

半坡和姜寨出土仰韶文化早期尖底瓶的酿酒功能

刘 莉^{1、2} 王佳静³ 刘慧芳⁴

(1. 斯坦福大学东亚语言与文化系; 2. 斯坦福大学考古中心; 3. 西北大学文化遗产学院; 4. 西安半坡博物馆)

关键词: 淀粉粒, 植硅体, 酵母, 霉菌, 谷芽酒, 麴酒

摘要: 本研究采用科学方法检验了陕西半坡和姜寨遗址出土的 11 件仰韶文化早期尖底瓶中的微植物和微生物遗存。从残留物中发现的淀粉粒、植硅体、霉菌、酵母细胞和棒状方解石晶体中获得的多种证据表明, 这些尖底瓶曾用于酿酒。酿酒原料主要包括黍等其他谷物(粟、稻米、小麦族)、豆类和块根植物(栝楼根、芡实)。使用芦苇吸管啜酒可能是当时的饮酒方法之一。仰韶人掌握两种酿造方法: 利用发芽的谷物酿造谷芽酒和利用发霉的谷物加植物茎叶制麴酿造麴酒。这两种方法有时分别采用, 有时也许同时采用。

EYWORDS: Starch grains, Phytoliths, Molds, Yeast cells, Beverages made of sprouted grain, Beverages made of *qu* starter

ABSTRACT: In this study we employed scientific methods to examine microbotanical and microbial remains in the residues extracted from the interior walls of 11 jian dipping pointed-based bottles from the Banpo and Jiangzhai sites in Shaanxi, dating to the early Yangshao period. Multiple lines of evidence from starch grains, phytoliths, molds, yeast cells, and rod-shaped calcite crystals found in the residues indicate that the bottles were used for brewing alcoholic beverages. The ingredients include mainly broomcorn millet, together with other cereals (foxtail millet, rice and Triticeae), wild peas and tubers (snake gourd roots and foxnut). The use of reed straws to drink alcohol was probably one of the drinking methods of the time. Two brewing methods were detected: the use of sprouted grain and the use of *qu* starter made of moldy grain with herbs. These two methods were used either independently or simultaneously.

近年来, 考古学家对中原地区 3 个前仰韶时期遗址(舞阳贾湖、宝鸡关桃园和临潼零口; 距今约 9000~7000 年) 出土的小口鼓腹罐^[1、2]和 4 个仰韶中晚期遗址(西安米家崖、高陵杨官寨、蓝田新街和澠池丁村; 距今约 6000~5000 年)^[3-6] 出土的小口尖底瓶进行了残留物分析。这些研究采用科学方法直接分析陶器内残留物, 通过观察其中淀粉粒、植硅体和真菌的形态, 证明这些器物用于酿造以黍或稻米为主要原料的发酵酒精饮料, 酿造方法包括谷芽酒和麴酒。但是这两组酿酒器的年代并不衔接, 有近 1000 年的缺环, 此时正处于仰韶文化早期(距今约 7000~6000 年), 是小口尖底瓶出现的时期。

与仰韶中晚期的大型尖底瓶有所不同, 早期的尖底瓶以中小型为主。例如, 根据姜寨发掘报告, 仰韶早期的 27 件尖底瓶标本高度大多都在 16.8~48 厘米范围之内, 只有 1 件高度为

74.4 厘米; 而 2 件仰韶晚期标本高度为 57 和 74 厘米^[7]。根据对 10 个仰韶文化遗址(临潼姜寨、陇县原子头、高陵杨官寨、扶风案板、宝鸡福临堡、西安米家崖、秦安大地湾、陕县庙底沟、洛阳王湾、灵宝西坡)^[7-17] 中 62 件尖底瓶高度数据的分析, 29 件仰韶早期尖底瓶中有 26 件(90%) 高度在 16.8~42 厘米之间, 只有 3 件(10%) 高度在 74.4~94.5 厘米之间; 仰韶中晚期的 22 件尖底瓶的高度均在 39~87.5 厘米范围之内(图一)。这些数据显示, 从仰韶文化早期至晚期, 小口尖底瓶形制趋于向大型发展。虽然我们的前期研究已证实晚期的尖底瓶用于酿酒, 但我们尚无法确认早期尖底瓶是否有类似的功能。

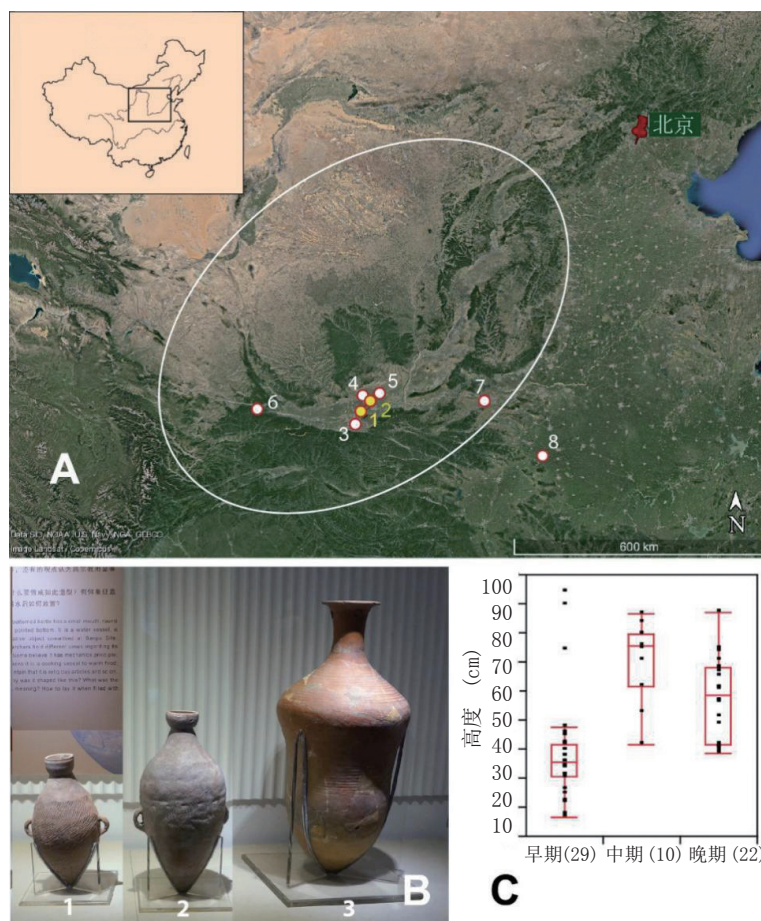
小口尖底瓶(尤其是中小型)的功能是考古学家们长期争论的问题, 其主要观点包括: 汲水器^[7、18]、净水器^[19]、干旱地区祭天祈雨的礼器^[20]、盛酒的祭器或礼器^[21]、酿酒器^[22、23]

及储酒器^[24]等。其中汲水器的观点曾经最为流行,并编进中学教材^[20],但是有学者在进行实验后证明使用尖底瓶汲水并不十分实用^[25、26]。

早期尖底瓶的功能分析对重建中国史前时期酿酒技术的起源和发展至关重要。西安半坡和临潼姜寨是著名的仰韶文化遗址,代表了黄河流域新石器中期以粟作农业为基础的环境聚落。两遗址的陶器组合中都有数量较多的小口尖底瓶。2017年,斯坦福大学考古中心与半坡博物馆合作,对从半坡遗址(2件)和姜寨遗址(9件)出土的11件仰韶文化早期不同大小的尖底瓶标本进行了微植物和微生物残留物的提取和分析,主要目的是检验谷物酿酒的证据。这些尖底瓶出土于成人墓葬、房址、灰坑及瓮棺葬。出于墓葬的是随葬品,均为中小型,基本完整;大型器出土于居住区,均破损。1件用于儿童瓮棺的尖底瓶应为该器物的二次利用(图二)。其中半坡尖底瓶标本属于半坡类型,姜寨标本属于姜寨I期和II期(半坡类型和史家类型)。对这两个仰韶典型遗址中出土的尖底瓶残留物分析有望提供比较全面的功能性资料,同时也可以检验在不同的埋藏环境中有机物的保存程度。

一、谷物发酵酒酿造过程及其残留物特征

检验尖底瓶是否有酿酒功能,首先要了解发酵酒的酿造过程。谷物酿酒包括两个过程:第一是糖化,通过淀粉酶的作用将淀粉转化为糖;第二是发酵,通过酵母的作用将糖转化为酒精和二氧化碳。利用富含淀粉植物(包括谷物和块根植物)酿酒的基本方法有三种:(1)谷芽酒,首先将谷物发芽使酶得以活化,然



