

大井矿冶遗址冶炼产物的输出方向

魏国锋¹, 秦 颖¹, 王昌燧², 刘 博³, 王 刚⁴

1. 中国科学技术大学 科技史与科技考古系, 合肥 230026; 2. 中国科学院 研究生院, 北京 100049;
3. 辽宁省博物馆, 沈阳 110003; 4. 内蒙古林西县文物管理处, 内蒙古 林西 025200

摘要: 大井矿冶遗址是我国北方发现最早的一处古铜矿遗址。本文利用 ICP 方法, 测试了该遗址的铜矿、炼渣和辽西地区出土的部分青铜器。结果显示, 遗址的冶炼金属产品 Ag、As、Sb、Bi、Co、Zn 等元素含量偏高, Mo 含量偏低。同时发现, 这批辽西地区出土的青铜器样品微量元素特征明显不同于铜绿山和皖南的铜锭, 而与大井铜矿很相似, 其铜料来源很可能来自大井古铜矿或其周边铜矿。这一结论, 对探讨大井古铜矿冶炼产品的使用范围和辽西地区的冶金历史有重要意义。

关键词: 矿料来源; 青铜器; 大井矿冶遗址; 微量元素

中图分类号: K85 文献标识码: A 文章编号: 1007-2802(2006)03-0254-06

Exportation Route of the Smelting Products from the Dajing Mining and Smelting Relic Site

WEI Guo-feng¹, QIN Ying¹, WANG Chang-sui², LIU Bo³, WANG Gang⁴

1. *Department of Scientific History and Archaeometry, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China;* 2. *College of Humanities and Social Science, Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;* 3. *Liaoning Museum, Shenyang 110003, China;*
4. *Culture Relics Management Office of Linxi County, Inner Mongolia, 025200, China*

Abstract: The Dajing copper mining and smelting relic site is the earliest one found in the northern China. Copper ores and slag collected from the Dajing site, and bronze vessels excavated in western Liaoning Province were analyzed by using Inductively Coupled Plasma Atomic Emission Spectrometer (ICP-AES). The results have shown that the smelting metallic products of the Dajing site are characterized of relatively high contents of Ag, As, Sb, Bi, Co, Zn and low contents of Mo. Meanwhile, the features of trace elements of the bronze vessels from the western Liaoning are similar to those of the ores from the Dajing site, but obviously different to those of the copper ingots produced from the Tonglushan and other sites in the southern Anhui. It is believed that the copper of these bronze vessels was possibly from the Dajing site or those ancient copper ore deposits nearby. This is very helpful for studying the exportation range of the products from the Dajing ancient copper smelting site and the metallurgical history in the western Liaoning Province.

Key words: provenance; bronze; the Dajing site of mining and smelting; trace element

原昭乌达盟地质队 204 分队于 1962 年发现的大井古矿冶遗址位于赤峰市林西县官地乡大井村的北山南坡。贾兰坡、辽宁省博物馆、林西县文化馆曾

作过多次调查, 并于 1976 年 7 月进行了试发掘^[1,2]。该矿冶遗址是目前我国北方发现最早的一处古铜矿遗址, 规模甚大, 拥有采矿、冶炼和铸造等全套生产

收稿日期: 2005-11-14 收到, 2006-01-04 改回

基金项目: 国家自然科学基金重点资助项目(10135050); 国家社科基金重点资助项目(2001042)

第一作者简介: 魏国锋(1975-), 男, 博士研究生, 科技考古专业。

工序遗存。且大井矿床位于我国北方最大的一条铜-锡-多金属成矿带上,系中温热液铜、锡共生矿。遗址的研究可为青铜器起源和锡料来源的探索提供重要的信息。

据原昭乌达盟地质队不完全统计,大井古矿冶遗址约占地 2.5 km²,地表露天采槽 47 条,开采长度累积达 1570 m,最大开采深度约 20 m,最大开采宽度 25 m 左右。1976 年出土和采集了各类采矿、选矿石质工具约 1500 件,大致可分为钎、锤、环、球、盘及研磨器等类型。同时还发现了 12 座炼炉遗迹,

