



# 高青陈庄遗址 M17、M18 出土青铜器 腐蚀现象及产物分析

- ◆ 张红燕 (中国社会科学院考古研究所)
- ◆ 吕淑贤 (北京大学图书馆)
- ◆ 胡东波 (北京大学考古文博学院)
- ◆ 王浩天 (中国社会科学院考古研究所)

## 一、引言

陈庄遗址位于鲁北平原的小清河北岸,隶属于高青县花沟镇。北距黄河约 18 公里,东北距高青县城约 12 公里。遗址坐落于陈庄村和唐口村之间。该区域属黄河冲积平原,地势低平。经勘探,遗址东西长约 350、南北宽约 300 米,总面积约 9 万平方米。2008 年至 2010 年,山东省文物考古研究所组队对其进行勘探和发掘,确认该遗址为西周城址及东周时期的环壕聚落,发现大量灰坑、窖穴及房基、道路、水井、陶窑等生活遗迹,以及西周时期的贵族墓葬、车马坑、祭祀台基等重要遗迹。其中贵族墓葬共 14 座,有 6 座随葬铜器。M35 和 M36 为出土铜器的墓中最大的,都是带一条墓道的甲字形大墓。M17、M18 和 M27 规模小于 M35、M36。该遗址出土的铜器规格高,带铭文器物数量多,具有重要的科学、历史、艺术价值<sup>①-③</sup>。

该遗址出土的铜器大部分锈蚀、破碎严重。2011 年至 2016 年,中国社会科学院考古研究所文化遗产保护研究中心对 M17、M18、M27、M35、M36 出土的铜器进行了保护修复,同时也对其进行了大量的科技检测分析。整体上看,这五个墓出土的铜器腐蚀现

象和保存状况不尽相同,其中 M17、M18 类似,M35、M36 类似,M27 又与它们都不相同。本文即是对 M17 出土的 2 件(套)、M18 出土的 10 件(套)青铜器腐蚀状况的分析总结。

## 二、腐蚀现象

高青陈庄遗址 M17、M18 出土的铜器外观多呈浅绿色,在修复之前大部分破碎严重。部分青铜器整体或局部矿化严重,膨胀变厚,质地酥脆。依据文物保护行业标准《馆藏青铜器病害与图示》<sup>④</sup>,其主要病害表现为:残缺、裂隙、变形、层状剥离、层状堆积、点腐蚀、瘤状物、孔洞、通体矿化、表面硬结物等;铸造信息有:铸造缺陷、范土残留、补铸痕迹等。外观看,其腐蚀现象主要有:

### 1、漆古与平整的表面层

M17、M18 出土的铜器表面普遍带有黄绿色光洁致密的漆古(图一),带有漆古的铜器数量达到 83%。有些漆古较暗淡,光亮致密度较差,颜色泛白,多呈白绿色、黄白色等。有些表面虽未形成光亮的漆古,但表面锈蚀层平整致密,呈白绿、黄绿、灰绿、绿、暗红等色。

漆古是器物表面很薄的一层。从残片断面看,漆



图一 光亮致密的黄绿漆古



图二 残片断面(表层为黄绿色漆古)



图三 器物表层绿色的堆积锈

古处的金属质地通常较好,漆古层紧贴基体表面,但有的部位也可见漆古与基体之间有一层白绿色粉状夹层(图二)。也有腐蚀较重的部位残留少量漆古,多重锈层发生膨胀,表面漆古层被撑破甚至脱落(图三、图四)。

### 2、坚硬粗糙的堆积锈

器物平整表面层之上常存在有坚硬粗糙的蓝色、绿色、深绿色等凸出的锈块堆积(图三)。部分青

铜器表面有红色、暗红、红棕、黄褐等粗糙的锈蚀产物,有的明显呈层状堆积在器物表面。这些蓝、绿、红、棕、黄等色锈蚀层也常相互交叠在一起,并杂有白、白绿等锈蚀物。

### 3、松软细腻的粉状锈

该批青铜器几乎全部带有粉状锈,粉状锈松软细腻,呈绿色、白绿色、灰白色等多种。

腐蚀相对较重的部位,表面已不再致密,开始粉化。表面粉化的现象有:①表层个别点出现点腐蚀粉状锈;②表层局部粉化,粉状锈呈片状凸出于器表,有的表面开裂(图四);③表层完全粉化,基体表层膨胀变厚呈现出松软的粉化状态,有的表层因粉化膨胀出现垂直于器表纵向开裂,有的沿器表方向横向分层堆积,有的兼而有之(图二八~图三二);④存在于器表瘤状锈内部,瘤状锈外壁破裂后可见内层中的粉状锈。



图四 凸出的粉状锈表面开裂



图五 器壁下的粉状夹层锈

腐蚀严重的部位,器壁基体内部也出现粉化。器壁基体内部粉化的现象有:①器壁矿化但未膨胀,器表层之下或器壁内部粉化,有的器物表层局部脱落,露出其下的粉状夹层锈(图5);②器壁矿化膨胀,器壁尚有红色基体层,红色基体层与粉状锈层相互层叠堆积(图七~图一二);③器壁完全矿化,膨胀开





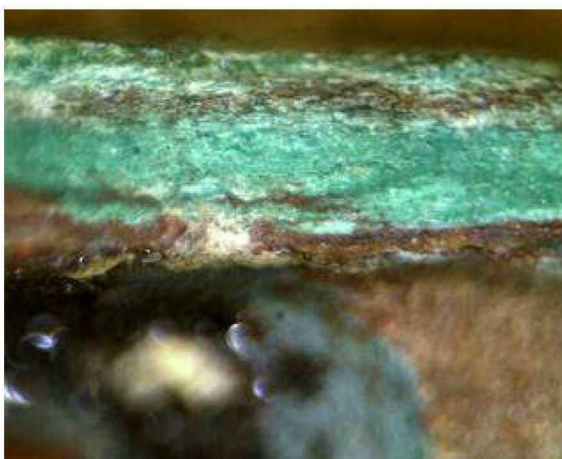
图六 器表之下的粉状夹层



图九 多重夹层



图七 白色夹层,两侧器壁易分离



图八 绿色夹层

裂,质地酥松脆弱,器壁内全部为粉状锈,且器壁的粉状锈平行于器表方向形成层叠堆积的结构(图一四)。

#### 4、层状腐蚀

M17、M18出土的铜器,非常显著的一个特点就是腐蚀产物的层状结构,其表现如下:①器物表层之下普遍存在白绿色、灰白色粉状夹层(图五、图六),所有的器物都带有粉状夹层;②器壁基体内部出现白绿色、灰白色粉状夹层,有的夹层很厚,器壁膨胀,夹层两侧的器壁基体容易分离脱落(图七、图八);③



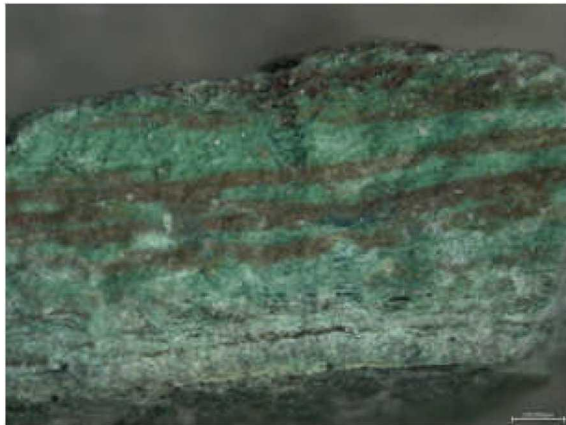
图一〇 多重夹层



图一一 多重夹层

器壁基体矿化严重,器壁膨胀,内部有白色、浅绿色、绿色、鲜绿色、蓝色、红色、黑色、黄色等锈蚀物相互叠压形成平行于器表方向的多重夹层,层与层之间常有很多缝隙,有的红色层上可见残余金属(图九~图一二);④在腐蚀矿化非常严重处,器壁严重膨胀,





图一二 多重夹层



图一五 纹饰下的多重锈蚀层



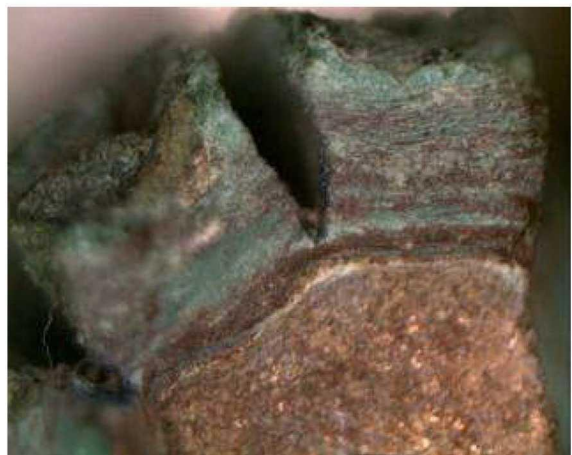
图一三 膨胀严重、多重夹层



图一六 锈蚀堆积层



图一四 膨胀严重、多重夹层



图一七 锈蚀层堆积(锈层开裂)

红色基体层剩余很少,或已完全丧失,膨胀的器壁断面由多由绿、白等粉状锈蚀组成,每层锈蚀物都较薄但层数非常多,层状结构在接近器表处尤为明显,器表纹饰下可见到多重锈蚀层(图一四、图一五);⑤器物表层之上的锈蚀产物出现层状结构,有的层数非常多且厚,甚至出现垂直于器表的纵向开裂(图一六、图一七);⑥很多瘤状锈呈多重层状结构(图一八、图一九)。M17、M18出土的铜器,带有多重夹层的约42%。

5、点腐蚀、瘤状物、孔洞

受电化学腐蚀的影响,有些器物局部出现点腐

蚀,在器物表面形成点腐蚀粉状锈或瘤状锈(图二〇),在器壁断面有时也可见点腐蚀形成的浅绿色粉状锈坑(图二一)。有些点腐蚀瘤状物脱落后在器物表面留下腐蚀坑(图二二)。有些点腐蚀将器壁锈透,形成孔洞(图二三)。

