 337-360
- 2 Reimer P J, Bard E, Bayliss A, et al. IntCal13 and Marine13 radiocarbon age calibration curves 0-50000 years cal BP. Radiocarbon, 2013, 55: 1869-1887

表S3 不同制作方法的面条长度变化

方法	面条制作结果与描述	注
1	挤压出 5~10 cm 面条,煮熟后易碎断成 1~2 cm	图 S1(d)
2	挤压出 15 cm 以内面条,煮熟后易断 2~5 cm	图 S1(e)
3	挤压最长 30 cm,煮熟后易断 15~20 cm	图 S1(f)
4	煮时易断, 5 cm 常见,10 cm 左右	图 S1(g)
5	挤压长度达 40 cm, 煮熟后可见 15~20 cm	图 S1(h)
6	蒸 15 min 挤压长度达 50 cm, 煮熟后可见>30 cm, 蒸 60 min, 长度减少到 20 cm 以下	图 S1(i)
综合方法	面条长度达到 120 cm 以上	图 10(h)

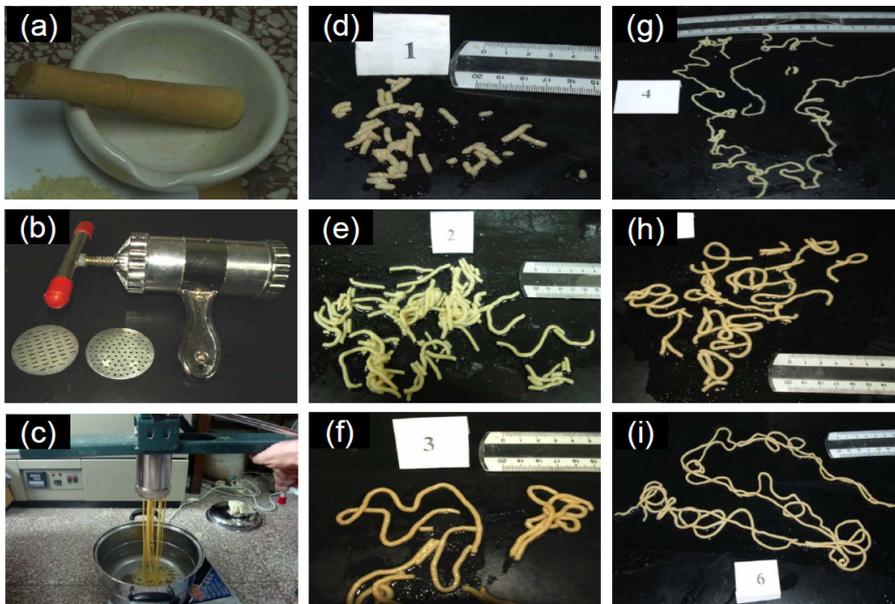


图 S1 不同制作方法模拟的面条结果. (a)~(c) 面条模拟工具; (d)~(i) 不同方法的面条模拟结果

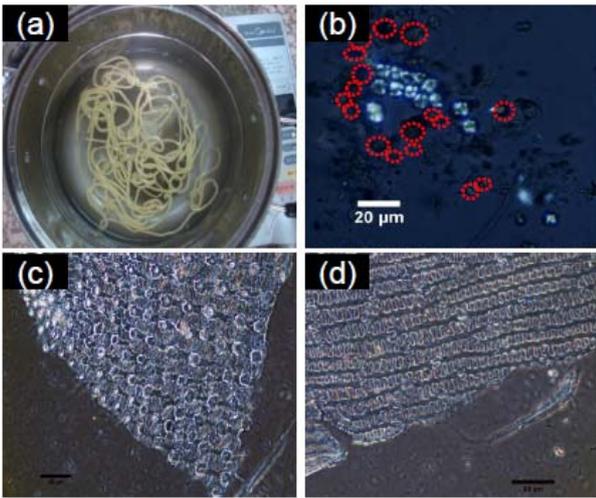


图 S2 模拟面条的淀粉、植硅体保存情况. (a) 模拟加热面条; (b) 煮过的模拟面条中的淀粉; (c), (d) 煮过的模拟面条中的植硅体



图 S3 现代黏谷子样品和玉米面条饹饹机. (a) 辽宁省绥中县山区采集到粘谷子; (b) 中国农业科学院北京郊区粘谷子试验田中; (c) 辽宁省绥中县农民制作的玉米面条饹饹机(靳桂云提供)



图 S4 河南省浚县小米饸饹面条加工过程. (a) 木制饸饹床; (b) 小米饸饹面条加工; (c) 小米饸饹面条(引自河南鹤壁市电视台 2012)