有多孔窖形和椭圆形炼炉两种。¹⁴C 测年确认其开采年代为距今 2970~ 2700 a,属夏家店上层文化^[1]。

1 样品来源及测试

研究的铜矿和炼渣样品采自大井古矿冶遗址,另由辽宁省博物馆提供了辽西地区出土的 10 块春秋战国时期的青铜器残片样品。所有样品委托原地质矿产部武汉综合岩矿测试中心,采用 ICP-AES 方法测试。测试结果见表 1 和表 2,铜绿山和皖南矿冶遗址铜锭的测试结果见表 3。

表 1 大井矿冶遗址铜矿和古炼渣的 ICP-AES 分析结果

Table 1 The ICP-AES analytical results of copper ores and slag from the Dajing site of mining and smelting

样品号	djk-005	djk-006	djk-007	djk-008	djk-009	djz-001	djz-002
样品种类	铜矿	铜矿	铜矿	铜矿	铜矿	古炉渣	古炉渣
Na ₂ O						1.04	1.63
MgO						1.34	1.18
Al ₂ O ₃						8.37	11.56
SiO ₂						49.09	62.18
P ₂ O ₅						0.33	0.22
K ₂ O						1.44	2.45
CaO						13.35	5.14
TiO ₂						0.36	0.52
MnO						0.08	0.072
Fe ₂ O ₃						20.58	12.11
S	0.96	0.15	0.27	17	33	0.15	0.08
Cu	7	3.2	21	23	19	1.8	0.64
Fe	6.5	9.4	26	12	34		
Ni	16	24	24	16	30	24	26
Pb	2150	61	4320	582	585	3500	2180
Zn	3310	435	4941	1946	5402	987	520
Sn	120	35	40	475	311	11000	5387
As	37512	1206	8553	3393	1082	6627	4498
Sb	2959	179	506	521	1350	813	477
Bi	55	7.8	0.92	211	8.4	8.5	5
W	1621	550	209	668	327	1339	2033
Mo	0.22	2.4	3.1	0.22	0.78	4.6	2.1
Se	0.39	0.26	0.23	0.54	0.39	0.38	0.45
Te	0.056	0.025	0.025	0.021	0.02	0.09	0.061
Cd						0.82	1.1
Co	234	96	70	120	95	176	288
Ag	192	3.9	111	18	872	387	190
Ge	2.3	1.6	1	1	0.75	1.6	1.7
Be	1.6	2.3	1.9	0.4	< 0.2	2.7	3.1
Hg	1.6	0.288	0.099	0.125	0.276	0.019	0.019
Hf	1.2	1.1	0.64	< 0.5	< 0.5	4.7	7.7
Zr	46	57	30	3	2.6	189	312
Th	1.5	1.4	2.8	< 1	< 1	6.2	9.2
Sc	6.2	6.1	6.7	2.2	0.92	7.8	9.8