图一 经残留物分析有酿酒器的遗址分布及尖底瓶高度变化

A. 出土酿酒陶器的遗址(1.半坡 2.姜寨 3.米家崖和新街
4.杨官寨 5.零口 6.关桃园 7.丁村 8.贾湖) B. 半坡出土尖底瓶器型变化
(1、2.早期中小型 3.晚期大型) C. 仰韶文化尖底瓶高度变化。

后加热水糖化,再利用酵母发酵。(2) 麴酒,使用谷物制麴,有时加入某些植物茎叶或种子,称为草麴。例如,江南地区普遍利用蓼草(*Polygonum*)制作小麴^[27],台湾原住民使用多种植物做麴,其中包括藜属(*Chenopodium*)种子^[28]。麴中含有多种微生物,包括霉菌、酵母和细菌(其中霉菌可以分泌多种酶),然后将麴拌入蒸熟或煮熟的谷物,糖化和发酵同时进行(并行复式发酵法),可达到更高的酒化度。(3) 口嚼酒,首先口嚼谷物或块根植物,利用人唾液中的酶达到糖化的效果,再利用酵母发酵^[28-30]。

古代文献中也有早期酿酒方法的记述。根据甲骨文的记载,商代至少有酒、醴和鬯三种酒^[31]。周代文献中对这些酒的酿造方法有了进一步说明。《尚书·说命》有“若作酒醴,尔惟麴蘖”的记



图二 本文分析的半坡和姜寨出土尖底瓶
A. 尖底瓶标本 B、C. JZ1 口沿和 JZ4 器身内壁上的残留物

载。蘖的意思是发芽谷物。明代宋应星著《天工开物》也说“古来麴造酒，蘖造醴”。这些正是我们所说的麴酒和谷芽酒。先秦文献中多处提到鬯，如《诗经·大雅·江汉》有：“厘尔圭瓚，秬鬯一卣”。毛传解释为：“秬，黑黍也，鬯香草也，筑煮合而郁之曰鬯。”鬯为何种香草，自古以来众说纷纭^[32]。但是基本的共识为，鬯是黍加以某些草本植物酿造而成的酒，相当于后代所说的草麴酿酒。口嚼酒不见于先秦古代文献，但近代民族学研究中多有记述，其中包括见于台湾原住民的酿酒传统^[33]。

值得注意的是，这三种酿酒方法的主要区别在于糖化过程，而发酵都是利用酵母。小口尖底瓶有 3 个形制特点适于酵母进行发酵。首先，酵母存在于自然环境中，在合适的温度、湿度及营养环境中会很快繁殖；但是需要在厌氧的环境中才产生酒精和二氧化碳。因此，用于酿酒的陶器一般为小口，以利于封口，形成厌氧环境^[18, 34]。小口尖底瓶的口部设计，与酿酒器皿需要封口与提供厌氧环境的要求相符。虽然尖底瓶的小口不便于倒进醪液，但是这一问题完全可以通过漏斗解决。其次，酿

酒会产生大量渣滓，如原料中的谷壳、酵母等；小口尖底瓶底部呈锥状体有利于渣滓的集中和沉淀。此外，由于酵母发酵时释放二氧化碳并产生热量，醪液中会出现上下的自然对流 (convection currents)；热流从锥状底部上升到醪液的上部，同时周围温度低的液体下降，形成循环运动模式；对流的过程最终使发酵容器内的液体温度达到均匀，有利于保证酒的质量。液体的高度与自然对流的强度成正比；尖底瓶一般为瘦高型体，高度与直径的比例基本都大于 2:1，该特点可促进自然对流。这种锥状体的设计也见于现代啤酒厂的筒形锥底发酵罐的形状，经测试证明是啤酒发酵罐的最佳设计^[35-37]。根据酿造发酵过程的原理，对陶器残留物的特征及其中微植物和微生物的分析可以帮助我们鉴定酿酒使用的原料和酿造方法，列举如下：

1. 淀粉粒和植硅体分析有助于鉴定酿酒原料的种类。由于糖化过程需要在较高温度下进行 (65~70°C)，会对淀粉粒造成特定的损伤和糊化特征，因此淀粉粒的损伤形态能够提供是否经过发酵的信息。根据我们的酿酒实验及观察酿造过程中淀粉粒的变化，经过糖化发酵的淀粉粒的损伤特征为：表面有中心凹陷、裂痕及微型凹坑，有些颗粒的中心部分几乎完全缺失，仅保存边缘部分并在偏光镜下显示双折射光泽，有些颗粒表面部分缺失、部分层纹暴露、也有些具有膨胀变形的糊化特征，消光十字模糊或消失等。这些损伤是淀粉酶分解以及糖化时加热的综合作用造成^[38]。值得注意的是，器物上的淀粉粒也可能被土壤环境中存在的酶分解而出现损伤，如部分缺失、出现裂痕及微型凹坑等^[39]。但是发酵过程形成特有的损伤特征，既有酶的分解，又有加热造成的糊化特征。特别是那些中心部分缺失但边缘部分仍存，并有双折射光泽的糊化淀粉粒、最具代表性。这些发酵所造成的糊化与一般的蒸煮食物所造成的损伤糊化形态也有明显区别；后者主要表现为淀粉粒比较均匀地向周边膨胀，而不见中心部分缺失的现象^[40, 41]。酿酒过程中，在加入作为

糖化剂的原料时(发芽谷物或麴),也加入经过蒸煮的谷物^[29];因此在醪液中也会存在具有一般蒸煮特征的淀粉粒。

2. 如果古代陶器盛装的是谷芽酒,那么谷物的颖壳有可能保存在器物内壁上;因此可以根据残留物中颖壳植硅体的存在进行判断。对颖壳植硅体的种属鉴定有助于了解酿酒使用的发芽谷物种类。这一方法已经运用在上述多项酒器残留物的研究中^[2、3、6、42、43]。必须指出,根据颖壳在陶器中出现推测酿酒方法有一定局限性。因为如果古人在加工谷物时没有把谷壳脱净,这样也会在酿酒陶器残留物中发现少量颖壳植硅体。

3. 如果陶器盛装的是麴酒,那么与酒麴有关的霉菌可能会保留在残留物中。中国传统酿酒使用的酒麴中的霉菌主要包括曲霉(*Aspergillus*)、根霉(*Rhizopus*)、红曲霉(*Monascus purpureus*)及毛霉(*Mucor*)等^[44、45]。霉菌的主要组成部分包括菌丝、孢子和孢子囊。霉菌由分枝或不分枝的菌丝构成,交织在一起的菌丝称菌丝体。菌丝是霉菌营养体的基本单位,由孢子发芽而成。在菌丝的生长过程中,一部分化为孕育菌丝,顶端生出孢子囊,产生孢子。不同霉菌的菌丝、孢子囊和孢子的形态有别^[46]。在古代标本中的霉菌如果保存的好,可以根据其形态特征进行初步鉴定。酿酒霉菌的最早证据来自宝鸡关桃园遗址前仰韶时期的陶壶上,形态与曲霉和根霉相似^[2]。另在澠池丁村仰韶中期尖底瓶的残留物中发现有曲霉和毛霉^[6]。

4. 在制麴过程中加入某些野生植物茎叶或种子,是由于植物茎叶上会附着多种霉菌、酵母及细菌,能够提供制麴过程中所需要的菌群^[27、28]。关桃园前仰韶时期的酿酒陶器残留物中有大量主要来自植物茎叶的棒型植硅体,与霉菌共存,应是利用草麴的结果^[2]。因此,残留物中存在较多茎叶植硅体应为使用草麴的证据。

5. 无论哪种酿酒方法都需要酵母菌帮助发酵,因此酵母的存在是酿酒的重要证据。传统酿酒所利用的酵母有多种,其中最常见的是酿

酒酵母(*Saccharomyces cerevisiae*)。其形状为圆形和椭圆形,长度大致为5~10微米。鉴定酵母的最好标志是芽殖状态;芽殖是酵母菌最常见的繁殖方式,表现为细胞表面向外突出,长出芽体,逐渐增大到正常大小时,与母体脱离,成为一独立细胞^[46]。显示出芽殖状态的酵母细胞也发现在关桃园和丁村的酿酒陶器残留物中^[2、6]。

6. 根据人类学家在非洲埃塞俄比亚的调查,当地民族有利用谷物酿造谷芽酒的传统。酿酒的陶罐是专门制作并专用于酿酒发酵;每次发酵后剩在陶器中的渣滓要留到下一次酿酒时才洗,而且从来不会将发酵罐完全清洗干净,因为他们认为如果洗干净会加速酒液对陶罐表面的侵蚀^[47]。这种做法实际上会使一些酿酒原料留在器壁上,并渗入器壁内,使微生物(例如酵母)在发酵罐中得以保存。重复使用专用的酿酒容器有利于保存和选择理想的发酵微生物群,这也是接种发酵的方法之一^[48]。接种发酵方法有多种,世界各地的古今酿酒史中普遍存在,许多古代酿酒器壁上常见一层有机残留物^[48、49],应为长期重复使用的结果。因此,为了选择理想的菌群,有效地进行长时期的接种发酵,酿酒器在使用期间应该不用于其他功能。以此推测,考古遗存中有明显残留物的发酵罐很可能是专用的酿酒器。