有些器物表面腐蚀严重,已不是局部个别点的





图一八 瘤状锈块的多重锈蚀层



图一九 瘤状锈的层状堆积结构



图二二 点腐蚀凹坑



图二〇 表面点腐蚀



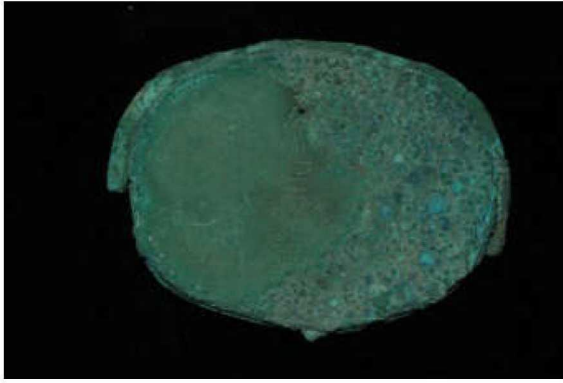
图二三 点腐蚀孔洞



图二一 器壁断面上的点腐蚀



图二四 鼓泡状疱体锈



图二五 鼓泡状疱体锈破坏了铭文



图二六 外凸鼓包状锈,铭文受损



图二七 瘤状物

腐蚀,而是较大面积的连成一片,形成密集排列的鼓泡状疱疹锈,或较大的外凸鼓包状锈,或较大的瘤状锈块连接成一片使整个器壁都变得很厚(图二四~图二七)。这些疱疹状锈、鼓包锈有的破裂,破坏了器物表面的纹饰,甚至铭文(图二五、图二六)。

#### 6、矿化开裂、层状剥离

有些铜器局部腐蚀矿化非常严重,铜质基体基本丧失,呈酥松发脆状态,器壁内部粉化严重,平行于器表方向的层状结构之间出现缝隙,器壁膨胀变的很厚,器物表层开裂,裂隙很深,垂直于器表方向(图二八~图三一)。因器壁内部多重锈蚀层、粉状

锈、缝隙的存在,器物表面层层脱落出现层状剥离的现象(图三一、图三二)。有些铜器局部表层漆古也出



图二八 矿化严重、开裂



图二九 矿化严重、开裂



图三〇 矿化严重、膨胀开裂



图三一 矿化严重、层状剥离





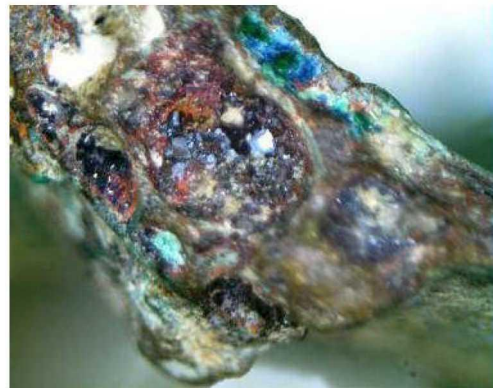
图三二 矿化严重、层状剥离



图三五 断面孔隙内的黑色闪亮颗粒



图三三 被发锈撑破的漆古和纹饰层状剥离



图三六 断面孔隙内黑色闪亮颗粒物

现脱落,纹饰也受到了严重的破坏(图三三)。

#### 7、闪亮颗粒物

在锈蚀层下的缝隙内、器壁夹层内、器壁铸造孔中、瘤状物脱落的凹坑内常可见到一些闪闪发光、密集排列在一起的颗粒物,多呈黑色、暗褐色,也有的呈紫红色(图三四~图三六)。在很多器壁脱落处露出的白绿色夹层之上也常常见(图三七)。在器物一些空心的部位内也常见,如有的鼎耳内部空心,其内表面密密麻麻平整堆积了一层闪亮的颗粒物(图三八)。疑为腐蚀过程中,器物内部的析出物。



图三七 白色夹层上的黑色闪亮颗粒图



图三四 夹层内黑色闪亮颗粒



图三八 耳内空心,内有黑色闪亮析晶颗粒



图三九 白色夹层上的绿色星点锈

### 8、绿色颗粒状锈

有些器物表面层脱落后露出之下的白绿色粉状夹层锈,在白绿色锈之上,除了可见黑色闪亮颗粒物外,还可见到一些星星点点的绿色颗粒状锈(图三九)。这些绿色颗粒状锈有时存在于曾经除过锈的部位上(图四〇),应为近期长出。



图四〇 除锈部位出现绿色星点锈

Almega)分析,结果见表二、表三。对样品上的特殊物质运用单晶X射线衍射仪(Bruker SMART APEX)、扫描电镜进行了分析。

便携x荧光能量色散分析和显微x荧光能量色散分析为无标样半定量分析。粉末X射线衍射分析也是半定量分析,所分析的样品量又很少,故检测出主要物质的大致含量,含量少的或结晶不好的物质并未完全给出。

### 2、湿法分析

为检测文物中氯离子的存在状况,采集每件文物上不同部位的样品,进行硝酸银定性分析,结果见表4。分析方法:将样品置入试管,加入2-3ml 1:10稀硝酸。样品酸化约十几小时后,将溶液过滤。加入0.1N AgNO<sub>3</sub>2-3滴后,观察反应现象。

## 三、腐蚀产物分析

### (一) 分析方法






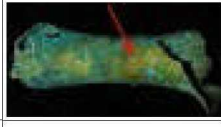





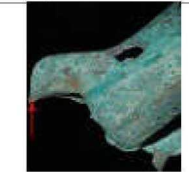

#### 1、仪器分析

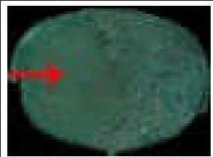




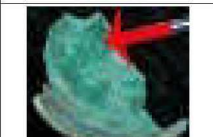
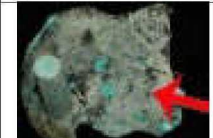

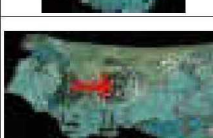



应用便携x荧光能量色散分析仪(NITONXLt3-800DPW)对每件出土青铜器的不同部位进行了原位检测分析,分析结果见表一。在青铜器上采集具有代表性的样品,运用显微x荧光能量色散分析仪(HORIBA XGT-7000V)、粉末X射线衍射仪(Dmax 12kW)、拉曼光谱仪(Thermo Nicolet

表一 便携x荧光能量色散仪原位分析结果



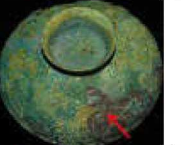

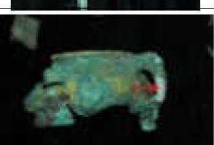


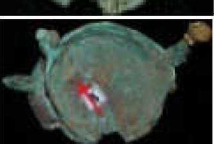
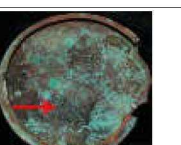



器物	检测部位	图示	主要成份含量				备注	分析结果
			Cu	Sn	Pb	Fe		
铜簋 M17:1	簋盖红色锈蚀		69.89	0.86	24.23	4.45	①主要成份:铜、锡、铅。 ②光亮漆古处锡含量非常高,铅含量也很高。 ③平整灰绿锈蚀处锡、铅含量很高,但低于光亮漆古处。 ④表面粗糙红锈部位主要含铜、铅,铅含量非常高。 ⑤器物表面铅含量普遍很高	
	簋盖浅绿色光亮漆古		23.71	41.83	20.61	10.58		
	簋身红色锈蚀		56.45	1.31	40.9	0.63		
	底部灰绿色较平整锈		37.46	34.66	17.47	7.44		

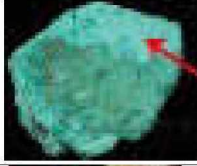




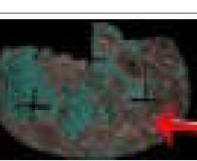
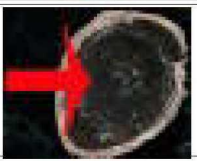


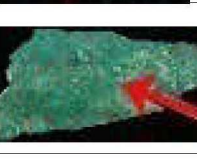



铜鼎 M17:2	腹部绿色鼓泡状锈		89.47	8.32	0.84	0.65		①主要成份:铜、锡、铅。 ②表面鼓泡状锈主要含铜、锡。 ③表面褐红色锈蚀处含较高的铅和铁。 ④浅绿色粉状锈处锡含量高,铅含量也相对其他部位高。
	腹部褐红色锈		56.9	0.32	12.14	29.86		
	底部断腿周围浅绿色锈		57.02	37.54	2.59	1.49		
	底部断腿坑内		80.06	17.81	0.73	0.49	较能反映基体成分	
	腿部与底部连接面		42.92	50.55	2.81	1.97		
铜觚 M18:1	器物表面黄绿漆古		34.27	52.85	2.6	8.63		①主要成份:铜、锡、铅。 ②光亮漆古处锡含量非常高。 ③灰白色粉状夹层锈处锡含量非常高。
	残洞周围灰白色夹层锈		37.7	57.73	3.01	0.32		
	底部蓝绿色锈蚀		75.28	19.74	1.83	0.6	较能反映基体成分	
铜爵 M18:2	腹部漆古		22.07	42.18	27.03	7.17		①主要成份:铜、锡、铅。 ②漆古处锡含量非常高,铅含量也较高。 ③表面所测的两个部位铅含量都较高。
	腿部断腿处		70.3	10.33	18.27	0.55		
铜觥 M18:3	腹部外侧		95.9	2.157	0.48	0.93		①主要成份:铜、锡,含少量铅。 ②光亮漆古处锡含量很高。 ③表面暗红色基体上平整绿色锈蚀处主要为含铜的矿物。
	口沿残片断面		78.71	19.51	0.93	0.27	较能反映基体成分	
	头部光亮黄绿漆古		67.49	27.43	0.64	3.62		

