

山西绛县西吴壁遗址的木炭窑及实验报告*

田 伟 崔春鹏 汤毓贇 戴向明

中国国家博物馆, 北京 100006

Abstract: We found a group of special relics during our excavation at Xiwubi from 2018 to 2019. To know the nature of the relics, we unearthed the entire region. Combing folk customs and laboratory work, we have investigated the function of the special relics in the specific archaeological context. We have come to the conclusion that the special relics should have been charcoal kiln of the Erlitou culture.

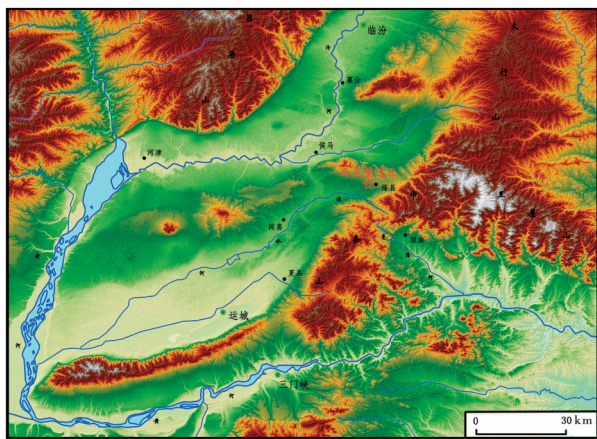
Keywords: Xiwubi site, Erlitou culture, experimental archaeology, charcoal kiln

摘要: 2018年—2019年,我们在西吴壁遗址的考古发掘工作中,发现一组特殊遗迹。为了解这组特殊遗迹的性质,我们首先通过精细化发掘对其进行了完整揭露;在此基础上,结合考古背景,从民间材料寻找线索,对其性质与功能形成初步判断;进而通过实验考古等手段,科学记录、分析实验数据,最终确认这组特殊遗迹为二里头文化时期的木炭窑。

关键词: 西吴壁遗址; 二里头文化; 实验考古; 木炭窑

西吴壁遗址位于山西省绛县古绛镇西吴壁村南,地处涑水河北岸的黄土台地上,南距中条山约6公里。中国国家博物馆、山西省考古研究院及运城市文物保护研究所组成的联合考古队,自2018年开始在西吴壁遗址开展连续的考古工作,业已取得较大成果,确认该遗址是一处夏商时期生产规模大、专业化程度高的冶铜遗址。其生产原料为产自附近中条山的铜矿石,冶炼所得纯铜除少量在当地制造小型工具外,大部分被运往中心都邑的铸铜作坊用于铸造铜器^[1]。

2018年—2019年,我们在遗址冶铜遗存集中分布区东区发掘时,发现一处特殊遗迹。通过精



图一 西吴壁遗址位置及周邻区域地形图

细化发掘,对其进行了完整揭露。为搞清其性

*本文是国家重点研发计划“中华文明起源过程中的生业、资源与技术研究”(课题号:2020YFC1521606)的阶段性成果。

质，我们结合考古背景，从民间材料寻找线索，并通过实验考古予以验证，最终判定该特殊遗迹为二里头文化时期的木炭窑。下文报告具体发现与认识过程。

一 特殊遗迹及与之相关的考古背景

2018年春季，我们在冶铜遗存集中分布区东区IT3539西南发现一处特殊遗迹。该遗迹开口于探方第②层下，由南部的地穴式房址和北部的圆形直壁坑组成，其中圆形直壁坑的壁和底均附着较厚的黑色炭灰层。在发掘之初，我们以为地穴式房址和圆形直壁坑是两个存在打破关系的遗迹，但经多次铲刮平面，都未发现它们之间存在明显分界。换言之，地穴式房址和圆形直壁坑中的堆积基本相同。虽如此，我们仍小心发掘，后经反复观察，确认二者共用一个底面，应为同一遗迹的两个部分。（图二）

起初我们判断该遗迹是一处房址，认为南部的地穴式房址为遗迹主体，北部的圆形直壁坑为地穴式房址的附属设施，编号为F1。但因其形制特殊，且在其周边发现了多个与冶铜生产关系密切的遗迹单位，我们对将其作为房址的判断一直存有疑虑。鉴于当季发掘工作临近结束，故对该遗迹进行了妥善保护，以待后续进一步的现场研究。

