

# 从平底瓶到尖底瓶——黄河中游新石器时期酿酒器的演化和酿酒方法的传承

刘莉<sup>1,2</sup> 王佳静<sup>2</sup> 邱楠<sup>3</sup>

1. 美国斯坦福大学东亚语言与文化系; 2. 美国斯坦福大学考古中心; 3. 陕西省考古研究院, 陕西 西安 710054

**Abstract:** According to previous typological analysis, *jiandiping*, the conical-base amphorae, of the Yangshao culture were developed from *pingdiping*, the flat-base amphorae, which were in turn derived from globular jars. Recent studies have proved that globular jars and conical-base amphora were brewing vessels, but it is unclear whether flat-base amphorae also had brewing functions. In order to answer this question, we carried out residue analysis on 20 flat-base and conical-base amphorae unearthed from the Lingkou site in Lintong, Shaanxi. We identified starch granules with characteristics of fermentation, phytoliths from cereal husks, as well as yeast cells, together suggesting that both types of pottery were brewing vessels. Ancient people used germinated broomcorn millet, rice and wild Triticeae seeds as a saccharifying agent to make alcoholic beverages; the main ingredients include millets, rice, wild Triticeae, wild pea, snake gourd root, foxnut and ginger. Some plant stems/leaves and inflorescences were also added, perhaps to utilize their medicinal properties. Using reed straws to sip alcohol may have been one of the ways to drink at that time. These results shed new light on the long tradition of alcohol production and consumption in the Neolithic Yellow River region.

**Keywords:** Lingkou site, Lingkou period, Yangshao culture, alcoholic beverage, brewing method, brewing vessel

**摘要:** 根据以往的类型学分析, 仰韶文化的小口尖底瓶是从小口平底瓶发展而来, 而后者的前身是小口鼓腹罐。近年来多项研究已经证明尖底瓶和鼓腹罐都是酒器, 但不清楚平底瓶是否也具有酿酒功能。为了回答这一问题, 我们对陕西临潼零口遗址出土的20件零口期平底瓶和半坡期尖底瓶陶片进行了残留物分析, 发现具有酿酒发酵特征的淀粉粒、谷物颖壳和植物茎叶及花序的植硅体, 以及酵母细胞, 证明这两种器物都是酒器。酿酒方法是以发芽的黍、稻谷和野生小麦族作为糖化剂来酿造谷芽酒; 最主要的原料是黍, 同时也包括粟、薏苡、水稻、小麦族、野豌豆、柘楼根、芡实及姜; 另外还加入一些植物茎叶及花序。加入植物块根、茎叶和花序的目的, 也许是利用其药用功能。使用芦苇吸管啜酒可能是当时饮酒的方法之一。零口陶器的分析结果有助于研究黄河中游地区新石器时代早、中期酒器器形的演化以及酿酒方法的传承。

**关键词:** 零口遗址; 零口期文化; 仰韶文化; 谷芽酒; 酿酒方法; 酒器

## 一 前言

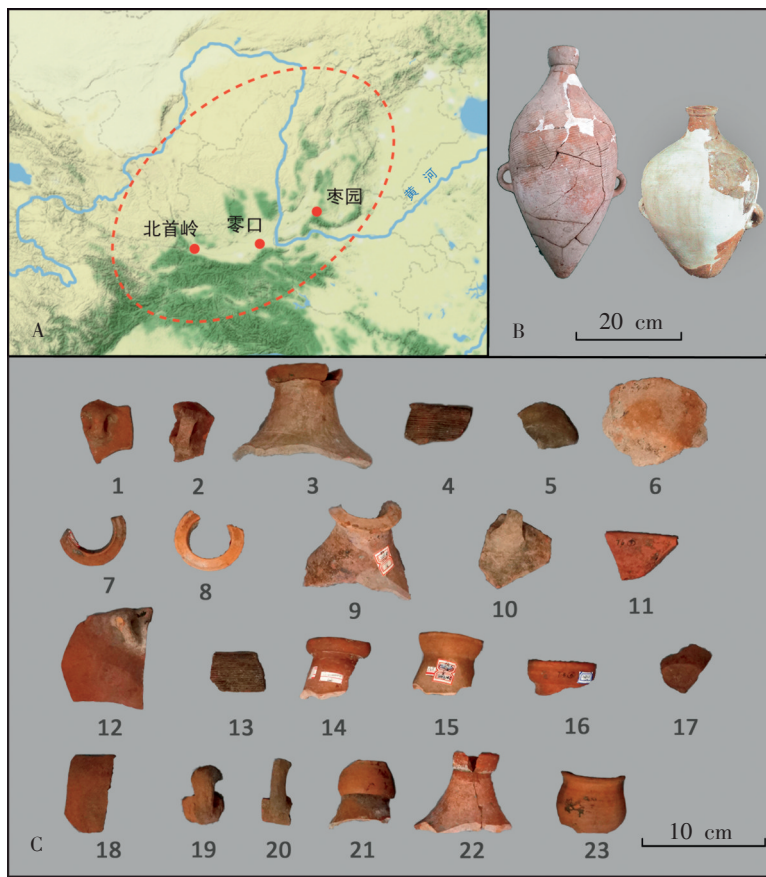
近年来, 利用科学方法分析陶器残留物的研

究证明, 在中国北方利用谷物酿酒的历史可追溯至9000~7000千年前的裴李岗和白家(或老官台)文化时期。经过分析的陶器来自河南舞阳贾湖和陕西临潼零口及宝鸡关桃园。这一时期人们

利用小口鼓腹罐酿酒，主要酿酒原料为黍和稻，并掺入一些块根植物、水果和蜂蜜<sup>[1]</sup>。酿酒方法包括两种，一种是利用发芽谷物酿造的谷芽酒（零口遗址），另一种是利用发霉谷物及某些禾本科植物茎叶制麴而酿造的麴酒（关桃园遗址）<sup>[2]</sup>。这些研究还证明，仰韶文化时期（约距今7000~4700年）普遍存在的尖底瓶也是酒器<sup>[3]</sup>。它们不仅用来酿酒和储酒，也用来饮酒<sup>[4]</sup>。仰韶文化的酿酒方法也包括谷芽酒和麴酒两种<sup>[5]</sup>。

小口鼓腹罐普遍发现于中国黄河流域和长江流域的新石器早期遗址中，但小口尖底瓶是仰韶文化的代表性器物，基本分布在黄河中上游。这两种器物有相似之处，均为小口；但整体器形有显著差别，除了器底形状的区别以外，平底瓶比较宽矮，而尖底瓶比较瘦高。对于尖底瓶的来源问题，以往的研究主要根据陶器形态的演变进行分析，认为仰韶文化半坡类型的小口尖底瓶来源于之前的小口平底瓶，而后者的祖源为前仰韶时期的小口鼓腹罐。以小口平底瓶为特征，早于仰韶文化半坡类型的遗址主要分布在陕西的渭水流域及山西南部地区<sup>[6]</sup>。资料发表比较详细的有关遗址包括山西翼城枣园<sup>[7]</sup>、陕西宝鸡北首岭<sup>[8]</sup>和临潼零口<sup>[9]</sup>。（图一）

如果小口平底瓶是从鼓腹罐到尖底瓶的过渡形态，它们是否也具有酿酒功能则是一个很重要的问题。因此，若要研究史前时期酿酒方法的发展过程，对平底瓶使用功能的了解十分关键。零口遗址主要包括有明确地层关系的三个时期新石器文化遗存：白家期、零口期和半坡期，距今7900~5700年；其中零口期为距今7130~6500年，半坡期为距今6500~5700年。在陶器群中，白家期有小口鼓腹罐，零口期有小口平底瓶，半