7. 尖底瓶残留物中是否存在与酿酒发酵有关的微植物和微生物组合是判断是否为酒器并分析酿酒方法的重要证据。这种特殊组合不存在于土壤中或与酒无关的器物上。因此,根据分析采自土壤或非酿酒陶器上的控制标本,与残留物标本比较,也可以进一步帮助判断残留物是否确实与陶器功能有关。

二、标本采集和分析方法

半坡遗址发掘于1954~1957年^[50],姜寨遗址发掘于1972~1979年^[7]。两遗址出土的陶器在发掘之后都已经过清洗,存放在半坡博物馆文物库房中。根据上述酿酒器的特点,我们选择陶器内

壁表面可见黄白色或黄黑色残留物痕迹的标本进行取样(图二, B、C)。残留物样品的采集及分析方法的过程为:(1)用干净牙刷清扫每件器物表面的浮土。(2)对小型陶器残片使用超声波清洗仪震荡6分钟,对大型陶器使用超声波牙刷清洗6分钟,获得液体残留物;同时用干净的刀片在陶器内部表面直接刮取固体残留物。(3)在实验室通过EDTA($\text{Na}_2\text{EDTA} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)清洗法和重液离心法将残留物进行分离,重液为比重为2.35的多钨酸钠(sodium polytungstate)以便同时提取可能存在的多种微植物和微生物遗存(包括淀粉粒、植硅体、真菌等);吸取分离后的残留物溶液滴在干净的载玻片上,干燥后滴加50%甘油溶液,加盖玻片,并用指甲油封片。(4)使用刚果红(Congo Red, 0.1%, 1mg/ml)染色法^[51]对部分器物的残留物中一小部分进行测试,以判断是否存

在糊化淀粉粒。(5)微植物和微生物记录使用蔡司生物显微镜(Carl Zeiss Axio Scope A1),配备有微分干涉相差(DIC)及偏振光装置,并配有数码相机(AxioCam HRc Rev.3)记录影像。

我们提取了半坡博物馆库房标本架上的尘土作为控制标本,发现其中有大量纤维和孢粉,但只有极少量淀粉粒,不见糊化特征,与陶器残留物的组合截然不同(表一~三)。这一分析可以证明陶器内壁附着的残留物不是环境的污染,而是与器物的原始功能有关。

三、残留物分析结果

经分析,尖底瓶残留物中发现有较多淀粉粒、植硅体、霉菌的菌丝、孢子和孢子囊、以及酵母细胞;并有少量棒状方解石晶体。以下,

表一 半坡(BP)和姜寨(JZ)淀粉粒记录

标本号	器物号	I型 粟黍	II型 薏米	III型 小麦族	IV型 栝楼根	V型 豆类	VI型 芡实	无法 鉴定	合计	糊化 损伤	未糊化 损伤
BP1	M5(2)	1	2	2	14			12	31	13	9
BP2	T4606			1			2(22 内部小颗粒)	7	30	11	3
BP- 合计		1	2	3	14		2(22 内部小颗粒)	19	41	24	12
BP-%		2.4	4.9	7.3	34.1		4.9	46.3	100	58.5	29.3
JZ1	M74:11	7		10		1		5	23	2	9
JZ2	M228:1	9	3	34	1			18	65	14	27
JZ3	M87	12		13	1			2	28	13	
JZ4	H191	5	27	11	2			2	47	1	15
JZ5	F46	2		2	1			1	6	1	3
JZ6	F47	20			1			8	29	26	3
JZ7	W19:1			2				4	6	2	4
JZ8	M159:3							14	14	14	
JZ9	M244:6	16	1	28	9	2		13	69	12	31
JZ 合计		71	31	100	15	3		67	287	85	92
JZ %		24.7	10.8	34.8	5.2	1.0		23.3	100	29.6	32.1
总计 N		72	33	103	29	3	2(22 内部小颗粒)	86	328	109	104
总计 %		22.0	10.1	31.4	8.8	0.9	0.6	26.2	100	33.2	31.7
出现率 N		8	4	9	7	2	1	11		11	9
出现率 %		72.7	36.4	81.8	63.6	18.2	9.1	100		100	81.8
最小长度 *		7.13	8.61	4.72	10.2	22.57	23.28 (2.8 内部小颗粒)				
最大长度 *		19.05	23.03	44.96	32.79	27.4	26.89 (5.41 内部小颗粒)				
平均长度 *		13.52	16.18	20.73	16.93	24.90	25.09 (4.14 内部小颗粒)				

* 长度为微米

表二 半坡—姜寨尖底瓶残留物中的植硅体记录

植硅体形态型	植硅体可能来源	BP1	BP2	JZ1	JZ2	JZ3	JZ4	JZ5	JZ6	JZ7	JZ8	JZ9	总计	总计 %
硅化骨架 Silica skeletons														
η 型	黍 (颖壳) <i>Panicum miliaceum</i>					25			42		41	3	111	13.03
Ω 型	粟 (颖壳) <i>Setaria italica</i>					1							1	0.12
未确定黍族硅化骨架 Undetermined Paniceae	黍族 (颖壳) Paniceae			2	4	25	2	1	72		69	1	176	20.66
长方形绞合状树枝型 Elongate dendriform	早熟禾亚科 (颖壳) Pooideae				1								1	0.12
长方形粉刺纹饰型 Elongate Echinata	禾本科 Poaceae				1				2	1	7	1	12	1.41
长方形圆齿状纹饰型 Elongate Crenate	禾本科 Poaceae		1		1				1				3	0.35
长方形柱状纹饰 Elongate Columellate	禾本科 Poaceae	4	1		6				4		11		26	3.05
长方形光滑状 / 曲波状纹饰 Elongate Psilate/sinuate	禾本科 Poaceae		6		4		4	1	2		4		21	2.46
长方形不规则纹饰 Elongate Irregular	禾本科 Poaceae								1				1	0.12
未鉴定硅化骨架 Undetermined multi-cell		1											1	0.12
单细胞植硅体 Single-cell phytolith														
双峰型 Double-peak	水稻 (颖壳)								1				1	0.12
芦苇盾型 Phragmites bulliform	芦苇属 Phragmites				5						1		6	0.70
哑铃型 Bilobate	黍亚科 Panicoideae	6		1	11	3	4	4	10			2	41	4.81
多铃型 Polylobate	黍亚科 Panicoideae	1		1					1				3	0.35
十字型 Cross/quadrilobate	黍亚科 Panicoideae	5			2	1			3		6		17	2.00
帽型 Rondel	禾本科 Poaceae	26			2	1	1	2	6	1			39	4.58
扇型 Common bulliform	禾本科 (叶表皮机动细胞) Poaceae leaf	14	1		4	1		1	1		1	2	25	2.93
长方形绞合状树枝型 El dendriform	早熟禾亚科 (颖壳) Pooideae husk/ inflorescence		1			1							2	0.23
光滑状 / 曲波状棒型 El psilate/sinuate	禾本科 (主要来自茎叶) Poaceae mainly stem/leaf	39	36	4	101	20	14	2	61	3	33	7	320	37.56
乳突型 Papillae cell	禾本科 Poaceae					1		1					2	0.23
毛细胞 Hair cell	真双子叶植物 eudicots	4	3	1	13	3	4	3	4	3	2	1	41	4.81
总计 TOTAL		100	49	9	215	82	29	15	214	10	192	20	852	100

我们对残留物结果进行详细描述。

1. 淀粉粒

11 件陶器标本的残留物中共发现 328 颗淀粉粒, 其中 242 颗 (73.8%) 可以鉴定为 6 种类

型 (图三)。有 86 颗 (比例 26.2%) 淀粉粒缺少鉴定特征, 归为无法鉴定类 (表一、图四)。

I 型为黍亚科 (Panicoideae) (n=72; 比例 22%; 出现率 72.7%), 粒长 7.13~19.05 微米, 为多边形

表三 半坡—姜寨尖底瓶残留物中真菌(酵母和霉菌)记录

	BP1	BP2	JZ1	JZ2	JZ3	JZ4	JZ5	JZ6	JZ7	JZ8	JZ9	Total	%
酵母(圆形)	1	6		5		2	5	3	1		5	28	6.8
酵母(椭圆形)	16	18		8		4	5	3	7		5	66	16.0
芽殖酵母(圆、椭圆形)	2	14				4	11	7	2			40	9.7
酵母总数	19	38		13		10	21	13	10		10	134	32.5
菌丝(褐色、灰色)	13	12	3	3	1	7	9	10	1		2	61	14.8
菌丝(透明)	7	3	2	74					3			89	21.6
菌丝体				4								4	1.0
菌丝总数	20	15	5	81	1	7	9	10	4		2	154	37.4
孢子囊	5	3	1	3				4				16	3.9
孢子囊连接菌丝	1	3		53				5	1		1	64	15.5
孢子囊总数	6	6	1	56				9	1		1	80	19.4
孢子(圆形)	1	2	1				6	4	1		3	18	4.4
孢子(椭圆形)	4	1	2			1	5	6	2		5	26	6.3
孢子总数	5	3	3			1	11	10	3		8	44	10.7
霉菌总数	31	24	9	137	1	8	20	29	8		11	278	67%
真菌总数	50	62	9	150	1	18	41	42	18		21	412	100