2019年秋季，我们在IT3539西、南部扩方发掘，目的是将F1发掘完整，为究明其形制及用途提供更多资料。扩方发掘表明，该遗迹可以分为多个单元。中部为一座带有柱洞和烧土灶面的地穴式房址，北、西、南侧各有一座圆形直壁坑。三个圆形直壁坑的坑壁和坑底均可见因灼烧形成的黑色炭灰层。（图三）地穴式房址和北、西、南侧三个圆形直壁坑中的堆积相同，并且共用一个底面，说明它们属于同一遗迹。我们将地穴式房址编号为F1。F1中部发现的三个柱洞分别编号为D1、D2和D3，东部发现的烧土灶面编号为Z1；将北、南、西发现的三个圆形直壁坑分别编号为Y2、Y3、Y4。为行文方便，暂将这组特殊遗迹称为F1组遗迹。

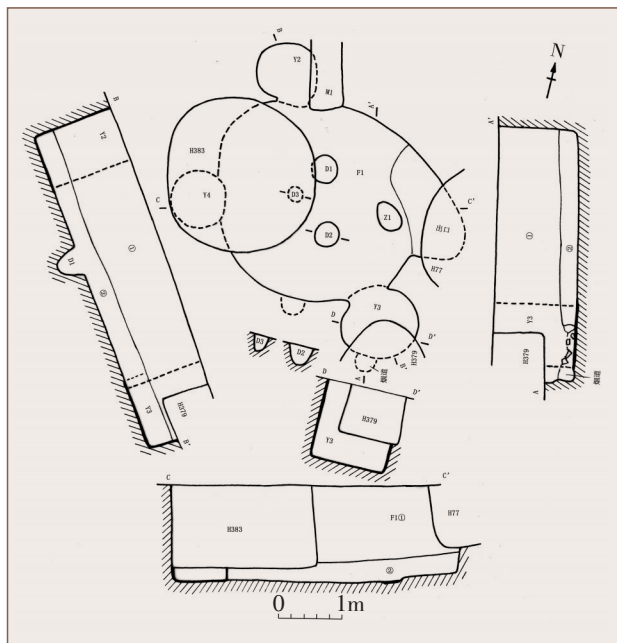


图二 F1与疑似附属设施



图三 F1组遗迹（上为西）

F1组遗迹中间近似地穴式房址的部分开口线平面接近椭圆形，直壁，底面平整且坚硬。长径4米，短径3.1米，残深约1.4米。底面中央有三个品字形分布的柱洞，其中D1、D2直径均为0.4米左右，D3相对略小，直径约0.2米；三个柱洞的深度均为0.3米左右；底部皆填充碎陶片。Z1平面略呈椭圆形，长径0.5米，短径0.3米，厚0.03米。Y2、Y3、Y4的形制基本相同，皆为近圆形直壁，直径均为0.9~1.2米。Y2、Y3、Y4的窑壁经多次烧烤已形成质地坚硬的黑色炭灰层。在Y3南部发现直径约0.3米左右的烟道。推测Y2、Y4也曾存在烟道，后被晚期遗迹打破而不存。Y2、Y3、Y4底部均较平整，亦经烧烤形成较厚的黑色炭灰层，与操作间地面水平衔接。F1组遗迹内堆积分二层，分别为灰褐色土、黄褐色土，均夹杂红烧土块、木炭屑，①层厚1米左右，出土大量陶片与少量兽骨；②层厚约0.2



图四 F1组遗迹平面、剖视图

米,发现少量陶片与兽骨。(图四)据出土陶片可知,这组遗迹的时代不晚于二里头文化晚期^[2]。

F1组遗迹周边不见活动面,说明与这组遗迹相关的早期地面已遭破坏。在F1组遗迹周边发现的袋状坑为分析其上部被破坏的程度提供了参考。完整袋状坑是由近口部、犹如瓶颈的直壁部分,以及其下的袋状壁组成。为防止塌陷,袋状坑的近口部部分一般较厚,在晋南地区,保守估计也应在半米以上^[3]。我们在这一区域发现数座与F1组遗迹距离相近(10米以内)的袋状坑。它们的开口线距今地表的深度与F1组遗迹相当,且近口部的直壁部分均已残失不见,说明F1组遗迹上部已遭破坏而不存。其被破坏部分的深度应不小于邻近其他袋状坑直壁部分的深度。而同处遗址东区,距离F1组遗迹距离较远的袋状坑H255保存相对较好^[4]。其近口部直壁部分的深度超过1.5米,但并未在其周围发现早期地面,说明这一区域袋状坑的直壁部分应该更厚。由此可知,F1组遗迹至少有超过1.5米的上半部分已遭破坏而不存。