图一 主要遗址位置及本文分析的陶器

A. 出土小口平底瓶的主要遗址及仰韶文化分布大致范围（虚线圆圈）；  
B. 零口遗址出土小口平底瓶（右）与姜寨遗址出土仰韶早期小口尖底瓶（左）比较；  
C. 本文分析的零口遗址出土的小口平底瓶和尖底瓶陶片：1-18为零口期，19-23为半坡期，4和13为控制标本。

坡期出现小口尖底瓶<sup>[10]</sup>。零口期小口平底瓶的个体数量为166（占陶器个体总数3.06%）。小口平底瓶底部的变化规律为：器壁由薄向厚发展（0.4~1.6厘米）；底部直径由中向大、再由大向小发展（12~4.3厘米）；似乎具有最终发展为尖底瓶的趋势<sup>[11]</sup>。鉴于零口遗址具有与文化类型相应的三种陶器器形的发展序列，以及较多的平底瓶数量，我们对该遗址的上述三种器形的陶器进行了系统采样及残留物分析。其中有关该遗址白家期陶器的研究结果已经发表<sup>[12]</sup>，本文主要分析零口期和半坡期的陶器残留物。

## 二 研究方法：残留物标本采集与分析

零口遗址位于西安市临潼区零口镇东北的零

表一 零口陶器标本记录

	标本号	器物号	器型	期别	陶质	备注
1	LK7	T14(8)	瓶腹	零口	泥制红陶	
2	LK8	T6(8)	瓶腹	零口	泥制红陶	
3	LK9	T13(7)b:29	瓶口沿	零口	泥制红陶	
4	LK10	T14(7)b	罐口沿	零口	夹砂红陶	控制标本
5	LK11	T14(7)b	瓶底	零口	泥制红陶	
6	LK12	T14(7)a	瓶底	零口	泥制红陶	
7	LK13	T14(7)a	瓶口沿	零口	泥制红陶	
8	LK14	T14(7)a:16	瓶口沿	零口	泥制红陶	
9	LK15	T6(7):27	瓶口沿	零口	泥制红陶	
10	LK16	T6(7)	瓶腹部	零口	泥制红陶	
11	LK17	T6(7)	瓶腹部	零口	泥制红陶	
12	LK18	T6(7)	瓶腹部	零口	泥制红陶	
13	LK19	T6(7)	罐口沿	零口	夹砂褐陶	控制标本
14	LK20	T6(6):42	瓶口沿	零口	泥制红陶	
15	LK21	T6(6)b:45	瓶口沿	零口	泥制红陶	
16	LK22	T13(6)	瓶口沿	零口	泥制红陶	
17	LK23	T15(5)	瓶底部	零口	泥制红陶	
18	LK24	T6(5)	瓶底部	零口	泥制红陶	
19	LK25	T6(4)	瓶腹部	半坡	泥制红陶	
20	LK26	T6(4)	瓶腹部	半坡	泥制红陶	
21	LK27	T13(3)	瓶口沿	半坡	泥制红陶	
22	LK28	T3(3)a:7	瓶口沿	半坡	泥制红陶	
23	LK29	T5(3)a	瓶口沿	半坡	泥制红陶	

注：器物号的括号中数字代表地层；5-8层为零口期，3-4层为半坡期

河两岸，东北距离白家遗址约8公里，西南距姜寨遗址约19公里。遗址发掘于1994年—1995年，发掘后陶器标本保存在陕西省考古研究院泾渭基地。我们于2017年对陶器标本进行残留物提取工作，所选标本全部是没有经过复原，但可以辨明器形的陶片，包括口沿、器底和带耳的器身部分。共18件零口期和5件半坡期标本。（表一，图一）

为了尽可能获取足够的残留物，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。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）对小型陶片使用超声波清洗仪震荡3分钟，对大型陶片使用超声波牙刷清洗3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可见固体残留物；（3）在实验室通过EDTA（Na<sub>2</sub>EDTA·2H<sub>2</sub>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）对部分器物的残留物中一小部分进行染色，以判断是否存在糊化淀粉粒<sup>[13]</sup>；（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。

为了解陶器表面残留物的性质，我们根据残留物中是否存在与酿酒过程有特殊关系的微植物和微生物遗存，来判断陶器是否曾经接触过酒液。谷物酿酒包括两个过程：第一是糖化，通过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。在中国古代利用富含淀粉植物（包括谷物和块根植物）酿酒的主要方法有两种。第一种为谷芽酒，首先将谷物发芽使酶得以活化，然后加热水糖化（65~70℃），再利用酵母发酵。用来糖化的容器一般为大口，便于将酿酒原料放入和取出；但用来发酵的容器一般为小口，便于封口，其目的是为了创造容器内的厌氧环境。这是因为只有在厌氧的环境中酵母才能将糖转化为酒精和二氧化碳，而在有氧环境只能得到水和二氧化碳<sup>[14]</sup>。西安米家崖遗址中两个仰韶文化晚期窖藏中各出土一组具有酿酒功能的陶器，包括大口罐、小口尖底瓶和漏斗。残留物分析证明，大口缸是用来糖化，小口尖底瓶用来发酵，利用漏斗可将糖化的醪液注入小口尖底瓶中<sup>[15]</sup>。当然酿造谷芽酒也可以只用一件小口陶罐，见于陕北榆林地区民间酿造小米浑酒的方法<sup>[16]</sup>。第二种为麴酒，首先使用发霉谷物制麴，有时加入植物茎叶，称为草麴；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，糖化和发酵在一个容器中同时进行，类似黄酒酿造。现代酿造黄酒使用大口陶缸发酵，过滤后储存在小口酒坛中。但用缸酿酒

的记载多见于元明清时期,而更早期是用瓮。根据北魏贾思勰所著《齐民要术》记载,粟米酒法为:“饭欲熟时,预前作泥置瓮边,饬熟即举甗,就瓮下之。速以酒耙,就瓮中搅作三两遍。即以盆合瓮口,泥密封,勿令漏气,看有裂处更泥封。”<sup>[17]</sup>可见北魏时酿酒发酵用的是可以盖盆,并以泥封口的小口瓮。因此,上古时期无论酿造谷芽酒还是麴酒,在发酵阶段可能都用小口陶器。

这两种酿酒方法会在酿酒器上留下不同的残留物组合:如果陶器盛装的是谷芽酒,那么谷物的颖壳以及具有发酵特征(糖化和糊化)的淀粉粒有可能保存在器物内壁上<sup>[18]</sup>;对颖壳植硅体和淀粉粒的种属鉴定有助于了解酿酒的植物种类。这一方法已经运用在鉴定仰韶中晚期尖底瓶残留物的研究中<sup>[19]</sup>。如果陶器盛装的是麴酒,那么与酒麴有关的霉菌及具有发酵特征的淀粉粒可能会保留在残留物中。利用霉菌酿造麴酒的最早证据来自陕西宝鸡关桃园遗址的新石器早期(前仰韶时期)的小口鼓腹罐和漏器上,年代接近距今8000年,霉菌的形态与曲霉和根霉相似<sup>[20]</sup>。在河南渑池丁村遗址仰韶中期的尖底瓶上也发现与酿酒有关的霉菌,经鉴定为曲霉和毛霉<sup>[21]</sup>。这几种霉菌都出现在传统酒麴中<sup>[22]</sup>。另外,酵母的存在也是非常重要的酿酒证据<sup>[23]</sup>。