铜提梁卣 M18:4	底部铭文侧平整绿锈		79.05	17.18	0.39	2.55	较能反映基体成分	①主要成份:铜、锡,含少量铅。 ②光亮漆古处锡含量非常高。 ③绿色片状锈处含铜的矿物较多,也包含一定量含锡的矿物。
	口沿露基体处		59.47	35.45	1.13	2.59		
	提梁残断面		74.79	22.62	0.39	1.06		
	颈部黄绿漆古		51.5	38	0.79	8.01		
	盖外部黄绿漆古		56.4	35.69	0.3	6.3		
	盖内侧绿色锈		86.03	13.03	0.25	0.26		
铜鼎 M18:5	底部黑点		37.83	35.48	22.58	1.7		①主要成分:铜、锡、铅。 ②红色片状锈处含有较高的铅。 ③漆古光泽暗淡,锡、铅含量富集。 ④蓝色锈蚀层下的白色粉化层处,锡含量非常高,铅含量也很高。 ⑤腿部表面膨胀凸出的白色粉状锈处含有较高的锡、铅。 ⑥器物表面铅含量普遍较高。
	内侧发白处		19.39	50.56	24.85	2.89		
	口沿残片铭文处		25.48	41.58	28.9	1.74		
	口沿残片断茬处		79.34	15.3	3.92	0.45	较能反映基体成分	
	腿部灰白色粉状锈裂缝处		32.37	45.67	18.77	1.32		
	腿残片外壁红色		63.8	18.08	17	0.4		




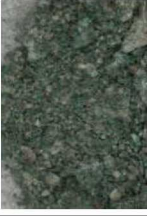


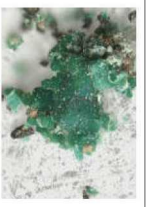



铜簋 M18:6	盖外表面漆古		31.69	37.48	22.01	6.97	<p>①主要成份,铜、锡、铅。 ②有光泽的和暗淡的漆古处锡、铅含量都很高很高,有光泽的漆古处锡、铅含量更高一些。 ③表面粗糙红色锈蚀处铅含量很高。 ④暗红色致密的基体表层中含铜高。 ⑤器表层下白色夹层中的粉状锈处锡含量非常高,铅也较高。 ⑥膨胀凸出器表的浅绿色粉状锈中锡、铅含量很高。 ⑦浅绿色粉状锈中的铜高于灰白色粉状锈,灰白色粉状锈中的锡高于浅绿色粉状锈,器表粉状锈中的铅高于内部夹层中的粉状锈。 ⑧器物表面铅含量普遍较高。</p>
	盖口沿深红色处		61.08	3.51	34.82	0.17	
	盖外表面去锈后的发红部位		37.64	29.78	29.9	1.17	
	口沿内侧红色		68.68	8.84	21.64	0.42	
	柄,露灰白色粉状夹层锈处		12.71	71.79	13.44	0.66	
	外壁绿色粉状锈处		36.02	34.34	28.27	0.53	
	底内铭文处黄绿色漆古		50.97	26.69	18.61	2.47	
	底外红色锈		41.73	36.63	18.91	1.72	
	盖内铭文周围暗红色致密锈		81.08	8.249	9.71	0.47	
铜尊形器 M18:7	外表面漆古处		61.45	31.2	0.65	5.09	<p>①主要成份:铜、锡,含有少量铅。 ②漆古处锡含量很高。 ③很厚的器壁夹层之中膨胀的粉状锈主要为含铜、锡的</p>
	内表面平整绿色锈		81.46	16.61	0.16	1.25	
	器壁粉状锈夹层断面		82.94	15.84	0.42	0.25	




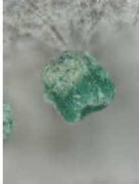



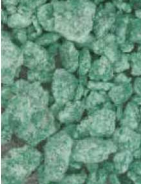


	残片内部的粉状锈		83.51	15.24	0.4	0.21		矿物。
	器底残片基体断面		82.6	15.32	0.31	0.58	较能反映基体成分	
铜甗 M18:8	外壁表面黄色漆古		34.55	31.21	21.28	11.37		①主要成份:铜、锡、铅。 ②漆古处锡含量很高,铅含量也很高。 ③表面上红色锈蚀层中含有很高的铅。 ④器物表面普遍含有较高的铅。
	外壁表面垫片		35.56	38.68	12.84	10.36		
	残片断面红色基体		61.69	9.87	27.08	0.6		
	篋子表面红色层状锈		16.14	0.84	82.18	0.17		
	腿内侧黑色部位		56.74	14.93	20.99	6.14		
	耳断面红色基体		75.5	2.47	15.08	6.01		
铜斗 M18:9	斗勺底表面(带薄锈)		34.11	53.97	3.33	7.23	①主要成份:铜、锡、铅。 ②器物表面锡含量很高。	
铜戈 M18:?	表面锈蚀		78.29	3.35	17.12	0.61	①主要成份:铜、锡、铅。 ②铅在器表富集。	
	断面露红色基体处		79.98	7.21	11.56	0.35		
备注:仪器型号:NITON XL13-800DPW。测试条件:最大电压 50KV;电流:40uA。测试模式:合金模式。所得数据只针对测试点。能谱分析为无标样半定量检测,数据仅供参考。								




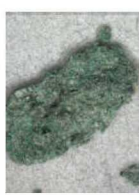

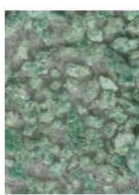



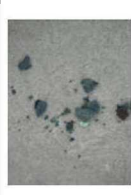

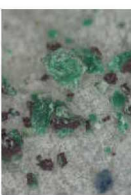




表二 显微 x 荧光能量色散分析和 X 射线粉末衍射分析结果

器物	样品编号	取样位置	样品描述	样品照片	测试点	显微能谱分析					X 射线衍射分析 主要物相
						Cu	Sn	Pb	Fe	Cl	
铜簋 M17:1	M17:1-1	 盖把手顶部浅绿色平整光亮漆古处	浅绿色粉末		整体粉末	20.75	46.06	23.61	7.94	0	
	M17:1-2	 足部浅绿色粉状锈	白、黄、绿颗粒组成的粉末,夹有红色颗粒		整体粉末	11.4	35.98	43.93	7.32	0	石英:14%;斜长石:35%;白铅矿:51%;含少量孔雀石
	M17:1-3	腹部背面大缺口上侧深绿色凸起锈	绿色粉末,夹有黄、白、红、黑等多色颗粒		整体粉末	81.94		15.93	2.13	0	石英:29%;斜长石:40%;白铅矿:5%;孔雀石:26%
	M17:1-4	腹部背面大缺口上侧深绿色锈层之下的红色锈	红、黄、白、绿、黑等多色颗粒组成的粉末		整体粉末	46.31	0.76	50.34	2.58	0	赤铜矿:31%;石英:6%;微斜长石:9%;云母:5%;白铅矿:50%
	M17:1-6	 腹部圈内侧绿色锈	块状,由绿、红、黑、白等多色矿物组成		整体锈块	93.52		4.14	2.34	0	赤铜矿:19%;石英:5%;孔雀石:76%
	M17:1-8	腹部残片	残片断面可见金属光泽的基体		金属基体	77.83	14.78	6.67	0.73	0	
	M17:1-10	 盖把手处红色锈(很薄一层)	鲜红色粉末		整体粉末	57.86	3.85	36.71	1.57	0	

遗产保护

铜甗 M18:3	(M18:3-1)-2 处  凸出表面的松软浅绿色锈蚀层	浅绿色粉末,含白色、绿色颗粒		整体粉末	99.82	0	0	0.18	0	SnO <sub>2</sub> (锡石) 约占 15%, CuCO <sub>3</sub> ·Cu(OH) <sub>2</sub> (孔雀石)约占 85%
提梁甗 M18:4	M18:4-1  提梁甗盖把手上坚硬蓝绿色锈	由蓝、绿、红色颗粒组成的粉末		整体粉末	98.78	0.84	0	0.18	0	
	M18:4-2  残片断面夹层内松软鲜绿色锈	绿色粉末,夹有少量蓝、红颗粒								
	M18:4-3 器身残块	残块,器壁膨胀,多层重叠,有的部位可见残余金属光泽的基体								
铜簋 M18:6	M18:6-4 器身残块	断面可见金属光泽		金属基体	79.78	14.77	5.31	0.14	0	
尊形器 M18:7	M18:7-1  底部的瘤状锈块	绿色块状,多层重叠结构		整体锈块	81.98	16.29	0.38	0.88	0	
	M18:7-2  残片夹层内侧松软浅绿色锈	浅绿色粉末,主要由白色、绿色组成								
M18:8-2	甗子表面上褐红色片状锈	片状,一面主要由黄、褐色组成,一面主要由红、白色组成		红	84.9	2.1	12.78	0.22	0	主要孔雀石,含少量锡石  白铅矿:51%;赤铜矿:49%
				暗红	52.66	0	47.29	0.05	0	
				鲜红	84.89	0	14.96	0.15	0	



M18:8-3a	 器口沿残片外表面暗绿色锈层	绿色片状,含土壤颗粒		整体锈片	92.84	0	4.4	2.76	0	孔雀石:40%;石英 26%;斜长石:20%;微斜长石 14%
M18:8-3b	 器口沿残片 3a 处内层松软浅绿色锈	浅绿锈粉末,主要由白、绿、黄色组成		整体粉末	24.42	33.9	40.21	0.94	0	孔雀石:42%;石英 13%;斜长石:10%;微斜长石 7%;白铅矿:28%
M18:8-4	 青铜残片表面坚硬蓝色锈	蓝色片状,一面主要由蓝、绿色组成,一面主要由红、白色组成		整体锈片	94.75	0	4.27	0.98	0	
M18:9-1	 斗柄根处蓝色锈	蓝色颗粒,含红、绿、黄色		整体粉末	92.29	6.47	0.52	0.72	0	
M18:9-2	 斗柄近根处绿色锈	绿色颗粒,含红、白、蓝色		整体粉末						赤铜矿:46%;孔雀石:54%
M18:9-3	 斗柄把头处夹层内松软白绿色锈	白色稍带绿色颗粒,夹杂有红色颗粒		整体粉末	10.39	89.61	0	0	0	赤铜矿:44%,锡石:56%
M18:?-2	 戈脊蓝绿色锈	片状,含蓝、绿、白、红、黑等多色,绿色锈下有较多红色锈		整体锈块						白铅矿:<1%;赤铜矿:99%;孔雀石:1%