或近圆形,脐点居中,多有裂隙。这些特征见于粟(*Setaria italica*)、黍(*Panicum miliaceum*)及薏苡(*Coix lacryma-jobi L.*)的淀粉粒,往往很难鉴定到更精确的分类^[52]。

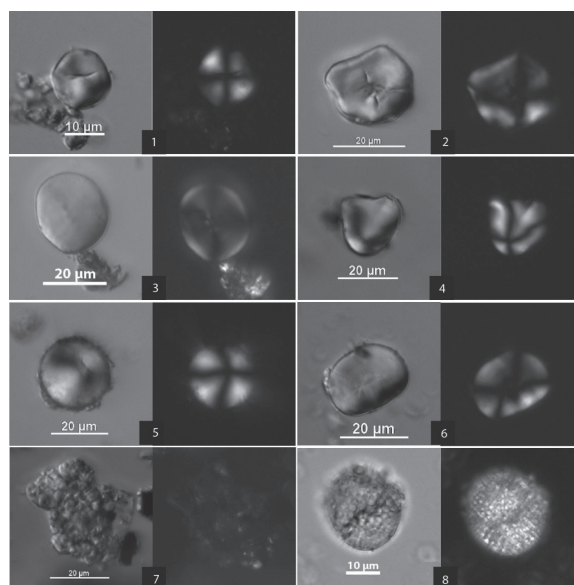
II型为薏苡(*C. lacryma-jobi L.*)(n=33;比例10.1%;出现率36.4%),粒长为8.61~23.03微米。其形态特征可区别于粟黍,但与薏苡相似,如粒型较大、脐点偏心、消光十字臂呈“Z”形曲折状^[52]。

III型为小麦族(Triticeae)(n=103;比例31.4%;出现率81.8%),粒长4.72~44.96微米,粒型为透镜体,脐点居中。这些特征与中国北方常见的冰草属(*Agropyron sp.*)、披碱草属(*Elymus sp.*)和赖草属(*Leymus sp.*)的淀粉粒近似^[53]。

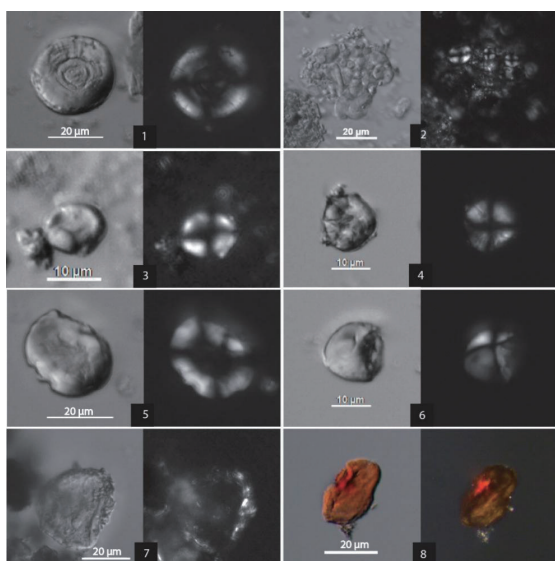
IV型为栝楼根(*Trichosanthes kirilowii*)(n=29;比例8.8%;出现率63.6%),粒长10.2~32.79微米,其型态为圆形、钟形、半圆形等,脐点居中或偏心,消光十字多弯曲。栝楼广泛分布于中国南北方^[54]。

V型为豆类,可能为野豌豆(*Vicia sp.*)(n=3;比例0.9%;出现率18.2%)粒长22.57~27.4微米。

呈不规则的椭圆形或肾形,消光十字有多个臂,中心呈现大面积黑色区域。秦岭地区有17种野豌豆,古文献中的“薇”鉴定为大野豌豆(*Vicia gigantea Bunge*)^[55]。诗经中“小雅·采薇”记述了西周人在渭河流域采集野豌豆的活动。



图三 半坡—姜寨尖底瓶残留物中的淀粉粒类型及现代对比标本(每颗淀粉粒显示DIC和偏振光镜拍摄的影像)
1. I型, 粟黍 2. II型, 薏苡 3. III型, 小麦族 4、5. IV型, 栝楼根 6. V型, 豌豆 7. VI型, 芡实 8. 现代芡实淀粉粒



图四 半坡—姜寨尖底瓶残留物中的损伤淀粉粒（每颗淀粉粒显示 DIC 和偏振光镜拍摄的影像）

1. 小麦族，表明可见微型坑和深沟
2. 小麦族，呈群组状，部分较完整，部分已膨胀变形，十字消光模糊，应为加热后糊化所致
3. 可能为粟黍，中心凹陷
4. 粟黍，表面可见微型坑和深沟
5. 野豌豆，中心洼陷及边缘破损并有轻度糊化
6. 栝楼根，边缘破损
7. 发酵过程的糊化，膨胀变形，中心部缺失，但边缘保留双折射光泽
8. 经刚果红染色显示的糊化、膨胀变形淀粉粒，偏光镜下可见橘红色光泽

VI型为芡实(*Euryale ferox*) (n=2; 比例0.6%; 出现率9.1%)，淀粉粒整体为近圆形聚集体(23.28、26.89微米)，内部包含许多小形多边形颗粒(n=22; 2.8~5.41微米)。这些特征与芡实十分接近。在我们的现代对比标本中，芡实淀粉粒往往呈圆形或椭圆形出现(直径9.51~32.33微米)，内含大量小型颗粒(1.71~3.93微米)(图三，8)。我们仅在BP2标本上发现两颗芡实淀粉粒聚集体，其中一颗部分缺失(图三，7)。芡实生在池塘、湖沼中，遍布中国南北各地^[56]。

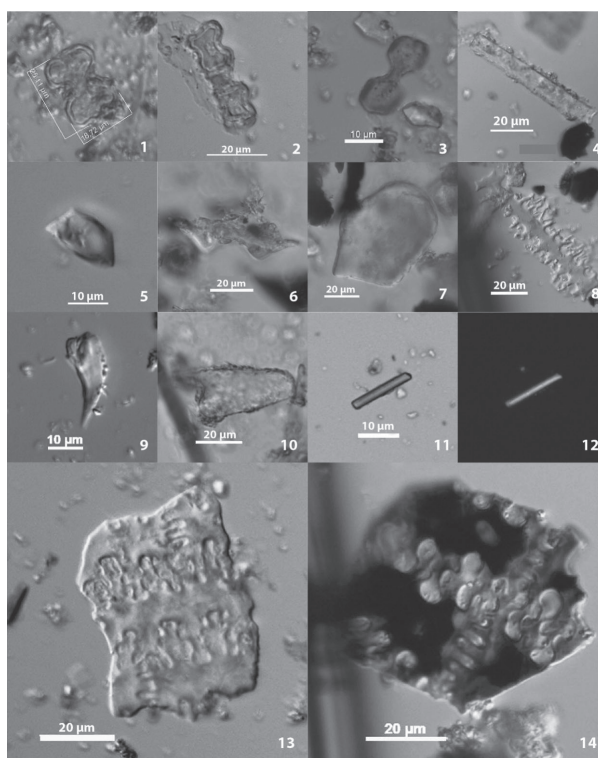
总之，淀粉粒残留物中包含的植物主要是粟黍、薏苡和小麦族，另外有少量的栝楼根、野豌豆和芡实。这些植物的淀粉粒均见于中国北方新石器时期的磨盘磨棒上以及渭水流域新石器时代的陶器残留物中。其中最常见植物包括粟黍、薏苡、小麦族和栝楼根；临潼零口和宝鸡关桃园的新石器早期陶器中有类似野豌豆的淀粉粒，蓝田新街的仰韶文化晚期的尖底瓶中发现有芡实^[3-5, 57]。根据关中地区西安鱼化