总之,陶器残留物中是否存在一组与食物发酵有关的微植物和微生物遗存,以及其组合特征,是我们用来判断是否为酿酒器具并分析酿酒方法的重要证据。这种组合不存在于土壤中或与酒无关的器物上,因此,发掘地层的土壤或非酒器表面的残留物可以作为控制标本,用来检验假设的酒器标本的残留物是否与酿酒有关。由于无法得到发掘地层的土壤标本,我们提取了两件夹砂罐(LK10,19)上的残留物作为控制标本。分析结果表明,两个控制标本中都有大量炭屑,但只有极少量的植硅体(n=2,5)和淀粉粒(n=1,1),数量远远低于平底瓶和尖底瓶的残留物标本。(表二,表三)因此,可以确定后者的残留物基本不是来自周围环境的污染,而大部分应

与器物的使用功能有关。

### 三 分析结果

经分析,残留物标本中发现有较多淀粉粒和植硅体,少量的酵母细胞,但没有发现明确与酿酒有关的霉菌。以下,我们对残留物结果进行详细描述。

#### 1. 淀粉粒分析

20件陶器标本的残留物中共发现653颗淀粉粒,其中382颗(58.5%)可以鉴定为9种类型。有271颗(比例41.5%)淀粉粒缺少鉴定特征或损伤严重,归为无法鉴定类。另外,442颗淀粉粒(67.7%)显示有损伤特征,包括三种类型。(1)由于淀粉酶分解而出现的损伤(n=286;比例43.8%),如部分缺失、中心凹陷、出现裂痕及微型凹坑、十字消光模糊等。(图二:1)(2)由于淀粉酶分解以及糖化时加热的综合作用造成的糊化损伤(n=120;比例18.4%),如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,有些具有膨胀变形的糊化特征,消光十字模糊或消失等(图二:10);这些都可以在现代酿酒标本中找到。(图三:9)(3)由于蒸煮造成的糊化损伤(n=36;比例5.5%),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。(图二:11)这些损伤特征也出现在谷物酿酒实验的淀粉粒中<sup>[24]</sup>。(图三:10、11)我们对两个标本进行刚果红染色,观察到一些淀粉粒在明场镜下呈红色,在偏振光镜下显示为橙红色光泽,是淀粉粒经过蒸煮产生的特征<sup>[25]</sup>;因此证实了糊化淀粉粒的存在。(图二:12)

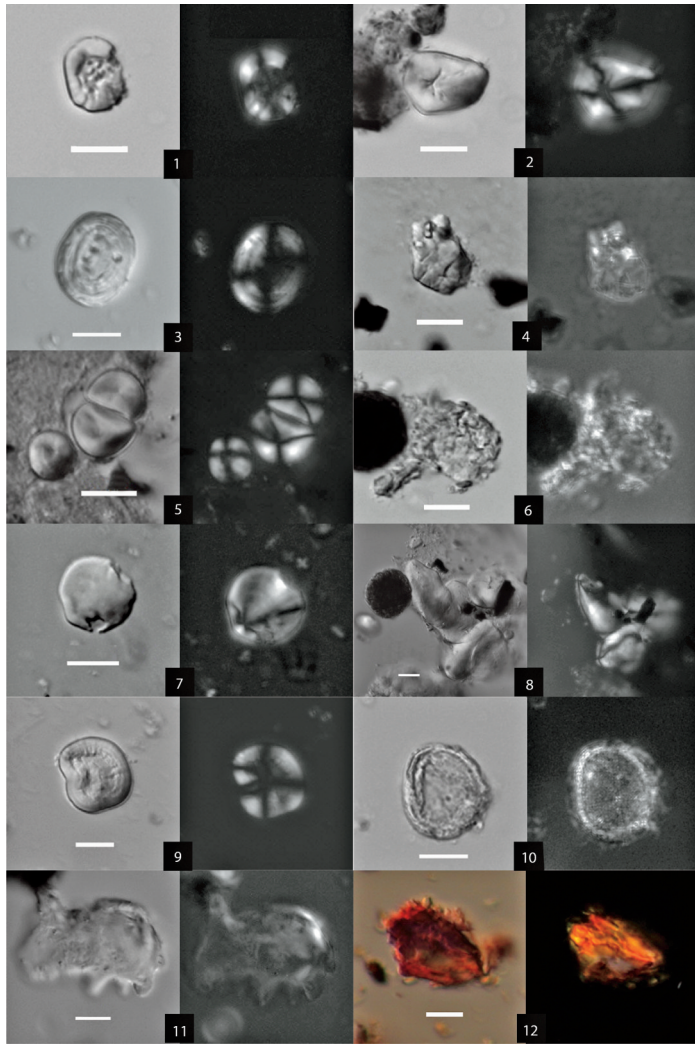
I型为黍亚科(Panicoideae),其中可能包括粟(*Setaria italica*)、黍(*Panicum miliaceum*)及薏苡中的小型淀粉粒(*Coix lacryma-jobi* L.)(n=132;比例20.2%;出现率95%),粒长5.37~22.79微米,为多边体或近圆形,脐点居中,多有裂隙。(图二:1)这三种谷物的淀粉粒有很多相似的特征,较难区分<sup>[26]</sup>,在此归为一类。其损伤特征具有明显的糖化发酵形态,如微型凹坑、深

表二 零口陶器残留物中的淀粉粒和酵母记录 (LK7-24为零口期, LK25-29为半坡期)

标本	I型 黍亚科	II型 薏苡	III型 小麦族	IV型 水稻	V型 栝楼根	IV型 芡实	VII型 百合	VIII型 姜	IX型 豆	块根	无法 鉴定	合计	酶 破坏	发酵 糊化	蒸煮 糊化	酵母
LK7	6	10	18							2	4	40	24	2	3	
LK8	8		2		9					2	16	37	17	4		3
LK9	36	1	11		6	1	5			8	52	120	60	23	1	6
LK11	10	4	20	3	7						18	62	28	8	1	
LK12	2							1		2	12	17	7	7	2	17
LK13	4		2								18	24	5	13		1
LK14	5		8	3					3	6	9	34	10			
LK15										2	4	6			4	
LK16	5		4	10						5	13	37	15	1	12	1
LK18	1			1		1				2	12	17	5	6	1	4
LK20	5			20		2					9	36	5	15		3
LK21	5	1	4							1	16	27	20	4	1	1
LK22	2									2	5	9	5	1	2	
LK23	1		1							1	4	7	4	1		
LK24	2			6	1			1			11	21	7	2		
零口期 合计N	92	16	70	43	23	4	5	2	3	33	203	494	212	87	27	36
零口期 百分比%	18.6	3.2	14.2	8.7	4.7	0.8	1	0.4	0.6	6.7	41.1	100	42.9	17.6	5.5	
零口期 出现率N	14	4	9	6	4	3	1	2	1	12	15	15	14	13	10	8
零口期 出现率%	93.3	26.7	60	40	26.7	20	6.7	13.3	6.7	80	100	100	93.3	86.7	66.7	53.3
LK25	4	1		15			3		1		9	33	12	2		
LK26	10		3							2	30	45	16	10	3	
LK27	2		1							1	6	10	7		3	6
LK28	20			5	7	3				4	13	52	21	17	2	6
LK29	4				4				1		10	19	13	4	1	
半坡期 合计N	40	1	4	20	11	3	3		2	7	68	159	74	33	9	12
半坡期 百分比%	25.2	0.6	2.5	12.6	6.9	1.9	1.9		1.3	4.4	42.8	100	46.5	20.8	5.7	
半坡期 出现率N	5	1	2	2	2	1	1		2	3	5	5	5	4	4	2
半坡期 出现率%	100	20	40	40	40	20	20		40	60	100	100	100	80	80	40
总计N	132	17	74	63	34	7	8	2	5	40	271	653	286	120	36	48
总计%	20.2	2.6	11.3	9.6	5.2	1.1	1.2	0.3	0.8	6.1	41.5	100	43.8	18.4	5.5	
总计 出现率N	19	5	11	8	6	4	2	2	3	15	20	20	19	17	14	10
总计出现 率%	95	25	55	40	30	20	10	10	15	75	100	100	95	85	70	50
最小长度	5.37	8.82	13.72	3.33	4.79	12.33	13.34	14.84	13.38	6.06	3.89					3.45
最大长度	22.79	24.84	35.43	8.86	29.56	17.73	40.74	31	28.22	40.75	49.67					11.29
平均长度	11.96	16.37	21.92	5.29	13.97	15.49	28.12	22.92	20.53	13.05	12.06					7.05