备注:显微能谱分析为无标样半定量检测,数据仅供参考。能谱所测数据为除去土壤杂质的常见元素后所得的结果。X射线粉末衍射分析也是半定量分析,所分析的样品量又很少,故检测出主要物质的大致含量,含量少的或结晶不好的物质并未完全给出,衍射分析所给出的各成份含量仅供参考。很多样品中锡元素含量很少,但因样品量很高,但含锡量很少,含锡矿物的结晶度又不好(微晶锡石),衍射分析未给出结果。

表三 拉曼光谱分析结果

器物	分析部位	样品性状	分析点	分析结果	
铜觥 M18:3	(M18:3-1)-3 处凹坑内蓝色锈蚀层下的松软浅绿色层	浅绿色粉末,由绿色颗粒与白色颗粒组成	绿色	$\text{CuCO}_3 \cdot \text{Cu}(\text{OH})_2$ (孔雀石)	
			白色	纳米级微晶 $\text{SnO}_2$ (锡石)	
铜鼎 M18:5	(M18:5-1)-2 处致密凸起锈蚀层的蓝色锈蚀	蓝色粉末	蓝色	$2\text{CuCO}_3 \cdot \text{Cu}(\text{OH})_2$ (蓝铜矿)	
	鼎(M18:5-1)-3 处致密坚硬锈层,蓝、绿、棕、黄色锈蚀层层交叠	砖红色锈蚀层之上有绿色、蓝色、深蓝(蓝黑)色锈蚀	绿色	$\text{CuCO}_3 \cdot \text{Cu}(\text{OH})_2$ (孔雀石)	
			蓝色	$2\text{CuCO}_3 \cdot \text{Cu}(\text{OH})_2$ (蓝铜矿)	
			蓝黑色	蓝色	$2\text{CuCO}_3 \cdot \text{Cu}(\text{OH})_2$ (蓝铜矿)
				黑色	C(碳黑)
	(M18:5-1)-4 处夹层内松软灰白色锈蚀层,灰白色锈蚀层上有绿色点和黑褐色点	灰白色锈蚀层上有绿色星点锈和、黑褐色颗粒锈	灰白锈蚀	纳米级微晶 $\text{SnO}_2$ (锡石)	
			绿色颗粒	$\text{CuCO}_3 \cdot \text{Cu}(\text{OH})_2$ (孔雀石)	
黑褐色颗粒			$\text{Cu}_2\text{O}$ (赤铜矿)		
鼎(M18:5-1)-6 夹层内松软灰白色锈蚀层	灰白粉末	灰白锈蚀	纳米级微晶 $\text{SnO}_2$ (锡石)		
铜簠 M18:6	(M18:6-1)-2 处残块表面绿色锈蚀	绿色粉末夹杂白色颗粒	绿色	$\text{CuCO}_3 \cdot \text{Cu}(\text{OH})_2$ (孔雀石)	
			白色	$\text{PbCO}_3$ (白铅矿)	
铜甗 M18:8	(M18:8-1)-2 处致密坚硬锈层,蓝、绿、棕、黄色锈蚀层层交叠处的黄色锈蚀	黄色锈蚀实际由白色颗粒与黄色颗粒混合组成。	白色	$\text{PbCO}_3$ (白铅矿)	
			黄色	$\beta\text{-PbO}$ (密陀僧)	
	(M18:8-1)3 处松软浅绿色层	浅绿色粉末,由绿色颗粒与白色颗粒组成	绿色	$\text{CuCO}_3 \cdot \text{Cu}(\text{OH})_2$ (孔雀石)	
			白色	纳米级微晶 $\text{SnO}_2$ (锡石)	
	(M18:8-3)-1 红棕色锈蚀	红棕色锈蚀实际由白色颗粒、红色颗粒与黄色颗粒混合组成	白色	$\text{PbCO}_3$ (白铅矿)	
			红色	$\text{Cu}_2\text{O}$ (赤铜矿)	
黄色			$\beta\text{-PbO}$ (密陀僧)		



## (二) 分析结果

### 1、铜器主要成份

该批器物中均检测出 Cu、Sn、Pb，且含 Sn 量都 很高。部分器物含 Pb 较高，为铜锡铅三元合金。另一 部分器物含 Pb 则较少，为铜锡合金。

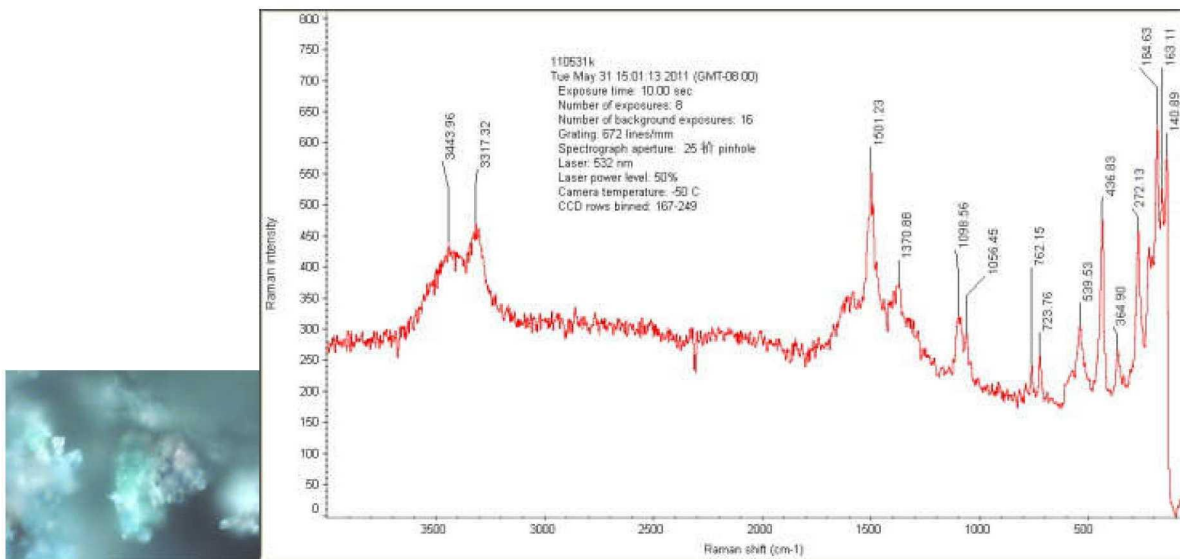
### 2、漆古与平整的表面层

器物表面光亮致密的漆古处 Sn 含量都非常高， 含 Pb 多的器物在漆古中富集有很高的 Pb。漆古处 Fe 的含量常常也较高。便携能谱在器物表面进行的 原位分析显示漆古处 Sn 含量常可达到近 30%以上， 显微能谱分析显示同样结果。

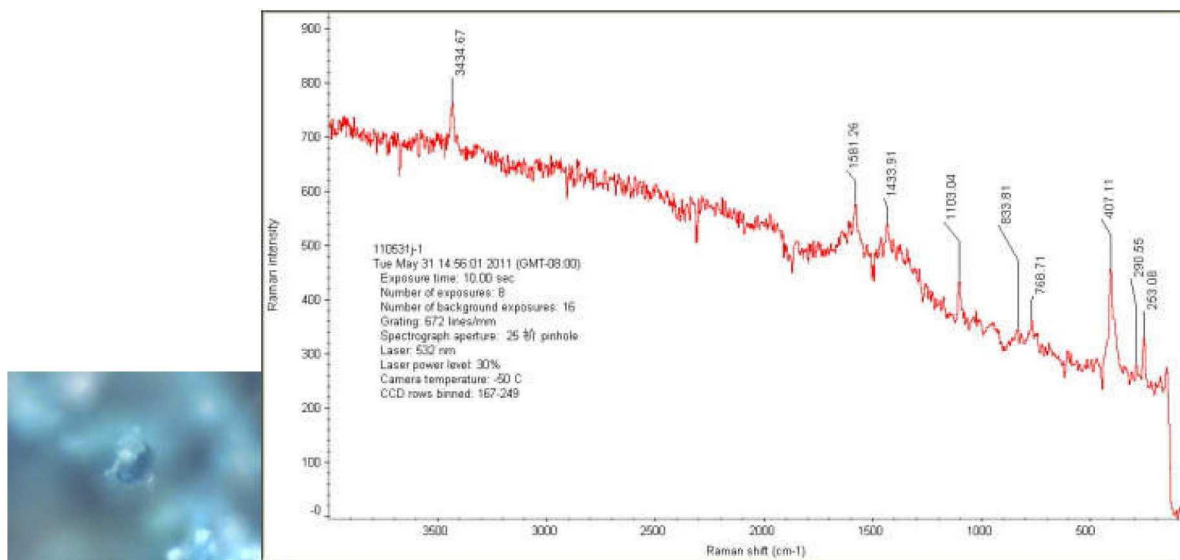
器物表面绿色、灰绿色、白绿色、黄白色致密平 整无光泽的基体表层或光泽暗淡的漆古处通常也富 集有很高的 Sn 及 Pb，但 Sn、Pb 含量比同器物光亮 致密的漆古处要低一些。

### 3、表面坚硬粗糙的蓝色锈、绿色锈

显微镜下观测，采集的蓝色、绿色样品并非单一 纯净，除土壤杂质外，蓝色锈中夹杂有绿、白、红等 色，绿色锈中也夹杂有白、蓝、红等其他颜色的物质。 显微能谱分析绿色、蓝色锈中主要含 Cu，杂有少量 的 Sn、Pb（除去土壤杂质后），粉末衍射分析显示绿 色锈主要为孔雀石（ $\text{CuCO}_3 \cdot \text{Cu}(\text{OH})_2$ ），夹有少量白