注: Na₂O~ Fe: %; Ni~ Sc: μ g/g

表 2 辽西地区青铜器样品的 ICP-AES 分析结果

Table 2 The ICP-AES analytical results of the bronze vessels excavated From the western Liaoning Province										
样品号	LNM-1	LNM-2	LNM-3	LNM-4	LNM-5	LNM-6	LNM-7	LNM-8	LNM-9	LNM-10
样品名称	铜扣	铜扣	铜扣	铜扣	铜扣	铜扣	铜矛	铜剑	铜剑	铜剑把
年代	东周	东周	东周	东周	东周	东周	东周	东周	东周	东周
Cu	79.92	89.74	72.75	77.27	89.28	89.52	82.39	77.08	69.72	73.69
Sn	2.54	0.59	12.60	14.61	4.98	0.41	5.73	13.72	6.23	11.94
Pb	12.21	2.33	7.73	0.52	2.35	5.80	10.04	3.48	4.34	9.47
Fe	0.30	0.017	0.003	0.033	0.009	< 0.001	0.003	0.017	3.52	0.003
Zn	0.25	0.28	0.22	0.26	0.26	0.28	0.26	0.25	0.23	0.22
As	8766	7958	9420	904	8584	1301	3050	5878	157709	9256
Ag	1667	1368	1771	180	3568	2202	1546	872	4812	871
Co	931	41.7	273	99.9	415	73.6	24.5	41.2	211	56.0
Ni	1112	854	1217	619	765	784	246	197	107	362
Bi	253	396	377	38.2	1361	2117	223	1126	2561	114
Hg	0.24	0.16	0.56	0.47	0.57	0.07	0.21	0.04	0.28	0.43
Mo	0.053	0.067	0.050	0.13	0.064	0.047	0.054	0.040	0.093	0.037
Sb	15379	1042	1994	103	1052	17410	2668	2566	3817	1456
Au	30	40	201	10	< 1	18	11	< 1	10	14
V	4.0	3.3	4.8	3.7	3.8	3.7	4.7	4.5	4.8	5.6
Zr	< 0.1	< 0.1	< 0.1	0.53	< 0.1	< 0.1	< 0.1	0.14	< 0.1	< 0.1
Nb	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	0.45	< 0.1	< 0.1
Hf	< 0.05	< 0.05	< 0.05	< 0.05	< 0.05	< 0.05	< 0.05	< 0.05	< 0.05	< 0.05
Be	0.28	0.22	0.40	0.25	0.28	0.26	0.43	0.31	0.32	0.46
Ba	4.2	4.3	6.2	4.3	4.1	3.3	4.2	3.8	4.5	4.2
Cd	7.74	12.6	14.2	271	2.26	2.79	28.3	20.8	42.7	24.1
Tl	0.16	0.048	0.16	0.018	0.051	0.096	0.15	0.092	0.12	0.15
B	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2
W	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	0.14	< 0.1	< 0.1	< 0.1
Th	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1
Ta	< 0.05	< 0.05	< 0.05	< 0.05	< 0.05	< 0.05	< 0.05	< 0.05	< 0.05	< 0.05
In	18.1	15.7	12.3	233	25.5	5.47	24.2	19.0	263	22.2
Sc	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1
Ga	1.5	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	0.60	< 1
Ge	4.66	0.55	< 0.01	0.17	0.037	0.13	< 0.01	< 0.01	1.01	< 0.01
Sr	0.45	0.52	0.47	0.37	0.41	0.35	0.48	0.39	0.43	0.54
Cr	4.9	4.4	4.0	9.6	4.0	4.2	4.3	5.4	6.8	4.3

注: Cu~ Zn: %; As~ Cr:μg/g

2 结果分析

大井矿床位于大兴安岭海西褶皱带南端的黄岗梁-孟恩陶勒盖的成矿带上, 规模较大, 矿体以裂隙充填式为主, 矿石品位较高, 有用组分较富^[3~5]。元素组合主要为 Sn-Ag-Cu-Pb-Zn-As, 伴生有 Co、Sb、Bi、Cd、In、W 等^[3,6]。露头强烈氧化淋失, 未见次生富集带。原生矿石类型主要为含锡石、毒砂的黄铁矿-黄铜矿。锡矿石主要为锡石, 少量为黄锡矿。砷矿石则主要为毒砂, 极少量为砷黝铜矿。银黝铜矿、辉银矿、辉铋银矿等充填于黄铜矿的裂隙中。原生矿石铜品位平均为 1.84%, 最高达 13.4%, 锡品位