表三 零口陶器陶器残留物中植硅体记录

植硅体形态型	植硅体可能来源	零口期标本												半坡期标本					合计	百分比%	出现率%								
		7	8	9	11	12	13	14	15	16	18	20	21	22	23	24	25	26				27	28	29					
<i>硅化骨架Silica skeletons</i>																													
η型	黍颖壳		6		2	2	17	16	9	10	2	24	6	4	24	1	53	8	5								189	14.35	80
未确定黍族硅化骨架 Undetermined paniceae	黍族颖壳	5	8	13	6	1	19	33	12	29	12	24	15	5	56	135	18	9	1	1	135	537	40.77	100					
长方形绞合状树枝型 El. dendriform	早熟禾亚科颖壳																	1									1	0.08	5
长方形粉刺纹饰型 Elongate echinate	禾本科		1				1	3	1																		6	0.46	20
长方形圆齿状纹饰型 Elongate crenate	禾本科			2			1		1	1		1				8					1	1					16	1.21	40
长方形柱状纹饰 Elongate columellate	禾本科				3			2		3	3	1															12	0.91	25
长方形光滑状/曲波状纹饰 Elongate psilate/sinuate	禾本科 主要为茎叶		9	3	2	2	10	5		7	7	15	4	1		5	8	17	1	4	1	101	7.67	85					
长方形不规则纹饰 Elongate irregular	禾本科		3	1	4	3	12	1				1				11											36	2.73	40
不透明穿孔片状 Opaque perforated platelets	菊科花序		1				4			7	8	6		3		2										1	32	2.43	40
气孔细胞片状 Stoma sheet								1																			1	0.08	5
未鉴定硅化骨架 Undetermined multi-cell						1			2	5		3	2			1		10	1	1							26	1.97	45
<i>单细胞植硅体Single-cell phytolith</i>																													
双峰型Double-peak	水稻颖壳	1	2				1	1			2	10					1	2									20	1.52	40
稻亚科哑横排铃型 Scooped bilobate parallel	稻亚科							1																			1	0.08	5
芦苇盾型 Phragmites bulliform	芦苇属	1						1																			2	0.15	10
哑铃型Bilobate	黍亚科		1		6	1	4	6		1	5	5		1			2				1	33	2.51	55					
多铃型Polylobate	黍亚科			2														1				3	0.23	10					
十字型 Cross/quadra-lobate	黍亚科			7				9									1	2				19	1.44	20					
帽型Rondel	禾本科	2	2	4	4		3	4	1			1	1		3	1	6		1		1	34	2.58	70					
扇型 Common bulliform	禾本科叶表皮 机动细胞	4		2	1			1			2	1		1	6	2	3				1	24	1.82	55					
长方形树枝型 El dendriform	早熟禾 亚科颖壳						1		1		3	1							1			7	0.53	25					
光滑状/曲波状棒型 El psilate/sinuate	禾本科 主要为茎叶	7	6	8	3		8	28	3	8	16	13	1	5	31	7	9	4	1	2	7	167	12.68	95					
尖形Trichome						1	1			1		1	11	5	1							22	1.67	40					
毛细胞Hair cell	真双子叶植物	3	2	2		3		2	1	1	4	2		1		2	2	2				27	2.05	65					
气孔细胞Stoma						1																1	0.08	5					
植硅体合计		23	41	44	31	15	82	114	31	73	64	109	29	22	150	161	104	56	12	9	147	1317	100						



图二 零口陶器上的淀粉粒类型及损伤特征

1. I型, 黍亚科 2. II型, 薏苡 3. III型, 小麦族 4. IV型, 水稻 5. V型, 栝楼根 6. VI型, 芡实 7. VII型, 姜 8. VIII型, 百合 9. IX型, 野豌豆 10. 具有发酵糊化特征的淀粉粒 11. 具有蒸煮糊化特征的淀粉粒 12. 经刚果红染色的糊化淀粉粒

注: 1、3、7、9, 淀粉粒表面显示中心凹陷、深沟、微型凹坑, 部分缺失, 4、6, 消光十字消失, 为淀粉酶分解而出现的损伤。(标尺: 10微米; 每组照片左为DIC, 右为偏振光影像。)

沟、中部凹陷等, 可与现代标本对照。(图三: 1)

II型为薏苡 (*C. lacryma-jobi* L.) (n=17; 比例 2.6%; 出现率 25%), 粒长为 8.82~24.84 微米。(图二: 2) 其形态具有某些不同于粟黍的特征, 如粒形较大、脐点偏心、消光十字臂呈“Z”形曲折状<sup>[27]</sup>。其损伤特征与I型类似。

III型为小麦族 (Triticeae) (n=74; 比例 11.3%; 出现率 55%), 粒长 13.72~35.43 微米, 粒形为透镜体, 脐点居中, 消光十字臂呈“+”

或“X”形。(图二: 4) 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。许多颗粒表面有发酵损伤特征, 与现代酿酒标本中栽培和野生小麦族淀粉粒的损伤形态相似。(图三: 2, 9)