图四一 鼎(M18:5-1)第3处的绿色锈蚀微观形态及拉曼光谱图<sup>®</sup>  
(分析结果： $\text{CuCO}_3 \cdot \text{Cu}(\text{OH})_2$ (孔雀石))



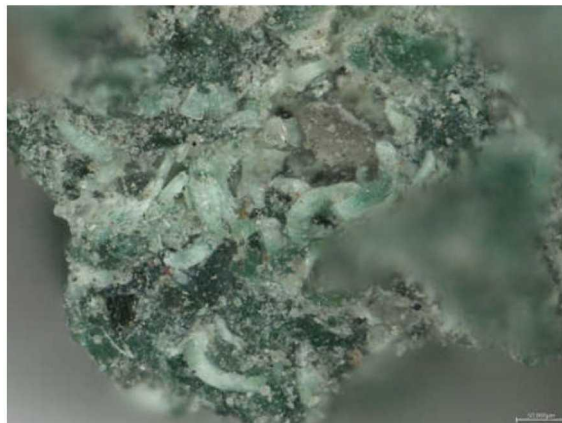
图四二 鼎(M18:5-1)第3处的蓝色锈蚀微观形态及拉曼光谱图<sup>®</sup>  
(分析结果： $2\text{CuCO}_3 \cdot \text{Cu}(\text{OH})_2$ (蓝铜矿))

铅矿( $PbCO_3$ )、赤铜矿(表2)。拉曼光谱分析其中的绿色点为 $CuCO_3 \cdot Cu(OH)_2$ (孔雀石),蓝色点为 $2CuCO_3 \cdot Cu(OH)_2$ (蓝铜矿),夹杂的白色点为纳米级微晶 $SnO_2$ (锡石)或 $PbCO_3$ (白铅矿),夹杂有黑色的碳黑(表三)。

三维视频显微镜下还观测到该批青铜器蓝色、绿色锈蚀上有一特殊现象,即在蓝色、绿色锈块中析出有条索状弯弯曲曲并带有丝绸光泽的晶体,呈白绿色、白色、绿色(图四三、图四四、图四六)。扫描电镜显示这种弯曲晶体中主要含Cu、C、O(Cu:53.46%、O:30.11%、C:13.84%、Si:1.39%、Al:1.21%),图四四。单晶X射线衍射分析其成分为孔雀石,图四五、图四六。其形成机理有待进一步研究。

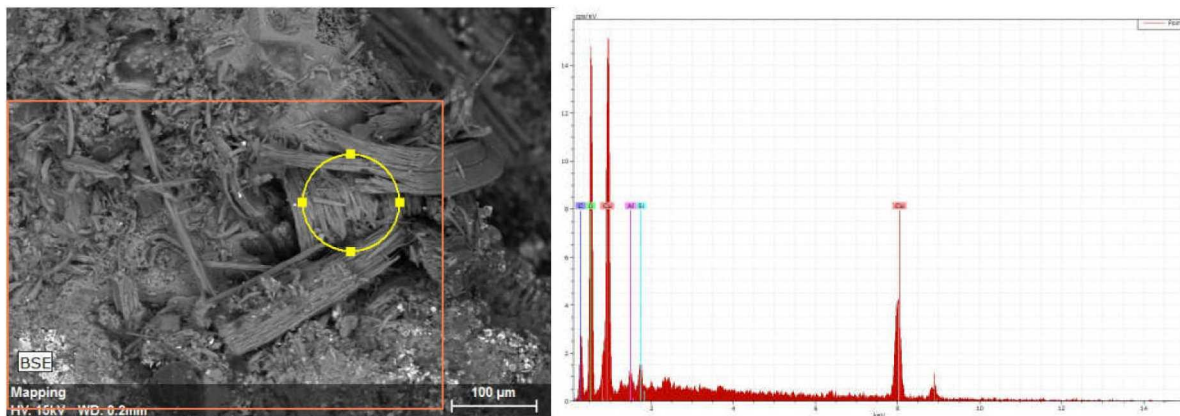
#### 4、器表粗糙的红色锈、黄褐锈

铜器表面红色、暗红、红棕、黄褐等粗糙的锈蚀产物中主要含Cu、Pb,Pb的含量非常高。衍射分析

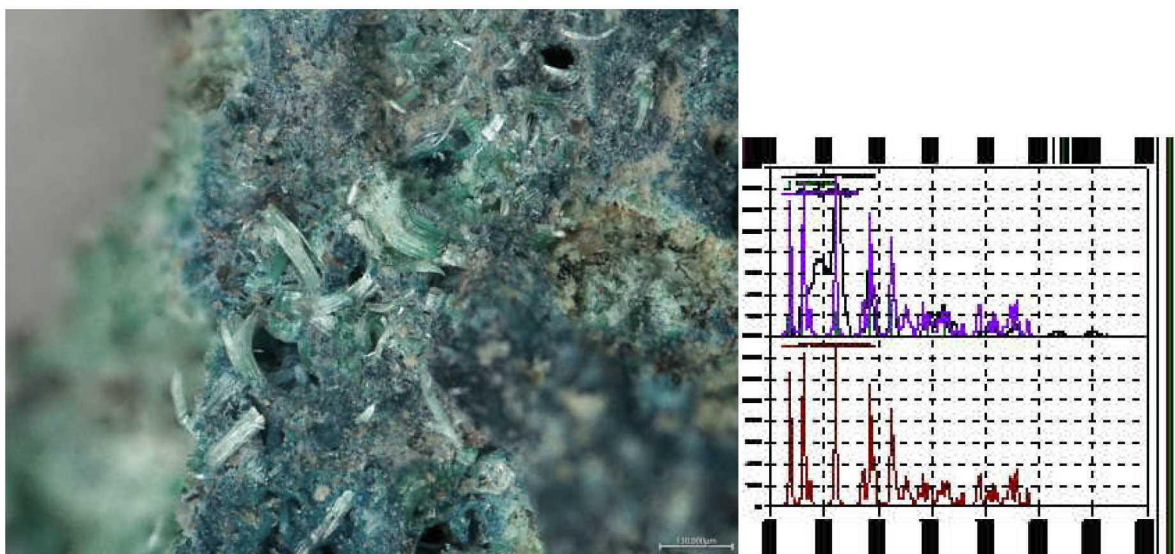


图四三 样品 M17:1-3 绿锈上的弯曲晶体

显示该处主要含白铅矿( $PbCO_3$ )和赤铜矿( $Cu_2O$ )。显微镜下看红色锈蚀层通常是由红、黄、棕、白等多种颜色锈蚀物相互夹杂堆叠而成,图四七、图四八。单晶X射线衍射分析显示红色锈蚀为赤铜矿