寨和华县东阳遗址的浮选结果，粟黍是仰韶时期最主要的农作物^[58, 59]。半坡—姜寨陶器淀粉粒组合反映了渭水流域仰韶文化先民普遍栽培和采集的植物。

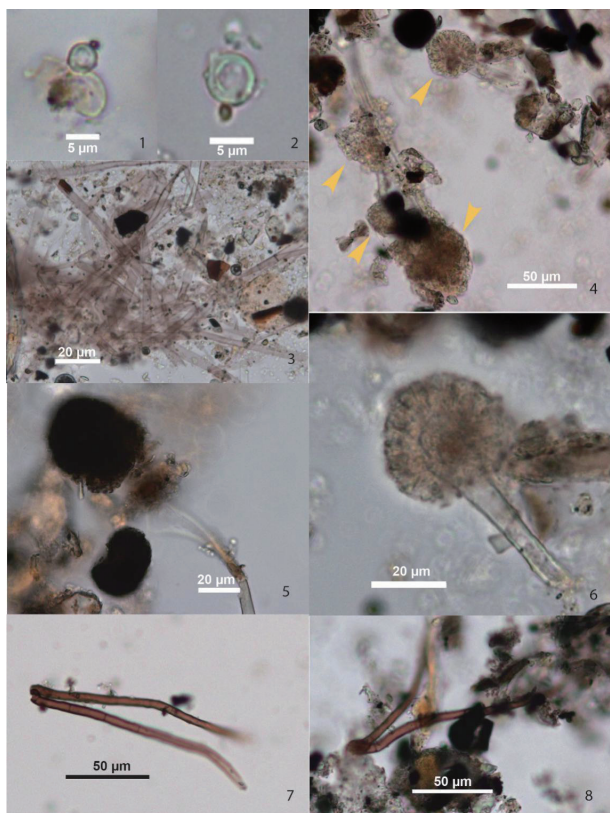
另外，大多数淀粉粒都显示有损伤特征(61.2%)，并可以分为未糊化(29.9%)和糊化(31.3%)两类。前者可以代表淀粉酶分解造成的破坏，后者具有经加热和发酵造成的糊化特点。另外也有少量糊化淀粉粒显示为一般蒸煮所致，这类糊化特征在我们的酿酒标本中也很常见(图四)。综合来看，淀粉粒的整体特征包含了植物发酵所造成的的各类损伤现象。

2. 植硅体

残留物中共发现852颗植硅体。8件器物中出有来自黍族颖壳的植硅体(n=288; 23.8%)，其中大多数只能鉴定为黍族(n=176)，其次为黍的η型(n=111)，只有1例为粟的Ω型。鉴于绝大多数能够鉴定到属的颖壳均来自黍，推测那



图五 半坡—姜寨尖底瓶残留物中的植硅体和棒状方解石晶体
1. 薏苡十字型 2. 十字型 3. 哑铃型 4. 棒型 5. 帽型
6. 水稻双峰型 7. 芦苇扇型 8. 长方形绞合状树枝型
9. 毛细胞 10. 刺 11、12. 棒状方解石晶体(亮视野和偏光视野) 13. 黍颖壳η型 14. 粟颖壳Ω型。



图六 半坡—姜寨尖底瓶残留物中酵母细胞和霉菌

1、2. 酵母, 出芽状态 (BP1, 2) 3. 菌丝体 (JZ2)

4. 曲霉, 箭头所指处为附着分生孢子和小梗的顶囊, 与孢子梗相连 (JZ2) 5. 黑色孢子囊似与菌丝相连, 可能为根霉或毛霉 (JZ2) 6. 曲霉顶囊 (为图六, 4 右上角顶囊的放大)

7、8. 根霉 (BP1, JZ5), 与假根相接处的菌丝

些定为黍族的颖壳大多数也是黍。哑铃型、多铃型和十字型等一些黍亚科中常见的植硅体主要出现于 9 件器物中 (n=61), 大部分可能来源于黍; 其中一部分十字型植硅体的长或宽超过 18 微米, 不见于粟黍, 可能来自薏苡的内稃和外稃。有 3 例为绞合状树枝状型, 可能来源于早熟禾亚科的颖壳; 残留物中有较多的小麦族淀粉粒, 因此推测这些颖壳可能来自野生小麦族, 但无法准确确定其来源种属。另外, 有一例水稻颖壳的双峰型。还有较多禾本科中常见的棒型、扇型和帽型, 其中包括 6 例来自芦苇茎叶的盾型。主要见于真双子叶植物 (eudicots) 茎叶的毛细胞出现在 10 个标本中 (n=30)。毛细胞来自于菊科 (Asteraceae)、榆科 (Ulmaceae)、葫芦科 (Cucurbitaceae)、荨麻科 (Urticaceae) 等植物^[60], 我们目前尚无法提供更准确的鉴定; 但残留物中

有属于葫芦科的栝楼根淀粉粒, 标本中的毛细胞中是否有些来自栝楼, 需要将来做进一步分析。总之, 残留物中有大量黍族和少量小麦族及水稻的颖壳植硅体, 并与禾本科的多种植物茎叶植硅体共存 (表二、图五)。

3. 真菌 (酵母和霉菌)

残留物标本中共发现 412 个真菌个体或组合, 包括酵母细胞和霉菌 (表三)。

在 8 件陶器上共发现 134 个酵母细胞, 为圆形和椭圆形, 直径范围 3.19~11.9 微米。其中 40 个显示出有小突起状的芽体, 是芽殖的初期形态 (图六, 1、2)。这些酵母细胞形态与酿酒酵母接近 (图七, 8), 但我们无法仅仅根据形态鉴定其种属。

除了 2 件标本外 (JZ3, JZ8) 其他陶器标本都发现有较多霉菌的组成成分, 包括 154 个菌丝和菌丝体、80 个孢子囊和 44 个孢子。其中有些具有曲霉和根霉的特征。曲霉菌丝有分隔, 无假根, 分生孢子梗从厚壁而膨大的菌丝细胞生出, 分生孢子梗顶端膨大而形成顶囊, 顶囊表面产生小梗, 从小梗生出分生孢子。根霉菌丝无分隔、有假根、菌丝在与假根相对位置向上生出孢囊梗, 顶端形成孢子囊, 内生孢囊孢子。孢子囊的囊轴明显, 囊轴基部与柄相连处成囊托。毛霉的外形成毛状, 菌丝无隔, 有分枝, 囊轴球形, 与囊梗不分隔, 无囊托。根霉和毛霉形态比较相似, 但毛霉无假根 (图七, 1~7)^[46,61,62]。

在 JZ2 标本上发现大量的霉菌 (n=137), 大多数具有明显的曲霉特征, 其中至少有 42 个可以分辨出分生孢子梗和圆形的顶囊, 以及从顶囊表面生长出的小梗和孢子。同时, JZ2 中也有少量根霉或毛霉, 显示为与孢子梗连接的圆形孢子囊, 其中还可见的黑褐色的孢囊孢子。在 BP1 和 JZ5 中发现有分枝的菌丝, 其形态类似根霉从假根相对位置生长出菌丝的状态 (图六; 对照图七中的相应霉菌形态)。

4. 棒状方解石晶体 (rod-shaped calcite crystals)

在 3 个标本中发现有少量棒状晶体。这些晶体大多表面光滑, 以单体出现, 多为直棒形, 有

方钝形末端。在偏光镜下可见双折射光泽(图五, 11、12)。这些特征与棒状方解石晶体的形态十分吻合。棒状方解石晶体是真菌菌丝生物矿化的结果, 菌丝在分解后将针状物释放到周围环境中^[63、64]。棒状方解石晶体的出现表明残留物中曾存在真菌, 与上述真菌菌丝的鉴定互为佐证。