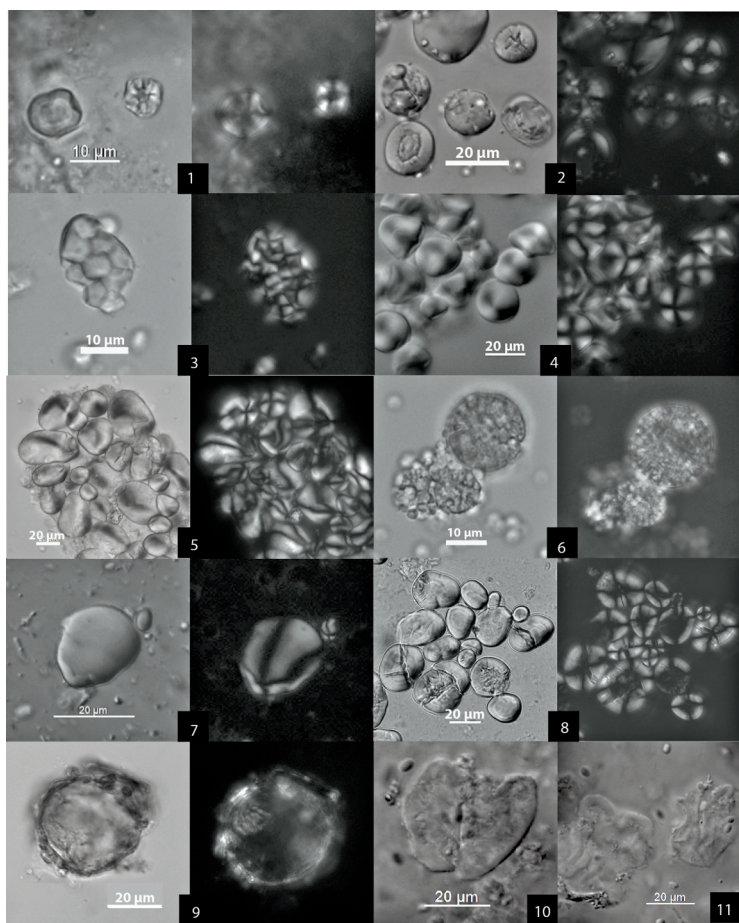
IV型为稻谷 (*Oryza* sp.) (n=63; 比例 9.6%; 出现率 40%), 粒长 3.33~8.86 微米, 粒形为多边形, 多以复粒组合形态出现 (图二: 4), 可与现代稻米标本对照。(图三: 3)

V型为栝楼根 (*Trichosanthes kirilowii*) (n=34; 比例 5.2%; 出现率 30%), 粒长 4.79~29.56 微米, 粒形为圆形、钟形、半圆形等, 脐点居中或偏心, 消光十字臂弯曲或垂直。以单粒或复粒形态出现 (图二: 5); 这些特征都可以在现代栝楼根标本中找到。(图三: 4)

VI型为芡实 (*Euryale ferox*) (n=7; 比例 1.1%; 出现率 20%), 为复粒聚合体, 总体呈圆形或椭圆形 (长度 12.33~17.73 微米), 内含大量小形多边形颗粒。由于粒形极小, 很难辨清每一粒的形状, 我们只测量到 38 颗淀粉粒的长度 (1.78~4.13 微米)。(图二: 6) 这些特征都与我们标本库中的芡实淀粉粒相似 (聚合体长度 9.51~32.33 微米; 单粒淀粉粒长度 1.71~3.96 微米)。(图三: 6) 在古代标本中, 如果不是以聚合体形态出现, 一般

很难发现或鉴定如此小的单粒淀粉粒。由于每一个复粒聚合体中都有大量小形淀粉粒, 因此我们对芡实淀粉粒的统计是根据圆形聚合体的数量, 而不是单粒淀粉粒的数量。

VII型为百合 (*Lilium* sp.) (n=8; 比例 1.2%; 出现率 10%), 粒长 13.34~40.74 微米, 粒形为椭圆形, 脐点偏心, 消光十字臂弯曲。其中包括一个淀粉粒群组。(图二: 7) 其特征与我们现代酿酒标本中的山丹百合 (*Lilium tigrinum*) 的



图三 现代淀粉粒对比标本

1. 黍(发芽) 2. 大麦(发芽) 3. 稻米 4. 桔楼根 5. 百合(发酵) 6. 芡实 7. 生姜 8. 野豌豆 9. 糖化损伤的野生小麦族(披碱草 *Elymus* sp.) 淀粉粒 10、11. 蒸煮损伤的淀粉粒

聚合形态类似。(图三: 5) 零口遗址中发现有百合(*Lilium*) 孢粉<sup>[28]</sup>, 可为佐证。

VIII型可能为生姜(*Zingiber officinale*) (n=2; 比例0.3%; 出现率10%), 粒长14.84~31微米, 粒形为椭圆形, 脐点极度偏心, 在脐点一边的淀粉粒边缘处有浅浮雕状突起(图二: 8), 为姜属淀粉粒的特点<sup>[29]</sup>。现代生姜淀粉粒有近椭圆形及扇形(粒长8.49~40.31微米), 包括与VI型淀粉粒十分相似的粒形。(图三: 7)

IX型为豆类, 可能为野豌豆(*Vicia* sp.) (n=5; 比例0.8%; 出现率15%) 粒长13.38~28.22微米。粒形为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。(图二: 9) 这些特征与现代野豌豆淀粉粒类似。(图三: 8) 秦岭地区有17种野豌豆。《诗经》中有反映渭

水流域周人生活的《小雅·采薇》, 其中“薇”被鉴定为大野豌豆(*Vicia gigantea* Bunge)<sup>[30]</sup>。

另外, 有些淀粉粒具有一般块根植物的特征(n=40; 比例6.1%; 出现率75%), 粒长6.06~40.75微米, 粒形为圆形、椭圆形或钟形, 脐点居中或较偏心, 十字消光臂垂直或弯曲。这些淀粉粒可能包括不同种属的块根植物, 但无法进行更准确的鉴定。

总之, 所有陶器标本中都发现有淀粉粒, 主要为黍亚科(粟黍、薏苡; 占总数22.8%, 出现率95%)及小麦族和稻米, 另外还有块根植物(包括桔楼根、百合、芡实和姜), 以及野豌豆。超过65%的淀粉粒具有发酵损伤特征, 证明这些植物是酿酒原料。

## 2. 植硅体分析

残留物中共发现1317个植硅体。每件标本中都有黍族颖壳的植硅体(n=726; 55.1%), 其中能够鉴定到属一级的颖壳均为黍的η型(n=189; 14.35%)。因此, 我们推测残留物中的黍族颖壳大多也来源于黍。哑铃型、

多铃型、十字型等一些黍亚科中常见的植硅体主要出现于13件标本中(n=51; 3.87%), 大部分可能来源于黍; 其中少量十字型植硅体的宽度和长度超过18微米, 不见于粟黍, 可能来自薏苡的内稃和外稃<sup>[31]</sup>。6件标本中有树枝型植硅体(n=8; 0.61%), 可能来自早熟禾亚科的颖壳; 对照残留物中有较多的小麦族淀粉粒, 推测这些颖壳可能来自野生小麦族。另外, 8件标本中发现水稻颖壳双峰型(n=20; 1.52%), 1件标本中有稻亚科横排哑铃型(n=1; 0.08%), 后者可能也来自水稻。还有较多禾本科中常见的棒型、扇型和帽型(n=233; 17.69%), 出现在绝大多数标本中(n=19); 其中2个标本中有来自芦苇茎叶的盾型(n=2)。毛细胞出现在13个标本中(n=27; 2.05%), 主要来自于菊科(Asteraceae)、榆科



(Ulmaceae)、葫芦科 (Cucurbitaceae)、荨麻科 (Urticaceae) 等植物<sup>[32]</sup>。值得注意的是, 淀粉粒中有属于葫芦科的栝楼根。同时来自菊科花序的不透明穿孔片状<sup>[33]</sup>植硅体出现在7件标本中 (n=32; 2.43%), 遗址中也发现有较多的菊科孢粉 (n=116)<sup>[34]</sup>; 因此植硅体标本中的毛细胞中是否有来自栝楼和菊科植物, 需要将来做进一步分析。