平均为 0.51%, 砷品位平均为 0.83%, 最高达 14.68%, 银品位则平均为 109.1 g/t^[5]。

根据原矿石、炼渣的成分和表 1、表 2 和表 3 的测试数据, 可以对比研究辽宁青铜器与铜绿山、皖南铜铤的关系。

利用微量元素, 可以示踪青铜器铜料的来源或冶炼铜的输出方向。分析时通常选择冶炼铜中的亲铜元素。研究表明, 在铜的冶炼过程中, Au、Ag、As、Sb、Bi、Se、Te 等亲铜元素和 Co、Ni 等亲铁元素主要富集在金属铜中^[7~9], 它们携带着原铜矿的产地信息。这些元素的含量及组成, 具有指示青铜器矿料来源的作用。综合考虑大井铜矿地质资料、古

表 3 铜绿山和皖南古矿冶遗址铜锭的 ICP-AES 分析结果

Table 3 The ICP-AES analytical results of the ancient copper ingots from Tonglūshan and southern Anhui province sites of mining and smelting

样品号	Ncj2004	Ncj2001	Tcm2002	Htt20051	Htt2006
出土地点	南陵江木冲	南陵江木冲	铜陵木鱼山	铜绿山	铜绿山
年代	西周	西周	西周	春秋	春秋
Cu	90.6	92.41	94.60		
Sn	0.10	0.035	0.03	0.00683	0.00651
Pb	0.07	0.03	0.02	0.0188	0.0194
Fe	5.37	2.14	2.14	4.5393	3.1966
S	0.27	0.35	0.46		
As	1400	1700	1400	229	233
Ag	92.8	80.9	56.5	99.8	99.4
Co	286	200	357	101	63
Ni	612	208	206	60	51
Se	83.04	117	26.7	10.3	7.2
Te	< 1.0	190	< 1.0	17	16
Bi	71.9	31.8	77.3	< 0.5	6.4
Hg	23.0	18.2	19.2		
Mo	19.0	2.3	3.9	15.9	4.3
Sb	77	467	34.3	19.1	20.3
Zn	480	680	1370	330	341
V	1.17	1.40	1.11	0.4	0.3
Zr	2.66	2.63	2.55	0.5	< 0.5
Nb	4.27	3.18	4.13	< 0.5	< 0.5
Hf	0.86	0.64	1.75	2.4	0.6
Be	0.014	0.018	0.014	0.02	0.02
B	5.90	3.80	5.30		
Cd	3.35	2.86	3.73	3.42	2.23

注: Cu~ S: %; As~ Cd: $\mu\text{g/g}$

代炼渣中残留铜颗粒^[2]及古代矿石(表1)的元素组合特征,拟以 Ag、As、Sb、Bi、Co、Ni 等元素,加上大井矿床中含量较高的 Zn 和含量较低的 Mo 等元素,作为示踪大井遗址冶炼铜的“指纹元素”。

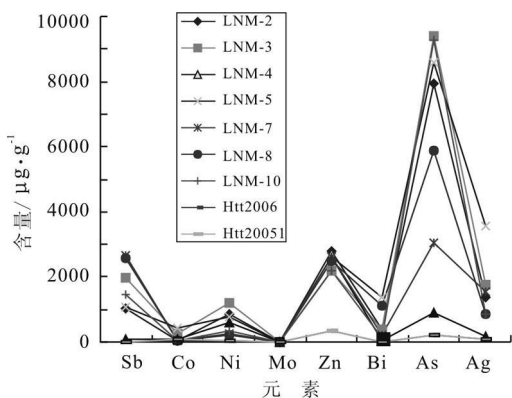


图 1 铜绿山铜锭与青铜器样品微量元素相关图

Fig. 1 The correlation curves of trace element contents of the copper ingots from the Tonglūshan site and the bronze vessels from western Liaoning Province

然而,由于没有给出辽宁省博物馆青铜器残片的 Se、Te 含量,而铜绿山、皖南古矿冶遗址的铜锭未能测出 Au,只能基于 Ag、As、Sb、Bi、Co、Ni、Zn、Mo 等微量元素,对辽宁省博物馆的青铜器残片和铜绿山、皖南古矿冶遗址的铜锭,进行相关性分析(图1和图2)。需要指出的是,因样品 LNM-9 的 As 含量,样品 LNM-1 和 LNM-6 中的 Sb 含量都超过了 1%,因此,未将它们列于图中。