二 实验考古过程简介

2019年秋季,我们结合考古背景,怀疑这组

特殊遗迹与早期烧制木炭有关,遂四处寻访具有烧炭经验的人员。在与西吴壁村村民侯兴智交谈过程中,得知其多年前曾在翼城县从事烧炭生产,遂邀其前往查看这组特殊遗迹。侯兴智看后表示,圆形直壁坑与绛县、翼城等地常见的木炭窑形制类似,只是不见窑室顶部,且发掘所见木炭窑的体量较其以往所见之木炭窑稍小。

前文已述及F1组遗迹上部超过1.5米的部分已遭破坏而不存,可能存在的窑室顶部当然无法看到。此外,二里头文化时期烧制木炭的工艺与今日相比,可能有所差异。若其确属木炭窑,窑室体积略小于今日所见者,当属情理之中。因此,侯兴智师傅所言其为木炭窑的可能性极大。

基于这些重要线索,我们决定在附近选址仿建一座圆形直壁窑室,开展烧制木炭的实验,以验证此种结构的遗迹是否具备生产木炭的功能,并观察烧制木炭后形成的遗迹与发掘所见者是否相同。

烧制木炭实验包括选址建窑、装柴、点火、封窑、取炭等步骤。实验所用设备有铁锹、镢头、斧头、秤、探针式温度计、记录本等。下文简要报告具体实验过程。

(一) 选址建窑

选取发掘区南部的一处断坎,掏挖建筑木炭窑。首先平整断坎南侧的土地,形成操作面。以操作面为基准,测得地坎高约1.65米,其中包括坎上地表0.15米的耕土,以及耕土下1.5米的黄色生土。以操作面为基础,利用铁锹、镢头 etc 小型工具,首先在断坎上横向掏窑,至一定深度(具体尺寸参照F1组遗迹中的Y2而定)后,向上掘进扩大空间。其后,在窑室后半部分(北部)以尖锐木棍、洛阳铲向上掏洞,穿透坎上地面形成烟囱,并以草拌泥涂抹烟囱内壁,随后在地面上用瓦片搭成圆筒状,用以加高烟囱。木炭窑主体至此宣告完工。(图五)

仿建的木炭窑整体近似窑洞,底面东西长1.2米,南北宽0.9米,窑门高0.9米,容积约1立方米。(图六:1)

(二) 装柴点火

2019年10月31日下午,天气晴好,微风。



1



2



3



4



5



6

图五 木炭窑建造过程

1. 横向掏窑 2. 扩大空间并掏烟囱 3. 烟囱口穿透地表 4. 草拌泥抹烟囱 5. 加高烟囱 6. 木炭窑侧面

我们在已经成功完成两次烧制木炭实验，积累了较为丰富经验的基础上，开始第三次烧炭实验，并做了较为详细的记录。

本次烧炭的木材选用西吴壁村2018年砍伐的山楂树干。这些树干的直径大小差别很大，用斧头将其加工成长度为长约0.8米的圆木^[5]。以粗头向上、细头朝下的方式，将加工好的木料置入窑室，木料之间紧密贴合以减少空隙（图六：2），累计放入木料592千克。木料放置完毕后，在窑门口地面堆垒石块，形成贴近地面处的进风口，在此基础上，继续堆垒石块，向上封闭大部分窑门，并在窑门上方预留用来引火的小口。使

用草拌泥涂抹石块之间的缝隙，以防止漏气。（图六：3）

10月31日16:20左右，我们完成装柴工作，于16:24点火烧炭。（图六：4）16:27许，窑室内木材大部分开始燃烧，烟囱开始冒“黑烟”^[6]，稍后测得窑室中部温度为460℃。至17:00，窑室中部温度升至573℃。10分钟后，在窑门外侧垒砖、木头，加固窑门，准备封窑。17:30，测得窑室中部温度升至624℃，随即封闭窑门，但继续保持窑门下部进风口处于通畅状态。（图七）19:20，观察到烟囱冒出的烟已变为“白烟”，此时测得窑室中部温度为278℃^[7]。11月1日1:00，烟囱冒出的烟已变为“青烟”，同时测得窑室中部温度为800℃。11月1日2:30，封闭下部通风口及烟囱，这时窑室中部的