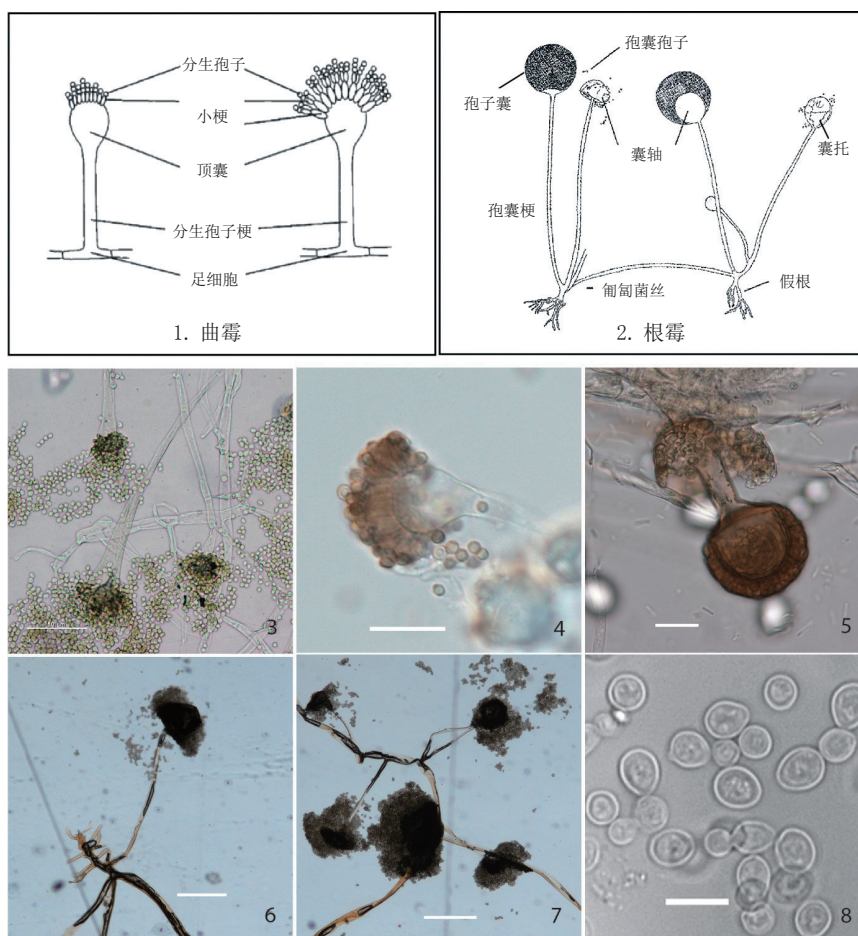
四、讨论: 残留物组合与酿酒和饮酒方法

综合残留物中各种微生物和植物的出现情况, 可以观察到以下现象。

第一, 根据淀粉粒和植硅体的类型可以推测, 尖底瓶中盛装的植物种类包括粟黍、薏苡、水稻、野生小麦族、野豌豆、栝楼根及芡实。有明显糖化

和发酵特征的淀粉粒存在说明这些植物是酿酒原料。其中各种谷物淀粉粒在数量和出现率中都占主要地位, 而豆类和块根类较少。姜寨植硅体中有 1 例水稻颖壳的双峰型, 但淀粉粒中没有发现水稻。根据我们的酿酒实验, 大米淀粉粒在发酵过程中大部分消失, 而且大米淀粉粒颗粒很小, 如果不是以群组的状态出现, 不易鉴定, 因此可能很难在古代残留物中发现。另外, 在酿酒发酵过程中, 大部分淀粉粒由于糖化和糊化而变形, 导致无法鉴定。因此, 我们不能根据淀粉粒的数量直接计算酿酒原料的比例, 但大致可以推测主要的酿酒谷物为粟黍、薏米、小麦族和稻米, 并附加野豌豆和块根植物。

第二, 小麦族淀粉粒的出现率较高, 见于 9 件陶器, 并在其中 3 件陶器中 (BP2, JZ2, JZ3)

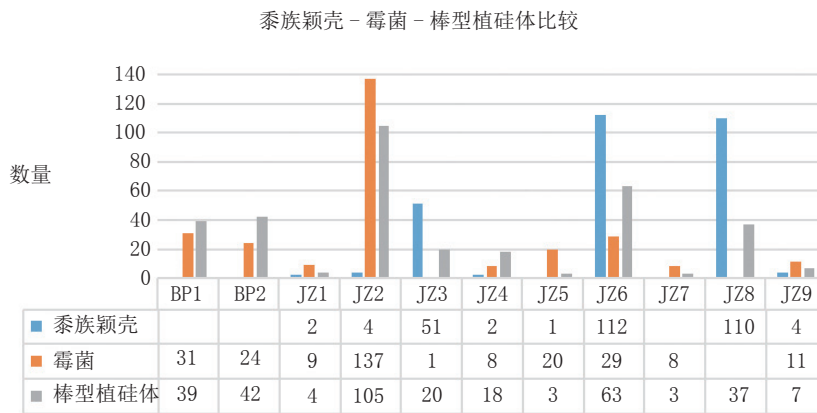


图七 现代真菌对比标本

1. 曲霉 2. 根霉 3. 曲霉及菌丝体 4. 曲霉顶囊、小梗及分生孢子
5. 毛霉孢囊梗及孢囊 6、7. 根霉假根、孢囊梗、孢囊及孢囊孢子 8. 酿酒酵母

与早熟禾亚科颖壳植硅体共存。这些淀粉粒和植硅体可能来自同样的植物, 但目前无法鉴定到种属。这些残留物至少说明仰韶时期对野生小麦族植物的利用包括酿酒。

第三, 在姜寨的 8 件标本中发现黍族颖壳植硅体; 其中 2 件标本 (JZ3、8) 有数量非常高的黍族颖壳 (分别为 51、110), 但基本不见霉菌 (图八)。谷物颖壳和相应的具有发酵特征的淀粉粒同时出现可以作为酿造谷芽酒的指示物, 因此这 2 件尖底瓶中盛装的可能是以发芽黍为单纯发酵剂的谷芽酒。渭河流域酿造谷芽酒的最早证据见于临潼零口遗址白家期的小口鼓腹罐的残留物中, 其酿酒原料主要为黍和稻米, 年代接近距今 7800 年^[2]。零口距离姜寨约 19 公里, 两遗址中的酿酒原料和方法的类似,



图八 根据陶器残留物中黍族颖壳植硅体、霉菌和棒型植硅体分布推测酿酒方法
(BP1, BP2, JZ7 为单纯麴酒; JZ3, JZ8 为单纯谷芽酒; 其他可能为两种方法混合酿造)

可能与其相似的自然环境及同一地区的技术传承有关。

第四, 利用霉菌制麴酿酒的方法见于 2 个遗址中, 其中 9 个标本中霉菌的数量在 8 个个体以上。能够鉴定的霉菌包括曲霉和根霉。尤其在 JZ2 标本中发现大量霉菌的片段, 如孢囊和菌丝; 以曲霉为主, 并有少量根霉。利用曲霉和根霉酿酒的最早证据见于宝鸡关桃园前仰韶时期的陶器上, 是至今所知中国最早的麴酒^[2]。另外, 澠池丁村仰韶中期尖底瓶残留物中发现曲霉和毛霉^[6]。这 3 种霉菌都是现代麴中常见的菌种^[45]。曲霉和根霉在一个尖底瓶 (JZ2) 中集中出现说明仰韶早期人们已经有意识地选择和培养有益的发酶菌群。他们并不明白其中的科学原理, 而是经历了千百年反复尝试而获取的实践经验。

另外, 在半坡—姜寨陶器上发现有较多霉菌的 8 个标本中, 3 个不见颖壳植硅体 (BP1、2; JZ8), 说明是单纯使用酒麴酿酒。另外 6 个标本中发现既有霉菌又有颖壳植硅体 (JZ1、2、4~6, 9), 可能是在同一器物中曾经利用谷物发芽和酒麴两种方法酿酒。从整体来看, 我们观察到的两种酿酒方法和器型大小之间没有直接联系。例如, 可以鉴定为单纯使用酒麴的标本 (BP1、2; JZ7) 和可能使用两种酿酒方法的标本 (JZ1、2、6、9) 都来自大小不同的尖底瓶。另外, 我们不能肯定那些只有极少量颖壳植硅体的标

本 (JZ5 只有 1 个黍颖壳植硅体) 属于有意识利用发芽谷物酿酒 (图八)。

第五, 每个标本中都发现有棒型植硅体; 这类植硅体主要来自禾本科植物茎叶, 但是也见于颖壳中。标本中出现棒型植硅体可能反映两种情况: (1) 如果在制麴过程中加入某些植物茎叶作为草麴, 那么残留物中会同时存在霉

菌和来自茎叶的棒型植硅体。我们的标本中有 4 例 (BP1、2; JZ2、6) 是较多数量的霉菌 ($n=24\sim 137$) 和棒型植硅体 ($n=39\sim 105$) 共存, 其中两例不见颖壳; 这 4 例标本可能是使用草麴的反映。(2) 如果残留物中不见或极少霉菌, 但有较多颖壳和棒型植硅体, 那么这些棒型植硅体也许主要来自颖壳。标本中的 JZ3、8 可能属于这种情况 (图八)。

第六, 根据有些尖底瓶口沿磨损的微痕形态 (如垂直向线状痕), 我们曾经推测仰韶人可能使用芦苇或竹子做的吸管饮酒^[65]。在本文所分析的 2 个姜寨尖底瓶标本中 (JZ2、8) 发现来自芦苇茎叶的盾形植硅体 (图五, 7), 可以作为使用芦苇吸管饮酒的佐证。

BP1、BP2、JZ7 为单纯麴酒; JZ3、JZ8 为单纯谷芽酒; 其他可能为两种方法混合酿造。

第七, 仰韶文化早期代表着一个相对平等的农业社会, 在所有仰韶遗址的居住区和墓葬中都出土有尖底瓶, 该器物的广泛分布表明酒被人们普遍享用, 而不是仅作为少数精英人士的奢侈品。各种大小的尖底瓶可能在不同的社会场合中使用, 例如, 小型尖底瓶可能适于个人或家庭饮用, 而大型尖底瓶可以满足更多人的需求, 如社区宴飨时的群饮。这一推测需要更多的证据来检验, 但半坡和姜寨的聚落模式可以支持这种假设; 两个遗址均为有壕沟围绕的村落, 少数大型公共建筑被许多中小型的家