我们对部分树枝型植硅体进行了形态测量学分析 (具体步骤见 Ball *et. al* 2017<sup>[35]</sup>), 分析样本包括54个波浪形结构纹饰。分析结果显示, 假设所有的树枝型植硅体来源于同一种植物, 那么其测量数据符合四种植物, 即野生二粒小麦 (*Triticum dicoccoides*), 小麦 (*Triticum aestivum*), 黑麦 (*Secale Cereale*) 和蒙古冰草 (*Agropyron mongolicum*)。前三种植物为西亚品种, 其中野生二粒小麦不见于中国, 栽培小麦和黑麦传到中国的时间较晚, 它们出现在零口遗址史前遗存中的几率甚微; 因此我们推测零口遗址零口期和半坡期的树枝型植硅体最有可能来源于野生蒙古冰草。由于标本数量少, 这一推测还有待于将来进一步验证。

总之, 植硅体残留物中有大量黍及黍族颖壳, 少量水稻和小麦族颖壳, 并与禾本科的多种植物茎叶及花序植硅体共存。(图四)

### 3. 酵母

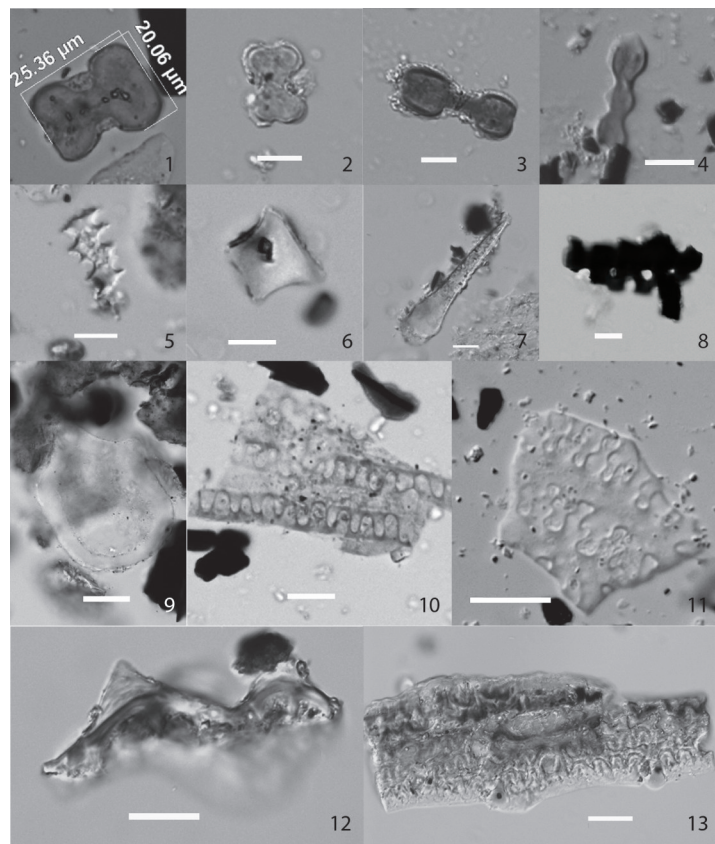
在7件标本上发现20个类似酵母细胞的颗粒。根据形态可分为两类: 第一类为圆形或椭圆形 (n=18; 直径3.45~11.29微米), 其中有三个个体为芽殖状态, 表现为母细胞上附着有子细胞, 有些为小型凸起状的芽体, 有些为小圆形, 显示了酵母细胞繁殖和生长的过程。其形态类似于现代标本中的酿酒酵母 (*Saccharomyces cerevisiae*)。第二类为长条形 (n=2; 长度9.64~10.81微米), 形态与库德里阿兹威毕赤酵母 (*Pichia kudriavzevii*) 最为接近 (图五: 1-4)。我们的现代标本中有一例陕西榆林石峁农民自制的小米浑酒, 使用

玉米发芽, 加入蒸熟的黄米 (黍) 面粉, 利用天然酵母酿造而成。在这个标本中, 测试到了酿酒酵母和库德里阿兹威毕赤酵母的基因序列<sup>[36]</sup>。在现代大麴中, 酿酒酵母和毕赤酵母也经常出现<sup>[37]</sup>。零口陶器上的酵母细胞与石峁浑酒中两种酵母的形态十分接近 (图五: 5, 6), 但是由于无法对零口陶器残留物进行基因测试, 我们只能推测这些古代酵母细胞可能属于野生酿酒酵母和毕赤酵母。

## 三 讨论

综合以上三种分析方法所得结果, 可以观察到以下现象。

1. 所有20件标本中都发现有淀粉粒, 2~120



图四 零口陶器植硅体举例

1. 薏苡十字型
2. 十字型
3. 哑铃型
4. 多铃型
5. 长方形树枝型
6. 帽型
7. 毛细胞
8. 不透明穿孔片状
9. 芦苇盾型
10. 黍族长方形柱状型
11. 黍颖壳η型
12. 水稻颖壳双峰型
13. 长方形绞合状树枝型硅化骨架

(标尺2-8、10: 10微米; 9、11-13: 20微米)

颗不等。影响残留物中淀粉粒数量的因素有多种,如陶器使用时间的长短、陶器在遗址中的埋藏环境、所分析陶片的大小及其在陶器上的部位、发掘后清洗陶片的力度、陶器出土后保存的时间长短等。这些因素中的大部分都是我们无法了解和控制的,但可以肯定的是,淀粉粒遗存在这些陶器标本中的普遍存在,反映了器物内曾经盛装过多种富含淀粉的植物。淀粉粒中大多数显示出发酵造成的损伤特征(65%以上),这种情况不见于控制标本。结合标本中酵母细胞的存在,可以证明这些零口期的平底瓶和半坡期的尖底瓶曾经用来酿酒。

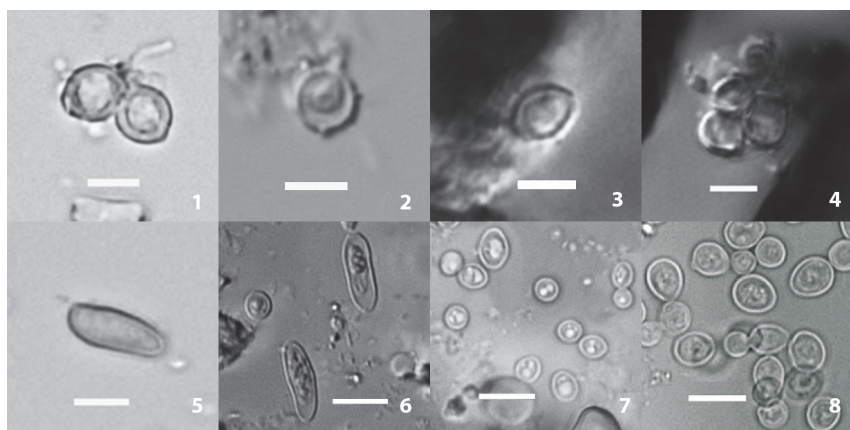
2. 在有些情况下,淀粉粒所属植物类型与植硅体类型可以相互印证。例如,淀粉粒遗存中黍亚科(I型)的数量比例和出现率最高(20.2%; 95%),与之相应,植硅体中黍族颖壳(主要为黍)的数量比例和出现率也最高(55.1%; 100%)。由于植硅体中能够具体鉴定到种一级的黍族颖壳全部来自黍,因此,黍亚科淀粉粒可能大部分也来自黍,但也不能排除有粟的可能性。稻米的淀粉粒及稻颖壳双峰型植硅体出现率都较高,均为40%。又如,小麦族的淀粉粒的比例和出现率都较高(11.3%; 55%),植硅体中也有8例早熟禾亚科的颖壳(出现率30%)。另外,淀粉粒中有意苡,植硅体中也有意苡特有的十字型。