图1和图2表明,除样品 LNM4 外,辽西地区其余青铜器样品的微量元素含量皆具较好的相关性。尽管样品 LNM-9、LNM-1 和 LNM-6 没有列于图中,但从表2中可发现它们与图1中的青铜器样品(除 LNM4)有着较好的相关性。这一结果,暗示除样品 LNM4 外,所有辽宁省博物馆青铜器的铜料应来自同一矿区。

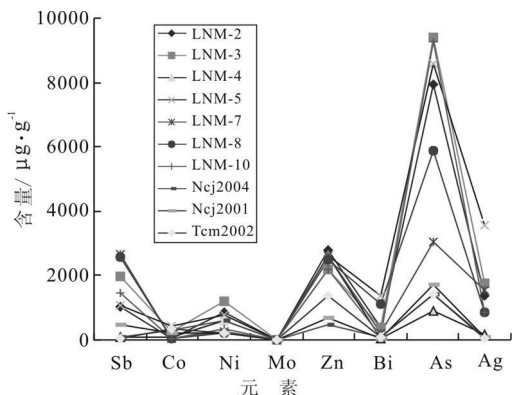


图2 皖南铜锭与青铜器样品微量元素相关图

Fig. 2 The correlation curve of trace elements of the copper ingots from the southern Anhui Province site and the bronze vessels from western Liaoning Province

图1和图2还显示, 辽宁省博物馆青铜器的微量元素含量明显不同于铜绿山和皖南的铜锭。据表2和表3, 除样品LNM4外, 辽宁省博物馆青铜器的Ag、As、Sb、Bi、Zn等元素含量, 明显高于铜绿山和皖南铜锭的相应含量, 它们的Ni含量与皖南的铜锭相近, 略高于铜绿山铜锭的相应含量。然而, 它们的Mo含量则远低于铜绿山和皖南铜锭的含量。至于铜绿山和皖南古矿冶遗址, 尽管皆位于长江中下游的铜矿带, 但表3的数据显然表明, 皖南铜锭的As、Co、Ni、Se、Bi、Sb等元素含量皆高于铜绿山, 两者的差异颇为显著。

下面再分析一下辽宁省博物馆青铜器的矿料来源。

如前所述, 大井铜矿床含有较高的Ag、As、Sb、Bi等元素含量, 而表2的分析数据指出, 除LNM4外, 辽宁省博物馆的青铜器样品的Ag、As、Sb、Bi等元素的含量都很高, 与大井铜矿床矿石的特点颇为相符。地质资料^[5, 10]显示, 大井铜矿的Au含量甚低, 而这次的数据表明, 辽宁省博物馆青铜器的Au含量同样很低, 大井矿石的Au含量甚至低于仪器的检测限; 从Au的含量考虑, 这些青铜器与大井铜矿床同样十分相似。

大井矿床的突出特征是, 矿石的Zn含量特别高^[3, 4, 6], 而Mo含量特别低。这次的测试数据再次显示了这一特征。一般说来, 冶炼过程中Zn或进入炼渣内, 或挥发, 极少量与金属融为一体。因此, 探索青铜器的矿料来源时, 通常不考虑Zn的影响。然而, 大井铜矿颇为特殊, 其超常的高Zn含量, 必

然导致其冶炼产物的Zn含量偏高。辽宁省博物馆青铜器的Zn含量普遍大于0.2%, 高出铜绿山和皖南铜锭的相应含量两个数量级, 暗示原铜矿具有超常高的Zn含量。同理, 大井铜矿超常的低Mo含量, 决定了冶炼金属产物异常低的Mo含量。Mo为亲石元素, 冶炼过程中主要被排入炼渣中。测试表明, 辽宁省博物馆青铜器样品的Mo普遍低于0.1 μg/g, 远低于铜绿山和皖南铜锭的相应含量, 这也表明其原铜矿应具有异常低的Mo。