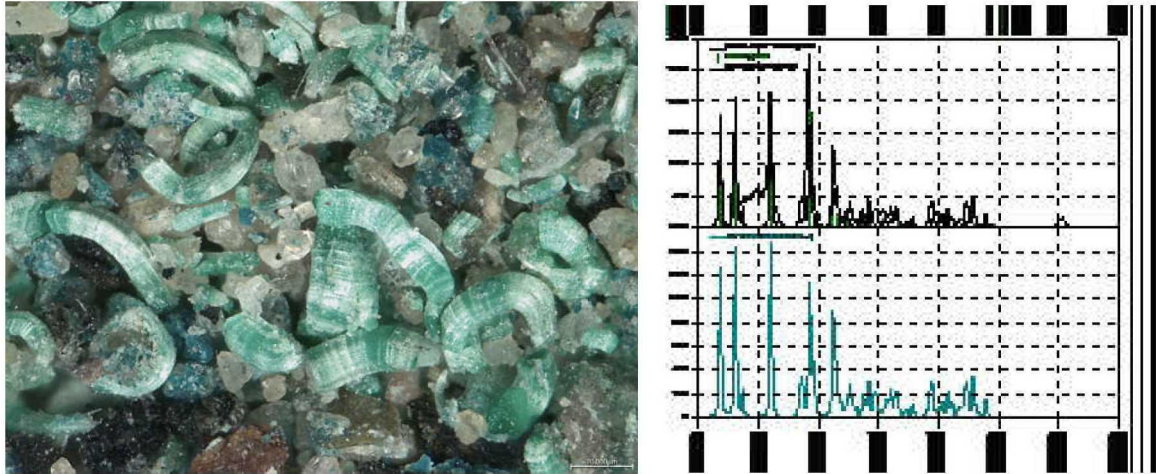


图四四 样品 M17:1-3 弯曲晶体的扫描电镜分析



图四五 样品 M17:1-3 弯曲晶体的扫描电镜分析

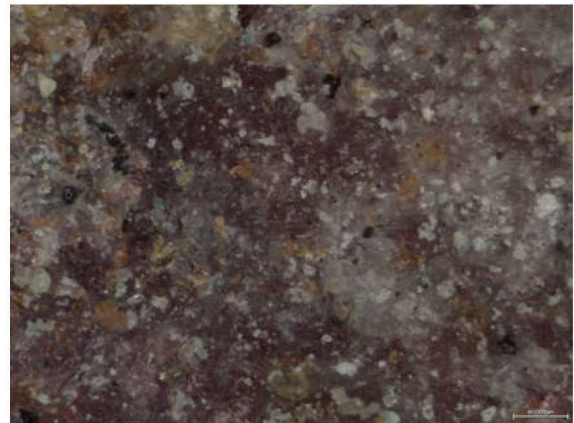




图四六 铜簠(M18:6)绿锈中的弯曲晶体,单晶衍射分析为孔雀石



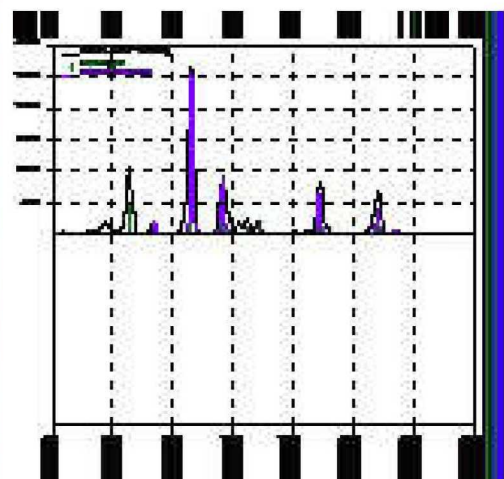
图四七 残片断面,表面上红锈夹有黄、白、棕等



图四八 红色锈蚀层



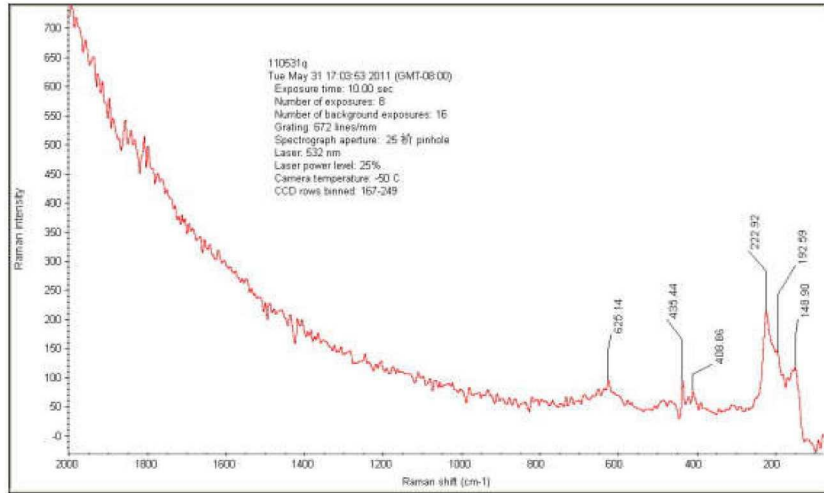
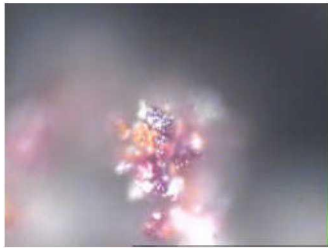
图四九 样品 M18:8-2 单晶衍射分析红色锈蚀为赤铜矿( $\text{Cu}_2\text{O}$ )



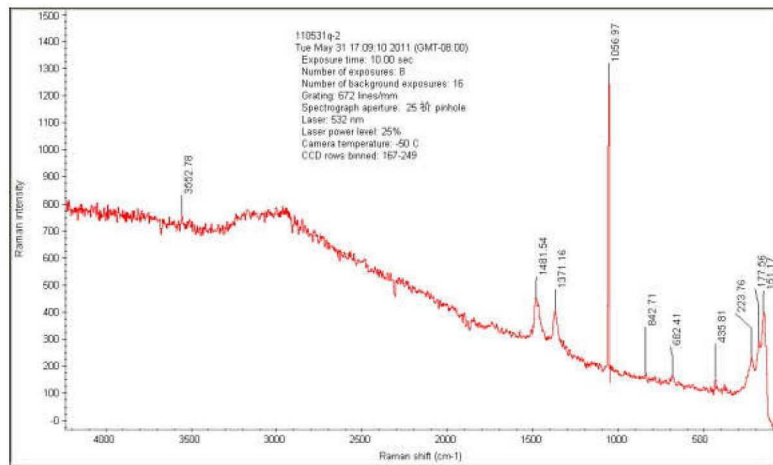
( $\text{Cu}_2\text{O}$ ),图四九。拉曼光谱分析显示,红色物为赤铜矿( $\text{Cu}_2\text{O}$ )(图五〇),白色物为白铅矿( $\text{PbCO}_3$ )(图五一),黄色物为密陀僧( $\beta\text{-PbO}$ )(图五二),表三。赤铜矿、白铅矿、密陀僧通常同时存在。

#### 5、松软细腻的粉状锈

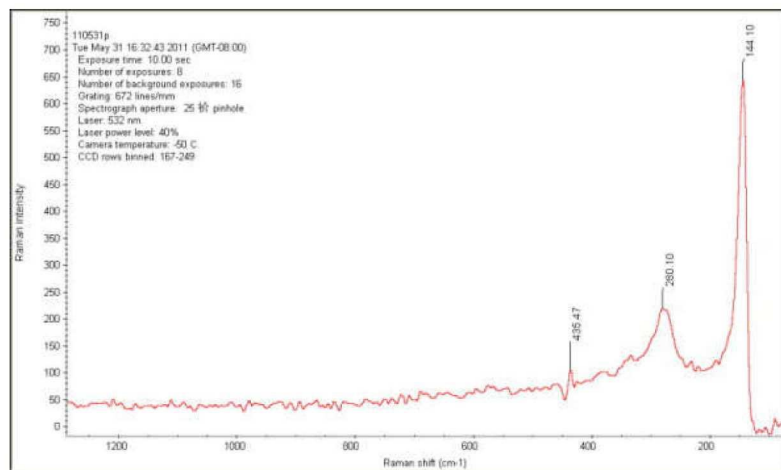
无论存在于器表还是器物内部夹层中的粉状锈,主要含 Cu、Sn,含 Pb 铅较多的器物在粉状锈中也含有大量 Pb。器表粉状锈中的 Pb 高于内部夹层



图五〇 甌(M18:8-3)第1处红棕色锈蚀微观形态及红色颗粒拉曼光谱图<sup>⑤</sup>  
(分析结果:  $\text{Cu}_2\text{O}$  (赤铜矿))



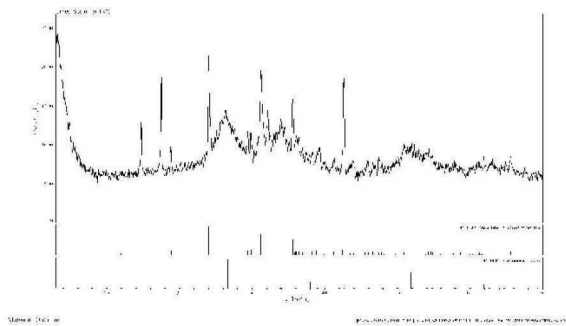
图五一 甌(M18:8-3)第1处红棕色锈蚀微观形态及白色颗粒拉曼光谱图<sup>⑤</sup>  
(分析结果:  $\text{PbCO}_3$  (白铅矿))



图五二 甌(M18:8-1)第2处黄色锈蚀中黄色颗粒微观形态及拉曼光谱图<sup>⑤</sup>  
(分析结果:  $\beta$ - $\text{PbO}$  (密陀僧))

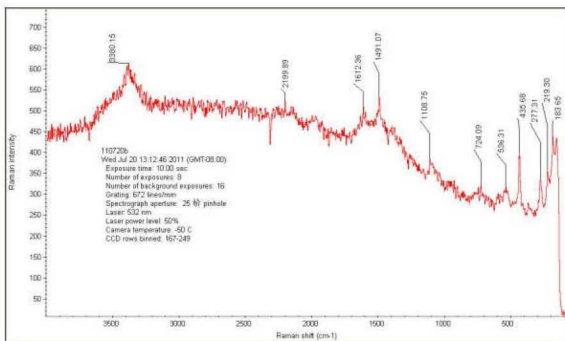


中的粉状锈。粉状锈颜色越绿含 Cu 越高,颜色越白含 Cu 越低而含 Sn(及 Pb)则越高,鲜绿色夹层中的粉状锈几乎全为 Cu,而灰白色粉状锈夹层中的 Sn 含量尤其特别高。粉末 X 射线衍射分析显示粉状锈中含孔雀石( $\text{CuCO}_3 \cdot \text{Cu}(\text{OH})_2$ )、锡石( $\text{SnO}_2$ )、白铅矿( $\text{PbCO}_3$ ),表二。显微分析显示,粉状锈主要由白色、绿色颗粒组成,颜色越白则白色颗粒越多而绿色颗粒越少。拉曼光谱分析纯白色颗粒为纳米级微晶  $\text{SnO}_2$ (锡石),绿色颗粒为  $\text{CuCO}_3 \cdot \text{Cu}(\text{OH})_2$ (孔雀石), (图五五),表三。三维视频显微分析结合能谱分析、x 衍射分析及拉曼光谱分析结果可知,含 Sn 但不含 Pb 的粉状锈中的白色颗粒仅有纯白色一种,为纳米级微晶锡石,而含 Sn 但也检测出白铅矿的粉状锈所含的白色颗粒除纯白色的以外,还有大量白色微发黄的颗粒,推测其为白铅矿(图五六~图五九)。器壁灰白色夹层中的粉状锈几乎全部纳米级微晶为



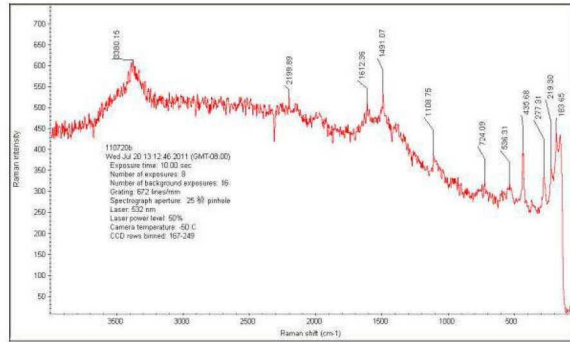
图五三 觥(M18:3-1)第2处浅绿色锈蚀粉末 XRD 图谱<sup>⑤</sup>

分析结果:  $\text{SnO}_2$ (锡石)占 15%,  
 $\text{CuCO}_3 \cdot \text{Cu}(\text{OH})_2$ (孔雀石)占 85%