3. 在另一些情况下,淀粉粒类型和植硅体类型不能完全相互印证。例如,黍亚科淀粉粒中可能有粟,但粟颖壳植硅体缺失。这也许因为粟是在脱壳之后用作酿酒原料。

4. 残留物中不见常用于制麴的霉菌,但有大量谷物颖壳植硅体,说明酿酒方法不是麴酒,而是谷芽酒。黍、稻和野生小麦族淀粉粒与颖壳植硅体共存的现象,说明这几种谷物可能是用来发芽,提供糖化所需的酶。虽然残留物中可能来自小麦族颖壳(长方形树枝型)的植硅体并不丰富,但野生小麦族颖壳中有很多其他形制、无具体种属特征的植硅体;也许这是造成残留物中长方形树枝型植硅体出现率低于小麦族淀粉粒的原因。利用稻谷发芽进行糖化的方法不见于中国现代酿酒技术,但根据日本学者的研究,日本古代文献及近代泰国民间都有利用发芽水稻酿酒的记录,同时他们也成功进行了使用发芽水稻糖化的酿酒实验<sup>[38]</sup>。

5. 综合淀粉粒和植硅体的类型可以推测,最主要的酿酒原料可能是黍,同时也包括粟、薏苡、水稻、野生小麦族、野豌豆、栝楼根、芡实及姜。虽然我们无法根据淀粉粒和植硅体的数量比例直接推算酿酒原料的比例,但大致可以根据出现率推测各种谷物占主要地位,而豆类和块根类较少。另外,植硅体中有较多植物茎叶及菊科

花序,应该也是酿酒原料。薏苡、栝楼根、芡实和姜都用于传统中药;多部古代文献中也提到,在酿酒过程中加入多种其他植物,可制作药酒。例如,北魏《齐民要术》中提到加入桑叶、艾叶、茱萸、蓼叶、姜等植物制作药酒。零口酿酒陶器残留物中的块根淀粉粒、植物茎叶和花序植硅体的存在,也许反映了人们加入这些植物而使酒具有药用功能,但目前还很难根据植硅体类型



图五 零口陶器残留物中的酵母细胞(1-5)与现代酵母比较(6-8)

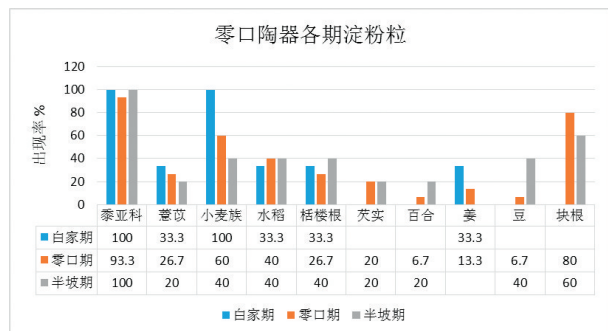
1、2. 类似芽殖状态的酵母细胞 3. 酵母细胞 4. 酵母细胞群 5. 类似毕赤酵母 6. 现代石崩浑酒中的库德里阿兹威毕赤酵母(长条形) 7. 现代石崩浑酒中的酿酒酵母 8. 现代啤酒厂(京-A)使用的酿酒酵母  
(标尺1-5: 5微米; 6-8: 10微米)

确定究竟属于哪些植物。因此这一假设尚需将来进一步论证。

6. 根据有些尖底瓶口沿磨损的微痕形态（如竖向线状痕），我们曾经推测仰韶时期的饮酒方式之一可能是用芦苇或竹子做的吸管啜酒，类似的习俗见于古代两河流域和埃及，以及中国西南地区诸少数民族中<sup>[39]</sup>。在本文所分析的两个零口期标本中（LK7，14）发现来自芦苇茎叶的盾形植硅体（图四：9），可以作为使用芦苇吸管啜酒的佐证。

7. 我们曾对零口遗址白家期的三件小口鼓腹罐的陶片进行残留物分析，结果显示该器形为酒器。酿酒方法为谷芽酒，原料中包括黍、粟、薏苡、小麦族、稻米、栝楼根和姜<sup>[40]</sup>。可见，在零口遗址从白家期，经零口期，到半坡期，酿酒方法始终一致，均为谷芽酒，而且使用原料也十分接近；只是白家期的植物种类相对较少，不见芡实、百合和豆。（图六）这一差别也许反映早期的酿酒原料比较单一；另一种可能性是，白家期的标本数量太少（n=3），残留物的结果不足以反映真实情况。

8. 零口遗址出土新石器时期三个文化阶段的酒器，器形从鼓腹罐到平底瓶，再到尖底瓶，最明显的器形变化为器底逐渐缩小。这一改变可能与酿酒工艺有关：尤其适用于谷芽酒的酿造。这是由于在酿酒过程中，发酵罐底部会沉积大量谷壳、酵母等固体渣滓；锥状底的发酵罐更有利于这些渣滓的沉淀、集中和分离<sup>[41]</sup>。同时，酵母发酵会产生二氧化碳和热量，并引起发酵罐内醪液的上下对流；当酵母集中在酿酒器的中心底部时，二氧化碳和热流在中心部位上升，四周温度低的液体下降到器底，形成循环对流；这一运动



104 图六 零口遗址各文化期酿酒陶器淀粉粒出现率 (%) 比较

模式有助于促进醪液温度的均匀，是保证酒质量的重要因素。这一酿酒器的设计原理反映在现代啤酒厂通用的筒形锥状底发酵罐上<sup>[42]</sup>，经实验证明是发酵罐的最佳设计<sup>[43]</sup>。

#### 四 结论

通过以上分析可以证明，零口遗址出土的零口期平底瓶和半坡期尖底瓶都是酿酒器。酿酒方法可能是以发芽的黍、稻谷和野生小麦族作为糖化剂来酿造谷芽酒；最主要的酿酒原料是黍，同时也包括粟、薏苡、水稻、野生小麦族、野豌豆、栝楼根、芡实及姜；在酿酒过程中很可能还加入一些植物茎叶及花序。酿酒原料中的大部分应来自各种谷物，而加入植物块根、茎叶和花序的目的，可能是利用其药用功能。使用芦苇吸管啜酒可能是当时饮酒的方法之一；因此，和尖底瓶类似，小口平底瓶不仅是酿酒器，也是饮酒器。这些来自零口遗址陶器的分析结果也许可以用于解释其他遗址出土同类器物的功能，说明黄河中游地区出现的小口平底瓶的确是从鼓腹罐到尖底瓶的过渡形态，并且具有使用功能的连续性。但这一假设还需要对更多遗址出土的平底瓶进行分析验证。

残留物分析证明零口遗址的先民从白家期、零口期到半坡期所采用的酿酒技术基本一致，均为以黍、稻和野生小麦族为主要糖化剂的谷芽酒。这种一脉相承的酿酒技术延续了近2000年之久，说明酿酒原料和方法是一种相对稳定的文化因素。这一现象也许可归因于地理和气候环境的影响，以及当地植被和作物种类的限制。但是不同时期酿酒器形制不同，说明人们会根据实践经验不断寻找最佳的酿造工艺，包括改进酿酒器的形状。今后的研究还需要进一步分析在更广泛的地区和更长的时间段内酿酒器的变化规律及原理，酿酒器形制与酿酒技术之间的关系，以及与酒文化相应的社会动力。