然而, 大井铜矿床的Ni含量甚低, 而辽宁省博物馆青铜器样品的Ni含量相对较高, 其中, LNM-1和LNM-3的Ni更是异常之高。然而相对于前人所测数据^[5, 11], 铜矿石的Ni明显偏低, 由此可推测大井矿床的Ni分布极不均匀。

青铜是Cu-Sn二元合金或Cu-Sn-Pb三元合金。由单一金属浇注成合金的过程中, 添加的锡料和铅料, 在一定程度上, 影响了铜料的微量元素组成。一般来说, 添加较大比例的Sn、Pb量, 或添加的Sn、Pb原料中, 某些微量元素的含量甚高时, 原料的添加量与青铜的微量元素含量将有一定相关性。然而, 表2的数据显示, 除样品LNM-4外, 这批青铜器样品的Au、Ag、As、Sb、Bi、Co、Ni、Zn、Mo等微量元素与Sn、Pb含量没有明显的相关性, 可见, 上述“指纹元素”主要反映的是铜料来源的信息。

综上所述, 除Ni尚需进一步分析外, 这次研究的辽宁省青铜器, 绝大多数“指纹元素”特征都与大井铜矿床相符。考虑到这批青铜器出土于辽西地区, 故推测它们的铜料来自大井铜矿。

与这些青铜器样品相比, 样品LNM4的As、Sb、Ag、Bi、Tl等含量普遍偏低, 而Mo、Cd的含量又明显偏高, 似乎暗示该样品有着不同的矿料来源。不过, 该样品添加Pb的量极少, 而添加Sn的量又相对偏高, 又同样含有异常高的Zn, 故此, 样品LNM4与其余样品的铜料皆来自大井铜矿的可能性, 尚不能完全排除。

应该指出的是, 样品LNM-9含As 15%, 含Sn 6.23%, 是Cu-Sn-As三元合金。一般说来, 由含As的氧化铜矿或含砷的硫化铜矿冶炼所得的砷铜, 其最高As含量的理论值为7%; 而由铜的氧化矿和含As的硫化矿, 采用共熔还原法熔炼砷铜, 其冶炼产

品的最高 As 含量可达 26%^[12]。该样品应由后一种方法熔炼而成。

3 结 论

根据大井铜矿地质资料、古代炼渣中残存铜颗粒及矿石元素的组合特征,可以初步判断大井铜矿冶炼金属产品具有 Ag、As、Sb、Bi、Co、Zn 等含量偏高、Mo 含量偏低的特征,这为研究大井铜矿冶炼产品的输出方向提供了重要的依据。

研究指出,辽宁省博物馆提供的一批青铜器样品的微量元素含量明显不同于铜绿山和皖南的铜锭,而与大井铜矿很相似。除 LNM-4 需进一步探索外,其余青铜器样品的铜料来源,应来自大井古铜矿或其周边的铜矿。

参考文献(References):