温度为704℃。自完全封闭窑室及烟囱开始，窑温逐渐下降。（图八）至11月3日14:20，测得窑室中部温度为68℃，已具备开窑取炭的条件。

（三）开窑取炭

11月3日14:30，打开窑门，取出木炭，称得共64千克。（图九：1）拍照、绘图完毕后，我们对木炭窑进行了解剖（图九：2），发现窑门外壁及窑室前壁已被灼烧至硬结，形成一层较厚的暗红色土块。（图九：3）窑室后壁未烧结，但窑室大部分被染成炭黑色（图九：4），形成较厚且坚硬的黑色炭层。这与F1组遗迹中Y2、Y3、Y4



图六 木炭窑装柴点火过程

1. 木炭窑正面 2. 垒放木材 3. 封闭大部分窑门 4. 引燃窑室

的窑壁和底部的黑色炭层基本相同。(图一)

为确保所得数据确凿无虞,类似烧制木炭的实验我们反复进行4次,所得数据基本相同。由此可以推测此组木炭窑中,单个窑室每次烧制木炭产量约64千克。若三个窑室同时工作,4天可烧炭200千克左右,数量非常可观。通观烧制木炭的全过程,并无十分复杂之处。西吴壁遗址附近就是森林茂密的中条山,可以作为稳定的木料来源地。因此,大量烧制木炭完全不成问题。

三 科技分析

木炭由木材燃烧生成,而木材的主要组成物质为纤维素和木质素^[8]。从热动力学视角来看,西吴壁木炭窑模拟实验可分三个阶段:

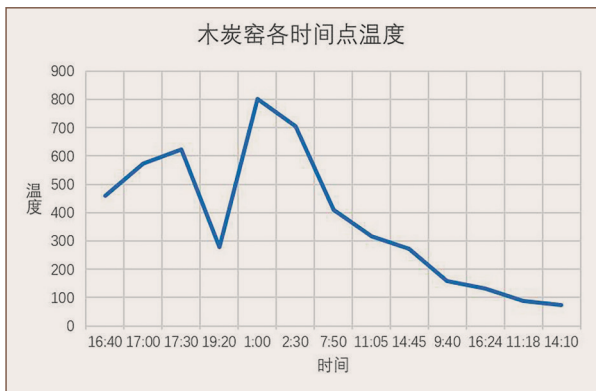
第一阶段为干燥阶段。该阶段窑室温度较低,通常在100℃~200℃^[9]。木材中化学成分在这一阶段几乎未发生变化。该阶段通常时间短暂,本次窑内温度监测中表现就不明显。

第二阶段为炭化阶段。这一阶段,木材中纤维素的热解温度通常在240℃~350℃,木质素的热解温度通常在280℃~500℃^[10]。由于纤维素的氧桥键C-O-C和C-C键比较弱^[11],在该阶段易

断开,发生解聚反应而产生大量焦油。焦油是木炭燃烧的主要热源,且以凝结形式存在于木质素形成的木炭结构中,进一步反应会产生甲烷、一氧化碳以及其他烃类气体。但如果窑内温度超出常规热解温度则会消耗掉大量木材。该阶段共历时8小时,先后冒出含有炭粒的黑烟以及含有水份的白烟^[12]。推测黑烟与相对干燥的木材在空气流通不畅的窑内燃烧有关。白烟则主要是随着热辐射向木材中央渗进,水份通过细胞壁向外蒸发形成。至11月1日1:00,烟囱冒出略带青色的浅蓝色烟气,俗称“青烟”,该颜色是焦油挥发出过量甲烷等有机气体聚集燃烧的颜色^[13]。同时,窑内也达到最高温度800℃,这是大量有机气体燃烧发生放热反应的结果。而此刻,侯兴智师傅也凭借着辨别烟色的经验将木炭窑全部封闭。相应的科学解释是,“青烟”出现时封闭木炭窑是为了防止焦油继续挥发散失以及木炭过度燃烧灰化而影响到木炭的产量与质量^[14]。