致谢：中国社会科学院考古研究所洛阳工作

站提供实验室设备和人员协助；斯坦福大学冯索菲参与标本残留物提取工作；北京京-A精酿啤酒公司 Alex Acker 提供酿酒酵母标本；本研究由美国斯坦福大学考古中心何勉君中国考古研究项目资助；在此鸣谢。

- [1] McGovern, Patrick, Juzhong Zhang, Jigen Tang, Zhiqing Zhang, Gretchen Hall, Robert Moreau, Alberto Nunez, Eric Butrym, Michael Richards, Chen-shan Wang, Guangsheng Cheng, and Zhijun Zhao, Fermented beverages of pre- and proto-historic China. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2004. 101 (51): 17593-17598; Liu, Li, Jiajing Wang, Maureen J. Levin, Nasa Sinnott-Armstrong, Hao Zhao, Yanan Zhao, Jing Shao, Nan Di, and Tian'en Zhang, The origins of specialized pottery and diverse alcohol fermentation techniques in Early Neolithic China. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2019. 116 (26): 12767-12774.
- [2] [12] [16] [20] [40] Liu, Li, Jiajing Wang, Maureen J. Levin, Nasa Sinnott-Armstrong, Hao Zhao, Yanan Zhao, Jing Shao, Nan Di, and Tian'en Zhang, The origins of specialized pottery and diverse alcohol fermentation techniques in Early Neolithic China. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2019. 116 (26): 12767-12774.
- [3] [19] 王佳静, 刘莉, Terry Ball 等. 揭示中国 5000 年前酿造谷芽酒的配方 [J]. *考古与文物*, 2017 (6); 刘莉, 王佳静, 赵雅楠等. 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); 刘莉, 王佳静, 赵昊等. 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); Liu, Li, Yongqiang Li, and Jianxing Hou, Making beer with malted cereals and qu starter in the Neolithic Yangshao culture, China. *Journal of Archaeological Science: Reports*, 2020. 29: 102134.
- [4] [39] 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).
- [5] 王佳静, 刘莉, Terry Ball 等. 揭示中国 5000 年前酿造谷芽酒的配方 [J]. *考古与文物*, 2017 (6); Liu, Li, Yongqiang Li, and Jianxing Hou, Making beer with malted cereals and qu starter in the Neolithic Yangshao culture, China. *Journal of Archaeological Science: Reports*, 2020. 29: 102134.
- [6] 田建文, 尖底瓶的起源——兼谈半坡文化与庙底沟文化的关系问题 [J]. *文物季刊*, 1994 (1); 陕西省考古研究所. 临潼零口村 [M]. 西安: 三秦出版社, 2004.
- [7] 山西省考古研究所, 山西翼城枣园新石器时代早期遗址调查报告 [J]. *文物季刊*, 1992 (2).
- [8] 中国科学院考古研究所. 宝鸡北首岭 [M]. 北京: 文物出版社, 1983.
- [9] [10] [11] [28] [34] 陕西省考古研究所. 临潼零口村 [M]. 西安: 三秦出版社, 2004.
- [13] [25] Lamb, Jenna and Tom Loy, Seeing red: the use of Congo Red dye to identify cooked and damaged starch grains in archaeological residues. *Journal of Archaeological Science*, 2005. 32: 1433-1440.
- [14] [41] Hornsey, Ian S., *A History of Beer and Brewing*. 2003, Cambridge: The Royal Society of Chemistry.
- [15] 王佳静, 刘莉, Terry Ball 等. 揭示中国 5000 年前酿造谷芽酒的配方 [J]. *考古与文物*, 2017 (6).
- [17] 洪光住. 中国酿酒科技发展史 [M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2001.
- [18] [24] Wang, Jiajing, Li Liu, Andreea Georgescu, Vivienne V. Le, Madeleine H. Ota, Silu Tang, and Mahpiya Vanderbilt, Identifying ancient beer brewing through starch analysis: A methodology. *Journal of Archaeological Science: Reports*, 2017. 15: 150-160.
- [21] Liu, Li, Yongqiang Li, and Jianxing Hou, Making beer with malted cereals and qu starter in the Neolithic Yangshao culture, China. *Journal of Archaeological Science: Reports*, 2020. 29: 102134.
- [22] 李兵, 张超, 王玉霞等. 白酒大曲功能微生物与酶系研究进展 [J]. *中国酿造*, 2019 (6).
- [23] Liu, Li, Jiajing Wang, Maureen J. Levin, Nasa Sinnott-Armstrong, Hao Zhao, Yanan Zhao, Jing Shao, Nan Di, and Tian'en Zhang, The origins of specialized pottery and diverse alcohol fermentation techniques in Early Neolithic China. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2019. 116 (26): 12767-12774; Liu, Li, Yongqiang Li, and Jianxing Hou, Making beer with malted cereals and qu starter in the Neolithic Yangshao culture, China. *Journal of Archaeological Science: Reports*, 2020. 29: 102134.
- [26] [27] Liu, Li, Sai Ma, and Jianxin Cui, Identification of starch granules using a two-step identification method. *Journal of Archaeological Science*, 2014. 52: 421-427.
- [29] Torrence, Robin and Huw Barton, eds. *Ancient Starch*

*Research*. 2006: plate 27, Left Coast Press: Walnut Creek, Calif.

- [30] 中国科学院西北植物研究所. 秦岭植物志·第一卷: 种子植物(第三册) [M]. 北京: 科学出版社, 1981: 98-99.
- [31] Duncan, Neil A., John Starbuck, and Li Liu, A Method to Identify Cross-Shaped Phytoliths of Job's Tears, *Coix lacryma-jobi* L., in Northern China. *Journal of Archaeological science: Reports*, 2019. 24: 16-23.
- [32] [33] Piperno, Dolores R., *Phytoliths: A Comprehensive Guide for Archaeologists and Paleoecologists*. 2006, Lanham: Altamira Press.
- [35] Ball, Terry, Luc Vrydaghs, Tess Mercer, Madison Pearce, Spencer Snyder, Zsuzsa Lisztes-Szabo, and Akos Peto, A morphometric study of variance in articulated dendritic phytolith wave lobes within selected species of Triticeae and Aveneae. *Vegetation History and Archaeobotany*, 2017. 26: 85-97.
- [36] Sinnott-Armstrong, Nasa, DNA sequencing of cultured millet beer. NIH Sequence Read Archive. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/bioproject/PRJNA535381>. Deposited 15

May 2019. 2019.

- [37] Jin, Guangyun, Yang Zhu, and Yan Xu, Mystery behind Chinese liquor fermentation. *Trends in Food Science and Technology*, 2017. 63: 18-28.
- [38] Ueda, Seinosuke, Yuji Teramoto, Riichiro Ohba, and Shoji Kayashima, Production and Characteristics of Sprouting Rice Wine. *Journal of Fermentation and Bioengineering*, 1992. 74 (2): 132-135; Teramoto, Yuji, Kaoru Okamoto, and Seinosuke Ueda, Rice wine brewing with sprouting rice, sprouting rice infected with *Aspergillus oryzae* and rice koji. *Journal of the Institute of Brewing*, 1993.
- [42] Briggs, Dennis E., Chris A. Boulton, Peter A. Brookes, and Roger Stevens, *Brewing Science and Practice*. 2004, Cambridge: CRC Press.
- [43] Delente, Jacques, Cavit Akin, Erik Krabbe, and Kurt Lanenburg, Fluid Dynamics of Anaerobic Fermentation. *biotechnology and Bioengineering*, 1969. XI: 631-646.

(责任编辑: 刘丁辉)