庭住所围绕。大型公共建筑与宴饮活动之间的关系也已经通过对河南偃师灰嘴遗址大房子地面中残留的分析得以确认^[66]。此外,尖底瓶的形制趋于向大型发展,这与仰韶大房子的规模从早期(约100平方米)到晚期(约300平方米)增加的总体趋势一致。这一规律也许意味具有宴饮性质的公共聚会的规模逐渐扩大。这些现象都表明,仰韶文化中的饮酒行为与社会复杂性发展之间有着密切的关系。

最后,器物埋藏学背景的差异似乎影响了残留物中微生物的保存,特别是淀粉粒的保存。来自墓葬的2个完整小型尖底瓶(JZ2、9)中发现了最多的淀粉粒数量(65和69),JZ2中也保存了最多的霉菌(137)。而来自房址(JZ5)和瓮棺(JZ7)的标本保存的淀粉数量最少(各为6)。这些结果表明,为了获取最好的酿酒证据,除了针对器表有可见残留物的酿酒器之外,墓葬中完整的随葬品也是较理想的采样对象。

五、结论

以上的分析证明,出现于7000年前最早的仰韶文化尖底瓶是一种新型的酿酒容器,其结构设计有利于酿造发酵。酒的原料是当时常见的各种栽培和野生植物,大小不等的尖底瓶可能用于不同的社会场合。综合半坡和姜寨尖底瓶残留物中淀粉粒、植硅体、霉菌、酵母细胞和棒状方解石晶体的组合规律可以看出,黍可能是酿酒的主要原料,加以其他谷物(粟、小麦族、水稻)、豆类和块根植物(栝楼根、芡实)。酿酒方法基本为谷芽酒和麴酒两种,使用芦苇吸管啜酒可能是饮酒方法之一。谷芽酒主要利用黍发芽,制麴的原料包括谷物和禾本科植物茎叶,麴中的霉菌主要有曲霉和根霉,或许也有少量毛霉,酵母的形态接近酿酒酵母。这两种酿酒方法有时分别使用,有时可能同时使用。这一研究填补了中国新石器时代酿酒历史上1000年的空白,使我们能够重建从9000年到5000年前在黄河中游地区持续发展的酿酒

技术。在这数千年中,那些有益于酿造发酵酒的真菌在酒器残留物中持续出现,表明史前时期的先民已经掌握了接种发酵的方法,包括反复使用专用发酵容器(包括尖底瓶)使得所需微生物菌群得以延续。

这项研究的结果不仅为了解中国史前悠久的酿酒技术传统提供了新资料,而且为深入探索仰韶人与饮酒相关的社会活动开辟了新途径。未来的研究需要分析在更大的区域和更长的时间段内,酿酒和饮酒行为与社会复杂化之间的关系。

致谢:陕西省考古研究院孙周勇促进本项目的合作;西安半坡博物馆的领导和工作人员大力支持并配合工作;中国社会科学院考古研究所提供设备和人员支持;河南浉池仰韶酒厂陈蒙恩提供现代真菌标本并协助鉴定真菌;美国斯坦福大学东亚系冯索菲协助提取残留物标本;本项目由美国斯坦福大学考古中心资助。

- [1] McGovern P. E., Zhang J., Tang J., Zhang Z., Hall G. R., Moreau R. A., Nunez A., Butrym E. D., Richards. M. R., Wang C-S., Cheng G., Zhao Z., and Wang C.. Fermented beverages of pre- and proto-historic China[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2004(51): 17593-8.
- [2] Liu Li, Wang Jiajing, Levin Maureece J., Sinnott-Armstrong, Nasa Zhao Hao Zhao Yanan, Shao Jing, Di Nan, and Zhang. Tian'en. The origins of specialized pottery and diverse alcohol fermentation techniques in Early Neolithic China[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2019 (26): 12767-12774.
- [3] 刘莉, 王佳静, 赵雅楠, 杨利平. 仰韶文化的谷芽酒:解密杨官寨遗址的陶器功能[J]. 农业考古, 2017(6): 26-32.
- [4] 刘莉, 王佳静, 赵昊, 邵晶, 邸楠, 冯索菲. 陕西蓝田新街遗址仰韶文化晚期陶器残留物分析:酿造谷芽酒的新证据[J]. 农业考古, 2018(1): 7-15.
- [5] 王佳静, 刘莉, 等. 揭示中国5000年前酿造谷芽酒的配方[J]. 考古与文物, 2017(6): 45-53.
- [6] Liu Li, Li Yongqiang, and Hou Jianxing. Making beer with malted cereals and qu starter in the Neolithic Yangshao culture, China[J]. Journal of Archaeological Science: Reports, 2020(29): 102-134.
- [7] 西安半坡博物馆, 陕西省考古研究所, 临潼县博物馆. 姜寨一新石器时代遗址发掘报告[M]. 北京: 文物出版

- 社, 1988.
- [8] 中国科学院考古研究所. 西安半坡[M]. 北京: 文物出版社, 1963.
- [9] 宝鸡市考古工作队, 陕西省考古研究所. 陇县原子头[M]. 北京: 文物出版社, 2005.
- [10] 王炜林, 张伟, 张鹏程, 郭小宁, 袁明, 马明志. 陕西高陵杨官寨遗址发掘简报[J]. 考古与文物, 2011(6): 16-32.
- [11] 西北大学文博学院考古专业. 扶风案板遗址发掘报告[M]. 北京: 科学出版社, 2000.
- [12] 宝鸡市考古工作队, 陕西省考古研究所. 宝鸡福临堡: 新石器时代遗址发掘报告[M]. 北京: 文物出版社, 1993.
- [13] 陕西省考古研究院. 西安米家崖: 新石器时代遗址 2004~2006年考古发掘报告[M]. 北京: 科学出版社, 2012.
- [14] 甘肃省文物考古研究所. 秦安大地湾[M]. 北京: 文物出版社, 2006.
- [15] 中国科学院考古研究所. 庙底沟与三里桥[M]. 北京: 科学出版社, 1959.
- [16] 北京大学考古文博学院. 洛阳王湾[M]. 北京: 北京大学出版社, 2002.
- [17] 魏兴涛, 李胜利. 河南灵宝西坡遗址105号仰韶文化房址[J]. 文物, 2003(8): 4-17.
- [18] 巩启明. 仰韶文化[M]. 北京: 文物出版社, 2002.
- [19] 韩明友. 仰韶小口尖底瓶的功能模拟与探释[J]. 社会科学战线, 2015(12): 107-113.
- [20] 王先胜. 关于尖底瓶流行半个世纪的错误认识[J]. 社会科学评论, 2004(4): 5-10.
- [21] 苏秉琦. 关于重建中国史前史的思考[J]. 考古, 1991(12): 1109-1117.
- [22] 李仰松. 对我国酿酒起源的探讨[J]. 考古, 1962(1).
- [23] 包启安. 中国酒的起源(上)[J]. 中国酿造, 2005(2).
- [24] 卫雪, 钱耀鹏. 陶尖底瓶的功能结构分析[J]. 考古, 2019(11).
- [25] 孙霄, 赵建刚. 半坡类型尖底瓶测试[J]. 文博, 1988(1).
- [26] 周衍勋, 苗润才. 对西安半坡遗址小口尖底瓶的考察[J]. 中国科技史, 1986(2): 48-50, 28.
- [27] 俞为洁. 酿造江南米酒的草薹[J]. 东方美食(学术版), 2003(4): 75-80.
- [28] 凌纯声. 中国酒之起源[C]//民族学研究所集刊. 台北: 民族研究所, 1958: 883-901.
- [29] 洪光住. 中国酿酒科技发展史[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2001.
- [30] Huang H. T. Biology and Biological Technology :Science and Civilisation in China : Vol 6[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2000.
- [31] 袁庭栋, 温少峰. 殷墟卜辞研究—科学技术篇[M]. 成都: 四川省社会科学院出版社, 1983.
- [32] 何弩. 郁鬯琐考[C]//考古学研究(十). 北京: 科学出版社, 2012: 244-254.
- [33] 凌纯声. 中国及东南亚的嚼酒文化[C]//民族学研究所集刊. 台北: 民族研究所, 1957(4): 1-23.
- [34] Hornsey, Ian S.. A History of Beer and Brewing[M]. Cambridge: The Royal Society of Chemistry, 2003.
- [35] 刘瑞赛, 安家彦, 董文勇, 王越. 利用计算流体力学技术分析啤酒发酵罐构型对温度和流动的影响[J]. 食品与发酵工业, 2016(42): 52-57.
- [36] Briggs, Dennis E., Boulton, Chris A., Brookes, Peter A., and Stevens, Roger. Brewing Science and Practice. Cambridge: CRC Press, 2004.
- [37] Delente, Jacques, Akin, Cavit, Krabbe, Erik, and Lanenburg, Kurt. Fluid Dynamics of Anaerobic Fermentation. biotechnology and Bioengineering, 1969: 631-646.
- [38] Wang Jiaping, Liu Li, Georgescu, Andreea Le, Vivienne V., Ota, Madeleine H., Tang Silu, and Vanderbilt, Mahiya. Identifying ancient beer brewing through starch analysis: A methodology[J]. Journal of Archaeological Science: 2017(15): 150-160.
- [39] Hutschenreuther, Antje, Watzke, Jörg, Schmidt, Simone, Büdel, Thomas, and Henry, Amanda G.. Archaeological Implications of the Digestion of Starches by Soil Bacteria: Interaction among Starches Leads to Differential Preservation. Journal of Archaeological Science: Reports, 2017(15): 95-108.
- [40] Henry, Amanda G., Hudson, Holly F., and Piperno, Dolores R., Changes in starch grain morphologies from cooking[J]. Journal of Archaeological Science, 2009(36): 915-922.
- [41] 葛威, 刘莉, 陈星灿, 金正耀. 食品加工过程中淀粉粒损伤的实验研究及在考古学中的应用[J]. 考古, 2010(7): 77-86.
- [42] Wang Jiaping, Liu Li, Ball Terry, Yu Linjie, Li Yuanqing, and Xing Fulai Revealing a 5,000-y-old beer recipe in China[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2016(23): 6444-6448.
- [43] 同[4]: 7-15.
- [44] 李兵, 张超, 王玉霞, 王娟, 蔡馨, 杨茂, 邢莲. 白酒大曲功能微生物与酶系研究进展[J]. 中国酿造, 2019(6): 7-12.
- [45] Jin Guangyun, Zhu Yang, and Xu Yan. Mystery behind Chinese liquor fermentation[J]. Trends in Food Science and Technology, 2017(63): 18-28.
- [46] 岑沛霖, 蔡谨. 工业微生物学[M]. 北京: 化学工业出版社, 2008.
- [47] Wayessa, Bula Sirika, Lyons, Diane, and Kooyman, Brian. Ethnoarchaeological Study of Brewing Technology in Wallaga Region of Western Oromia[J]. Ethiopia. Journal of African Archaeology 2015(1): 99-114.
- [48] McGovern, Patrick E.. Uncorking the Past: The Quest for Wine, Beer, and Other Alcoholic Beverages[M]. Berkeley and Los Angeles: University of California Press, 2009.
- [49] Samuel, Delwen Archaeology of ancient Egyptian beer[J]. Journal of the American Society of Brewing Chemists, 1996(54): 3-11.
- [50] 中国科学院考古研究所. 西安半坡[M]. 北京: 文物出版社, 1963.
- [51] Lamb, Jenna and Loy, Tom. Seeing red: the use of Congo Red dye to identify cooked and damaged starch grains