第三阶段为冷却阶段。木炭窑封闭后,窑内的木炭在无氧环境下缓慢熄火、冷却^[15]。该阶段共历时近57小时,开窑前10分钟最后一次测量窑内温度为72℃。若在窑温尚高时开窑,存在窑内木炭与流入空气接触燃烧的可能,进而导致制

图七 封闭窑门



图八 木炭窑温度变化图

炭失败。

木炭出窑后，其体积明显小于木材原料。对于此现象，有两种不同解释。^[16]其一，纤维素与木质素在炭化阶段挥发出大量可燃性气体与焦油；其二，在炭化阶段，木炭的孔径和壁厚的收缩程度会随氧分压的减小而变大，而窑内的低氧环境有利于木炭体积的收缩。

我们还发现，出窑后的木炭较原木减重较多。民间素有“千材百炭”之说，传统的燃木烧炭需要消耗大量木材，产量通常在10%~20%。据侯兴智师傅讲，烧成1斤木炭需5斤湿材或7斤

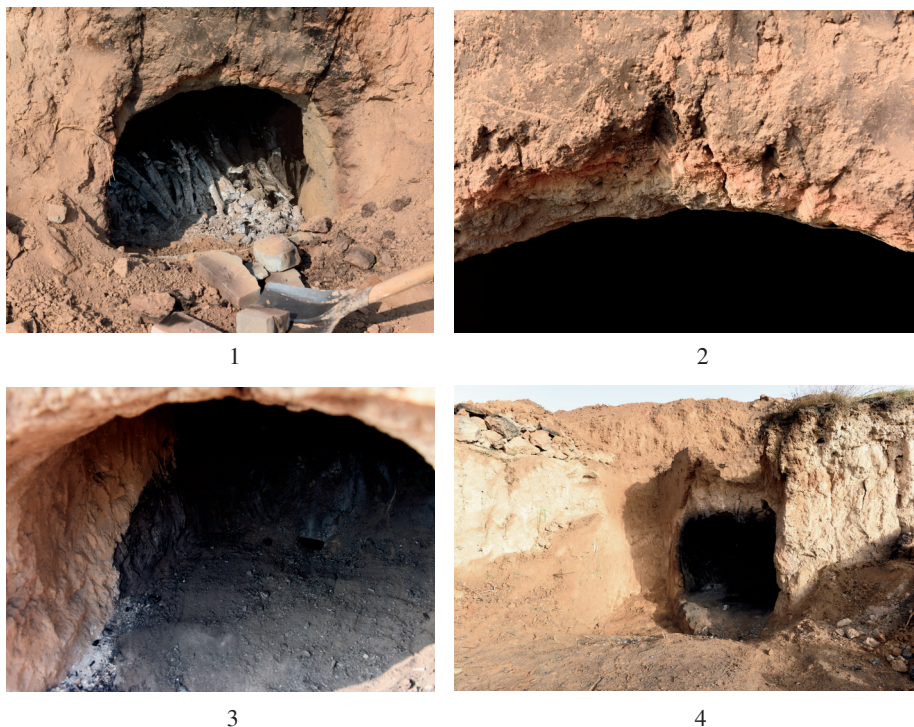
干材，不同木材产炭率也略有不同。本次模拟实验使用的山楂木干材，大致需7到8斤才能烧制1斤木炭。研究表明，木炭重量损失的影响因素主要是水份与氧气^[17]。干燥、炭化阶段木炭会失去大量水份，而一定湿度的木材原料却有利于焦油随水份存在于木炭中，进而提高木炭产量。

木炭制备需要在低氧、低温环境下进行不完全燃烧，过多的氧气必然导致窑温升高，从而增加焦油挥发散失，以及木炭过度燃烧所造成的重量损失。因此，为减少氧气进入窑内，传统木炭窑的通气孔与烟囱口径都尽量要小。实际上，传统木炭制备时，窑工通常依靠观察烟囱冒出的烟气颜色来控制制炭过程，这就很难保证窑内处于理想的氧压状态以及温度环境。但在缺乏科学设备的传统烧炭工艺中，通过观察烟气，及时采取应对措施，已是最优选择。