图五四 觥(M18:3-1)第3处浅绿色锈蚀粉末中绿色颗粒拉曼光谱图<sup>⑤</sup>

分析结果:  $\text{CuCO}_3 \cdot \text{Cu}(\text{OH})_2$ (孔雀石) 锡石。



图五五 觥(M18:8-1)第3处浅绿色锈蚀粉末中白色颗粒拉曼光谱图<sup>⑤</sup>  
分析结果: 纳米级微晶  $\text{SnO}_2$ (锡石)

### 6、闪亮颗粒物

器身上黑色、暗褐色等闪闪发光的颗粒物,在显微镜下看,实际为暗红色、几何形状规则,结晶良好的晶体,呈四方块状、多面球状、扁片状,尺寸在几十至几百微米不等,相互聚集在一起(图六〇~图六



图五六 样品 M18:7-2, Cu: 86.34%,  
Sn: 12.88%, Pb: 0.33%

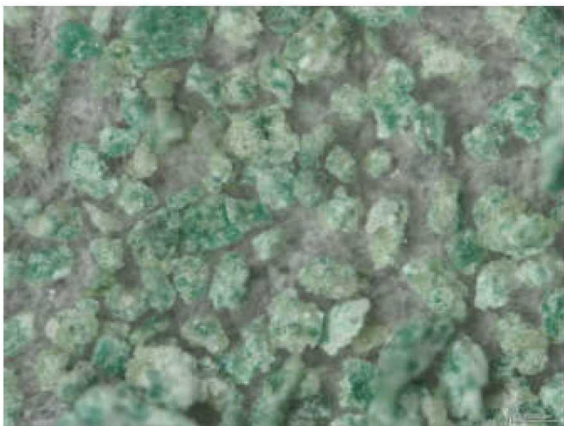


图五七 样品 M18:9-3, Cu: 10.39%,  
Sn: 89.61%





图五八 样品 M17:1-2, Cu: 11.4%, Sn: 35.98%, Pb: 43.93%, 含大量白铅矿



图五九 样品 M18:8-3b, Cu: 24.42%, Sn: 33.9%, Pb: 40.21%, 含大量白铅矿

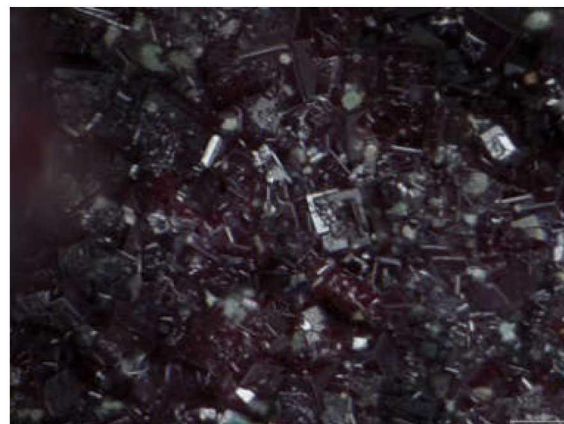
二)。因光滑的几何平面对光的反射作用而发光。有些晶体还带一定金属光泽,图六三。拉曼光谱、单晶衍射分析其成分为赤铜矿( $\text{Cu}_2\text{O}$ ),图六四。金属光泽是晶体表面的锈色,稍微擦拭就会丧失。赤铜矿晶体一般存在于器物上相对密闭的空间内,它的析出应与还原环境有关。



图六〇 四方块状晶体



图六一 多面球状晶体



图六二 扁片状晶体



图六三 片状带金属光泽晶体

#### 7、绿色颗粒状锈

存在于粉状夹层锈之上的星星点点的颗粒状绿锈,拉曼光谱分析其成分为  $\text{CuCO}_3 \cdot \text{Cu}(\text{OH})_2$  (孔雀石),图六四。

#### 8、氯离子存在状况

以上仪器分析该批器物及样品,未检测出氯元素及含氯的矿物。为了解青铜器中氯离子的存在状况,又对各青铜器的不同部位进行采样,进行硝酸银定性分析,表四。

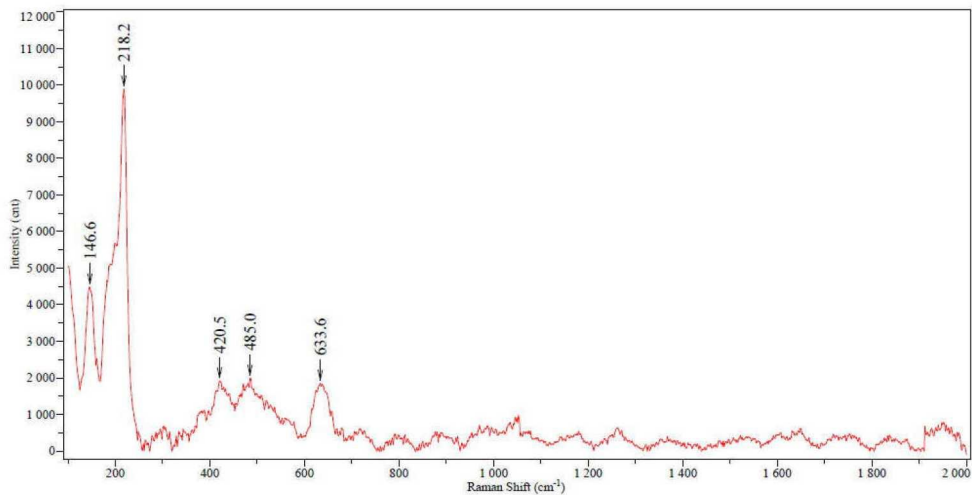
表四 硝酸银定性分析结果

器物	检测部位	样品描述	滴定现象	氯离子存在情况	分析结果
铜簋 M17:1	簋身内侧	绿色块状锈	溶液清澈	无	在表面硬结物和泡状锈处有少量氯离子存在。其它部位基本不含氯离子。
	簋身内侧	红色块状锈	溶液清澈	无	
	簋底	表面硬结物	溶液很轻微浑浊	很少	
	簋身外侧腹部	绿色层状锈	溶液清澈	无	
	簋底	土质硬结物	溶液很轻微浑浊	很少	
	簋盖边缘与器身锈蚀在一起的部位	绿色块状锈	溶液清澈	无	
	簋盖内侧	绿色水泡状锈	溶液很轻微浑浊	很少	
	簋盖内侧	红色水泡状锈	溶液很轻微浑浊	很少	
铜鼎 M17:2	腹部外侧	鼓泡状绿色锈	溶液轻微浑浊	很少	含氯离子很少。
	腹部外侧	红色片状锈	溶液极轻微浑浊	极少	
	残片断面绿锈之下	一层白色锈	溶液极轻微浑浊	极少	
	腹部内侧底部	堆积蓝色厚锈	溶液极轻微浑浊	极少	
	腹部内侧底部	堆积绿色厚锈	溶液极轻微浑浊	极少	
	左足	绿色杂锈	溶液极轻微浑浊	极少	
铜觚 M18:1	腹部缺口夹层内	白绿色粉状锈	溶液极轻微浑浊	很少	含氯离子很少。
	腹部缺口夹层断面	绿色星点锈	溶液极轻微浑浊	极少	
	圈足	绿色堆积锈	溶液极轻微浑浊	极少	
	腹部内壁	堆积杂锈	溶液极轻微浑浊	极少	
铜爵 M18:2	侧腹壁内侧	红色片状堆积	溶液浑浊	较多	整体含氯离子较少,个别部位较多。
	盩手残片内壁	较厚浅绿色粉末状锈蚀物	溶液很轻微混浊	很少	
	口沿残片内壁	绿色片状堆积锈蚀	溶液很轻微浑浊	很少	
	腹外壁	蓝色堆积锈蚀	溶液很轻微浑浊	很少量	

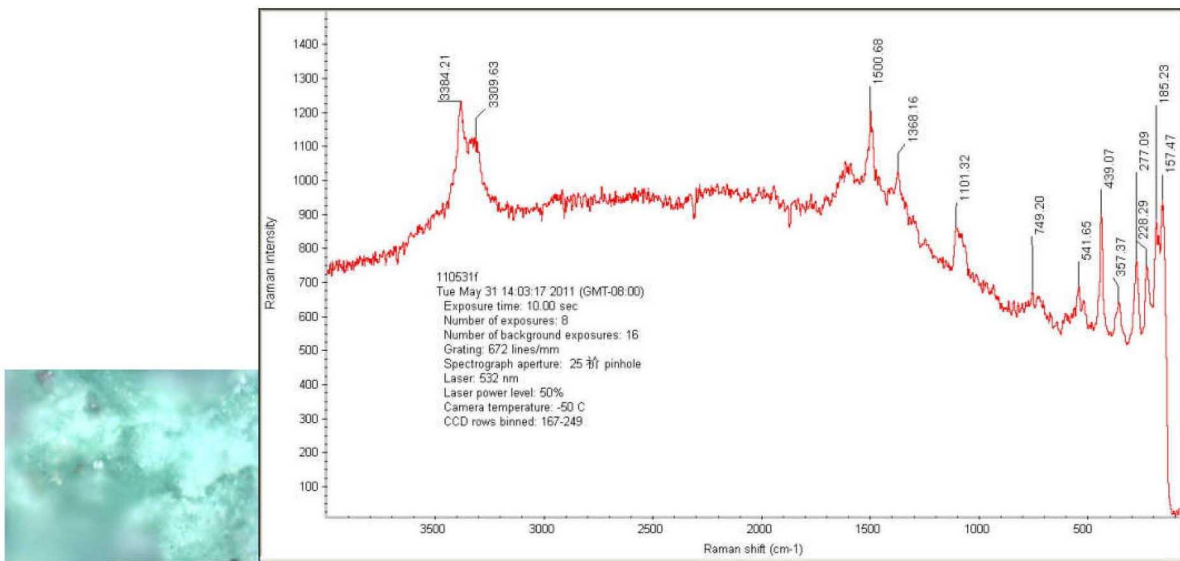
	带柱残片口沿外壁	土质硬接物	溶液清澈	无	
	口沿外壁	较疏松表面硬接物 (含土、红锈、绿锈)	溶液轻微浑浊	少量	
铜甗 M18:3	兽头部表层基体脱落后的凹坑	白色夹层	溶液混浊,有白色絮状物生成	较多	含有氯离子,白色粉状夹层处氯离子含量较多。
	兽头部表层基体脱落后的凹坑	白色层上的绿色锈蚀	溶液略混浊	少量	
	器身内侧瘤状锈	鼓泡状发锈	溶液略混浊	少量	
	器盖补铸处	层状堆积厚锈	溶液略混浊	少量	
	器身口沿残片	硬结物、堆积厚锈、及白色夹层	溶液略混浊	少量	
	瘤状物残渣	疏松脆弱	溶液混浊	少量	
铜提梁卣 M18:4	系除锈凹坑处	白色夹层	溶液略混浊	有	含有氯离子,局部粉状锈处较多
	系除锈凹坑处	浅绿色锈蚀	溶液混浊	较多	
	系耳处	浅绿色锈蚀	溶液很轻微混浊	很少	
	另一侧系耳	疏松蓝色锈蚀	溶液很轻微混浊	很少	
	器底带铭文一面	凸起瘤泡状锈	溶液很轻微混浊	很少	
	残渣	多重层状锈	溶液很轻微混浊	很少	
	圈足处残渣	矿化严重,层状堆积	溶液很轻微混浊	很少	
	土块及铜渣		溶液极轻微混浊	很少	
铜鼎 M18:5	带耳小残片器壁	泡状绿锈	溶液混浊,有白色絮状物生成	有	含有氯离子,局部含量较多
	带耳小残片器壁	较疏松的浅绿色、蓝色层状堆积	溶液混浊,有白色絮状物生成	有	
	带耳大残片	除锈后露出的白色夹层	溶液轻微混浊	少量	
	器底残片内侧底部	绿色层状堆积及其下浅绿基体表层	溶液混浊,有大量白色絮状物生成	较多	
	器底残片外侧底部	较厚的浅绿锈蚀堆积	溶液混浊,有白色絮状物生成	有	
	鼎腿表面	较厚的浅绿粉状锈	溶液轻微混浊	少量	