(下转 128 页)

- [8] 宫希成. 枞阳县井边东周采铜矿井调查 [J]. 东南文化, 1992(5): 89-90.
- [9] 魏明秀. 水锡石——一种可能的工业矿物 [J]. 地质地球化学, 1982(6): 55-56.
- [10] 江西省文物考古研究所铜岭遗址发掘队. 江西瑞昌铜岭商周矿冶遗址第一期发掘简报 [J]. 江西文物, 1990(3): 1-12.
- [11] 江西省文物工作队, 德安县博物馆. 江西德安石灰山商代遗址试掘 [J]. 东南文化, 1989(1): 13-25.
- [12] 江西省文物工作队, 九江市博物馆. 江西九江神墩遗址发掘简报 [J]. 江汉考古, 1987(4): 12-31.
- [13] 江西省文物考古研究所, 德安县博物馆. 江西德安县陈家墩遗址发掘简报 [J]. 南方文物, 1995(2): 30-49.
- [14] 江西省文物考古研究所, 德安县博物馆. 江西德安米粮铺遗址发掘简报 [J]. 南方文物, 1993(2): 1-18.
- [15] 江西省文物考古研究所, 樟树市博物馆. 吴城: 1973-2002年考古发掘报告 [M]. 北京: 科学出版社, 2005: 143-152.
- [16] 江西省地质局 916 大队. 江西德安曾家垅锡矿 [M]. 北京: 全国地质资料馆 72233 号, 1986.
- [17] 李星强. 景德镇西北部八字脑锡(钨)矿地质特征及成因初探 [J]. 资源环境与工程, 2007(3): 245-248.
- [18] 梅惠呈, 黄韶春, 刘九金. 江西云山复式岩体的地球化学特征及与锡成矿关系探讨 [J]. 华南地质与矿产, 2012(2): 100-105.
- [19] 江西省地质局区域地质测量大队. 江西九岭山钨锡钼矿群地质查评报告 [M]. 北京: 全国地质资料馆 23293 号, 1960.
- [20] 同 [16].
- [21] 肖细元, 陈同斌, 等. 中国主要含砷矿产资源的区域分布与砷污染问题 [J]. 地理研究, 2008(1): 201-212.
- [22] 安徽省地质局 321 队. 安徽铜陵天陂抱蛋山硫铁矿床评价报告 [M]. 北京: 全国地质资料馆 39315 号档案, 1964.
- [23] 董利军. 夏家店上层文化矿冶遗址的考察研究 [D]. 北京: 北京科技大学, 2012.
- [24] 梅建军. 中国早期冶金术研究的新进展 [C]//科技考古(第 3 辑). 北京: 科学出版社, 2011: 135-154.
- [25] 江西省地质局 916 大队. 江西省德安县曾家垅矿区锡矿勘探地质报告 [M]. 北京: 全国地质资料馆 64736 号档案, 1981.
- [26] 同 [16].

(责任编辑 杨歧黄)

(上接 122 页)

- in archaeological residues [J]. *Journal of Archaeological Science*, 2005(32): 1433-1440.
- [52] Liu Li, Ma Sai, and Cui Jianxin. Identification of starch granules using a two-step identification method [J]. *Journal of Archaeological Science*, 2014(52): 421-427.
- [53] Yang Xiaoyan and Perry, Linda. Identification of ancient starch grains from the tribe Triticeae in the North China Plain [J]. *Journal of Archaeological Science*, 2013(40): 3170-3177.
- [54] Wu Z. Y., Raven P. H., and Hong D. Y., etc. *Flora of China*. Vol. 19: Cucurbitaceae through Valerianaceae, with Annonaceae and Berberidaceae [M]. Beijing and St. Louis: Science Press and Missouri Botanical Garden Press, 2011.
- [55] 中国科学院西北植物研究所. 秦岭植物志: 种子植物 [M]. 北京: 科学出版社, 1981.
- [56] Wu Z. Y. and Raven P. H., etc. *Flora of China*. : Caryophyllaceae through Lardizabalaceae (Vol. 6) [M]. Beijing and St. Louis: Science Press and Missouri Botanical Garden Press, 2001.
- [57] 刘莉, 陈星灿, 赵昊. 河南孟津寨根、班沟出土裴李岗晚期石磨盘功能分析 [J]. 中原文物, 2013(5): 76-86.
- [58] 赵志军. 仰韶文化时期农耕生产的发展和农业社会的建立——鱼化寨遗址浮选结果的分析. 江汉考古, 2017(6): 98-108.
- [59] 赵志军. 渭河平原古代农业的发展与变化——华县东阳遗址出土植物遗存分析 [J]. 华夏考古, 2019(5): 70-84.
- [60] Piperno, Dolores R.. *Phytoliths: A Comprehensive Guide for Archaeologists and Paleoecologists* [M]. Lanham: Altamira Press, 2006.
- [61] St-Germain, Guy and Summerbell, Richard, *Identifying Fungi: A Clinical Laboratory Handbook* [M]. Belmont, CA: Star Publishing Company, 2011.
- [62] 何国庆, 贾英民, 丁立孝. 食品微生物学 [M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2017.
- [63] Bajnóczi, Bernadett and Kovacs-Kis, Viktoria. Origin of pedogenic needle-fiber calcite revealed by micromorphology and stable isotope composition—a case study of a Quaternary paleosol from Hungary [J]. *Chemie der Erde*, 2006(66): 203-212.
- [64] Verrecchia, Eric. Needle-fiber Calcite: A Critical Review and a Proposed Classification [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 1994. 64A: 650-664.
- [65] 刘莉. 早期陶器、煮粥、酿酒与社会复杂化的发展 [J]. 中原文物, 2017(2): 24-34.
- [66] 刘莉, 王佳静, 陈星灿, 李永强, 赵昊. 仰韶文化大房子与宴饮传统: 河南偃师灰嘴遗址 F1 地面和陶器残留物分析 [J]. 中原文物, 2018(1): 32-43.

(责任编辑 宋远茹)