四 结语

在发现特殊遗迹后，不急于对其定性，而是通过精细化发掘，对其进行科学、完整的揭露，

首先确认F1组遗迹为一个整体，了解到这组遗迹中央的F1可能是操作间，北、南、西两个方位的圆形直壁坑为窑室。结合考古背景，确定F1组遗迹上部已遭严重破坏，原有地面、窑室顶部等部分已残失不存。此外，因其周围存在丰富的冶铜遗存，故判断其很有可能与冶铜生产活动有关，或许属于冶铜生产的某一环节。在此基础上，以窑室的形制及其壁、底部附着



图九 开窑取炭过程

1. 开窑取炭 2. 窑门外壁 3. 木炭出窑后的窑室 4. 解剖窑室



1



2

图一〇 木炭窑室对比

1. 二里头文化时期木炭窑 2. 模拟实验后解剖所得的木炭窑室

的黑色炭层，结合民间调查材料，初步判断其可能与烧制木炭有关。基于这些判断，通过实验考古的方法，进一步验证这组遗迹应具备生产木炭的功能，再结合实验考古数据和对实验考古所建木炭窑的解剖工作，最终确定F1组遗迹属于一组二里头文化时期的木炭窑。凡此发掘、判断和实验过程，集精细化发掘、记录，结合民间调查及实验考古为一体，所得之结果当可经得起时间考验。因此，这种辨识遗迹的思想对于今后科学认识在田野考古中发现的特殊遗迹具有一定程度的启示意义。

考古及文献资料表明，木炭在先秦时期广泛用于取暖、冶金、防潮等领域，所用数量非常巨大。《周礼》《吕氏春秋》等文献中还记载了烧炭季节等与木炭生产有关的细节，但以往从未在田野考古工作中发现夏商时期生产木炭的场所。西吴壁遗址二里头文化时期的木炭窑，不仅是国内迄今为止发现的最早的木炭窑遗迹，也是已见与冶铜生产存在直接关系的遗迹中较为完整的一处。这组木炭窑的发现，为研究早期生产、利用木炭及早期木炭质量等问题提供了重要材料，同时为复原冶铜生产工作链，厘清冶铜作坊布局增加了新材料，具有较为重要的学术意义。

[1] [2] [4] 中国国家博物馆，山西省考古研究院，运城市

文物保护研究所.山西绛县西吴壁遗址2018—2019年发掘简报[J].考古,2020(7).

[3] 刘绪.若干田野考古现象分析[J].南方文物,2017(4).

[5] 为尽量贴近原始工艺,未使用锯。但据炭工反映,现代烧炭仍使用斧砍木材,是因为锯的木头平面太整齐,与地面完全接触,最终会烧不透。

[6] 本文的“黑烟”“白烟”“青烟”为民间烧炭工人的习惯用语。“黑烟”指含热气、粉尘的灰白色浓烟,此时窑中木材开始散热脱水,这一阶段持续时间较短,约2至3小时;“白烟”为白色浓烟,这一阶段持续时间最长,木材基本脱水;“青烟”为几乎不可见的烟,此时木材基本已经炭化,这一阶段持续时间最短,约2小时。

[7] 此时温度骤降当是由于封闭窑门,窑内突然缺氧,明火消失。

[8] K Menemencioglu. Traditional wood charcoal production labour in Turkish forestry (Çankır sample). *Journal of Food, Agriculture & Environment*, 2013 (2), pp.1136-1142.

[9] [10] [11] 陈鹏.典型木材表面火蔓延行为及传热机理研究[D].中国科学技术大学博士学位论文,2006.

[12] 段红燕.杨木速燃炭的制备工艺及性能研究[D].南京林业大学硕士学位论文,2010.

[13] [16] 王远亮.测氧传感器与竹木炭工艺研究[D].南京林业大学硕士学位论文,2013.

[14] 沈德奎.热辐射下积炭类可燃物热解与着火特性的机理研究[D].浙江大学博士学位论文,2007.

[15] 邹久安,杨启华.怎样烧制木炭[J].农村新技术,2006(11).

[17] 吉林省林业科学院.特种黑木炭研制报告[J].吉林林业科技,1994(1);严伟,陈志豪,盛奎川.适宜炭化温度及时间改善生物质成型品[J].农业工程学报,2015(12).

(责任编辑:刘丁辉)