铜簋 M18:6	耳部表层脱落后露出的白色夹层	白色粉末状	溶液轻微混浊	有	整体含氯离子较多,尤其在疏松膨胀、开裂的厚锈中及硬结物、附着土中含量较多。
	器腹残片外壁	疏松膨胀绿锈	溶液混浊	较多	
	足部	绿色硬结物	溶液混浊	较多	
	底外侧	浅绿色开裂厚锈	溶液混浊	较多	
	底内壁	鼓泡状锈瘤	溶液轻微混浊	有	
	盖内壁	绿锈	溶液混浊	较多	
	土块及铜渣		溶液极混浊	大量	
尊形器 M18:7	杂锈		溶液混浊	有	含有氯离子,局部较多。瘤状厚锈处有较多氯离子。
	口沿残片	锈瘤	溶液混浊,有白色絮状物生成	较多	
	口沿残片层状剥离处	白色夹层	溶液混浊	有	
	残渣	浅绿厚锈	溶液混浊	有	
	发锈夹层内	鲜绿色	溶液轻微混浊	少量	
	口沿残片腐蚀较重	堆积较厚的绿锈、蓝锈	溶液轻微混浊	少量	
	底部发锈	锈瘤	溶液混浊	有	
	口沿残片	堆积蓝锈层及其下浅绿夹层	溶液混浊	有	
铜甗 M18:8	带鬲腿部外壁	黑色附着物,	溶液略混浊	少量	整体含氯离子较多,尤其在表面硬结物、附着土中含量较多。
	器身内壁	土质硬结锈蚀层	溶液混浊,有白色絮状沉淀	较多	
	外壁口沿	蓝色锈蚀层	溶液略混浊	少量	
	口沿残片外壁	蓝色表面硬结物	溶液混浊	有	
	口沿残片内壁	蓝色表面硬结物	溶液混浊,有白色絮状沉淀	较多	
	带耳残片耳根周围	绿色锈	溶液略混浊	少量	
	算子残片	浅绿色锈蚀	溶液混浊,有白色絮状沉淀	较多	
	断腿残块表面	较厚的硬结物	溶液混浊	有	



图六四 拉曼光谱分析结果为赤铜矿(Cu<sub>2</sub>O)



图六五 鼎(M18:5-1)-4处灰白色锈蚀坑中的绿色颗粒拉曼光谱图<sup>⑤</sup>  
分析结果:CuCO<sub>3</sub>·Cu(OH)<sub>2</sub>(孔雀石)

分析结果显示：所有器物均检测出有氯离子存在，但大部分器物中氯离子的含量很少；另有几件器物局部含有较多氯离子。铜器表面硬结物、土壤附着物、膨胀开裂的厚锈、瘤状锈中的氯离子含量通常较多一点。

#### 四、结论

山东高青陈庄遗址M17、M18出土的青铜器，典型的腐蚀特点是外观颜色普遍较浅，普遍带有光亮的漆古，层状腐蚀现象十分显著。

铜器的主要腐蚀产物有：赤铜矿、孔雀石、蓝铜矿、微晶锡石、白铅矿、密陀僧。赤铜矿主要存在形式为：器物表层及内部的红色基体、片状的表面锈、

密闭孔隙内的闪亮晶体等。孔雀石主要存在形式为表面上的无定形锈、表面锈中的弯曲晶体、表面及内部粉状锈内的微颗粒等。蓝铜矿主要为表面及内部的蓝色锈。微晶锡石与白铅矿颗粒存在于表面及内部的粉状锈中、表面漆古内、表面锈内。黄色密陀僧颗粒通常在表面锈中与赤铜矿、白铅矿伴生。

铜器中的Sn、Pb成份趋于在器物表面富集，其腐蚀产物微晶锡石和白铅矿颜色均发白，应是铜器外观颜色普遍较浅的主要原因。多种锈蚀层之间都有粉状夹层。器表和器壁内部粉状锈主要成分为微晶锡石、孔雀石，及白铅矿，未发现氯铜矿、副氯铜矿等含氯的矿物。但器物中仍有氯离子存在，铜器表

下转 第 224 页

② Cassen, S. and Weller, O. 2013. Idées et faits relatifs à la production des sels marins et terrestres en Europe, du VI<sup>e</sup> au III<sup>e</sup> millénaire. In: Soares, J. ed. Prehistory of Wetlands. Landscapes of salt. Setúbal Arqueológica 14. Setúbal: Museum of Archaeology and Ethnography of the District of Setúbal (MAEDS), 255-304.

③ Gouletquer, P. and Kleinmann, D. 1976. Structure sociale et commerce du sel dans l'économie touarègue. Revue de l'Occident musulman et de la Méditerranée 21, 131-139.

④ Gouletquer, P. and Kleinmann, D. 1984. Les salines du Manga. Techniques & Culture 3, 1-42.

- Gouletquer, P., Kleinmann, D. and Weller, O. 1994. Sels et techniques. In: Daire, M.-Y. ed. Le sel gaulois. Dossiers de Centre de Recherche Archéologique d'Alet, Suppl. Q, 123-161.

⑤ Harding, A., 2013. Salt in Prehistoric Europe. Leiden: Sidestone Press.

⑥ Pétrequin, A.-M. and Pétrequin, P., in coll. with Weller, O. 2006. Objets de pouvoir en Nouvelle-Guinée. Catalogue de la donation Pétrequin au Musée des Antiquités Nationales, Saint-Germain-en-Laye. Paris: Réunion des Musées Nationaux.

⑦ Pétrequin, P. and Weller, O. 2008. L'exploitation préhistorique des sources salées dans le Jura français. Application et critiques d'un modèle prédictif. In: Weller, O., Dufraisse,

A. and Pétrequin, P. eds. Sel, eau et forêt. D'hier à aujourd'hui. Cahiers de la MSHE 12. Besançon: Presses Universitaires de Franche-Comté, 255-279.

⑧ Pétrequin, P., Weller, O., Gauthier, E., Dufraisse, A. and Piningre J.-F. 2001. Salt springs exploitations without pottery during Prehistory. From new Guinea to the French Jura. In: Pétrequin, P. and Beyries, S. eds. Ethno-archaeology and its transfer. BAR International Series 983. Oxford: Archaeopress, 37-65.

⑨ Weller, O. 2002. Aux origines de la production du sel en Europe. Vestiges ; fonctions et enjeux archéologiques. In: Weller, O. ed. Archéologie du sel: techniques et sociétés dans la Pré et Protohistoire européenne. Internationale Archaologie, ASTK 3. Rahden: VML GmbH, 163-175.

⑩ Weller, O. 2007. Exemples ethnographiques d'organisation du travail : les différentes exploitations de sel en Nouvelle-Guinée. Techniques & Culture 46-47, 51-61.

⑪ Weller, O., Pétrequin, P., Pétrequin, A.-M. and Couturaud, A. 1996. Du sel pour les échanges sociaux. L'exploitation des sources salées en Irian Jaya (Nouvelle-Guinée, Indonésie). Journal de la Société des Océanistes 102, 1, 3-30.

#### 注释:

①用咸水淋洗过的盐土含盐量比咸水更大。

上接第 286 页

面硬结物及土壤附着物中氯离子相对较多,青铜器受埋藏环境的影响,腐蚀矿化较重。

致谢:本工作在样品采集及检测分析方面得到国家博物馆马燕如研究馆员、杨小林研究馆员的大力帮助,在此表示衷心感谢!

参考文献:

①高明奎、魏成敏、蔡友振、王振:《山东高青县陈庄西周遗址发掘简报》,《考古》2011年第2期。

②高明奎、魏成敏、蔡友振、王振:《山东高青县陈庄西周遗址》,《考古》2010年第8期。

③《山东高青陈庄西周遗址考古发掘获重大收获》,《中国文物报》2010年2月5日。

④《WW/T 0004-2007,馆藏青铜器病害与图示》,文物出版社,2008年。

⑤胡东波:《文物的x射线成像》,科学出版社,2012年。