- [1] 王刚. 林西县大井古铜矿遗址[J]. 内蒙古文物考古, 1994, (1): 45- 50.
Wang Gang. Dajing ancient copper ores site of Linxi County [J]. Culture Relics and Archaeology of Inner Mongolia, 1994, (1): 45- 50. (in Chinese)
- [2] 李延祥, 王兆文, 王连伟, 韩汝芬. 大井古铜矿冶炼技术及产品特征初探[J]. 有色金属, 2001, 53(3): 92- 96.
Li Yanxiang, Wang Zhaowen, Wang Lianwei, Han Rubin. Smelting technology of Dajing ancient copper mining and smelting site in Chifeng (Inner Mongolia region) [J]. Nonferrous Metals, 2001, 53(3): 92- 96. (in Chinese)
- [3] 冯建忠, 艾霞, 吴俞斌. 内蒙大井多金属矿床微量元素特征及地质意义[J]. 矿产与勘查, 1990, (4): 47- 52.
Feng Jianzhong, Ai Xia, Wu Yubin. Trace element characteristic and geological significance of poly-metallic ore zone of Dajing, Inner Mongolia [J]. Mineral Resources and Prospecting, 1990, (4): 47- 52. (in Chinese)
- [4] 赵利青, 上本武, 覃功炯, 孙世华, 王玉往, 王永争, 张安立, 王耀明. 大井锡多金属矿床矿化元素分布特征研究[J]. 地质与勘探, 2002, 38(4): 22- 27.
Zhao Liqing, Uemoto Takeshi, Qin Gongjiong, Sun Shihua, Wang Yuwang, Wang Yongzheng, Zhang Anli, Wang Yaoming. Distribution of mineralization elements in Dajing tin poly-metallic deposit, China [J]. Geology and Prospecting, 2002, 38(4): 22- 27. (in Chinese)
- [5] 辽宁省地质局昭盟地质大队. 辽宁省林西县大井铜矿地质勘探报告[R]. 中国地质档案馆藏第 56746 号地质档案, 1977.
Zhao Meng Geology Team of Liaoning Province. Geological prospecting report on Dajing copper ores in Linxi county, Liaoning Province [R]. No. 56746 Geology Archives of China Geology Archives, 1977. (in Chinese)
- [6] 王玉往, 王京彬, 王莉娟. 大井矿床成矿阶段划分[A]. “九五”全国地质科技重要成果学术交流会议文集[C]. 2003. 408- 411.
Wang Yuwang, Wang Jingbin, Wang Lijuan. Ore forming stages of Dajing deposit [A]. Symposium on important achievements of geology during the 9th five-year plan [C]. 2003. 408- 411. (in Chinese)
- [7] 秦颖, 王昌燧, 冯敏, 刘平生. 安徽省南陵县江木冲古铜矿冶炼遗物自然科学研究及意义[J]. 东南文化, 2002, (1): 87- 89.
Qin Ying, Wang Changsui, Feng Min, Liu Pingsheng. Natural science study and significance of smelting relics of copper ores from Jiangmuchi site, Nanling County, Anhui Province [J]. Southeast Culture, 2002, (1): 87- 89. (in Chinese)
- [8] 秦颖, 王昌燧, 冯敏, 杨立新, 汪景辉. 安徽淮北部分地区出土青铜器的铜矿来源分析[J]. 东南文化, 2004, (1): 86- 88.
Qin Ying, Wang Changsui, Feng Min, Yang Lixin, Wang Jinghui. Study of the provenance of the bronze vessels from Huabei region, Anhui Province [J]. Southeast Culture, 2004, (1): 86- 88. (in Chinese)
- [9] 李清临. 古青铜器矿料来源研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2004.
Li Qinglin. Study of the provenance of the ancient bronze vessels [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2004. (in Chinese)
- [10] 张春华. 内蒙大井锡多金属矿床矿石的物质成分及特征[J]. 矿产与地质, 2004, (1): 13- 17.
Zhang Chunhua. Ore composition and characteristics of the Dajing tin poly-metallic deposit in Inner Mongolia [J]. Mineral Resources and Geology, 2004, (1): 13- 17. (in Chinese)
- [11] 王玉往, 曲丽莉, 王京彬, 王莉娟, 姜能, 毛骞. 大井锡多金属矿床矿石矿物成分及时空演化[J]. 矿床地质, 2002, 21(1): 23- 35.
Wang Yuwang, Qu Lili, Wang Jingbin, Wang Lijuan, Jiang Neng, Mao Qian. Ore minerals in Dajing tin poly-metallic deposit, Inner Mongolia, and their temporal and spatial evolution [J]. Deposit and Geology, 2002, 21(1): 23- 35. (in Chinese)
- [12] 潜伟, 孙淑云, 韩汝芬. 古代砷铜研究综述[J]. 文物保护与考古科学, 2000, 12(2): 43- 50.
Qian Wei, Sun Shuyun, Han Rubin. A review on ancient copper-arsenic alloys [J]. Science of Conservation and Archaeology, 2000, 12(2): 43- 50. (in Chinese)