

河西走廊 4200 年以来青铜冶炼的元素地球化学记录^{*}

李小强¹, 纪明^{1,2}, 约翰·道森³, 周新郢^{1,2}, 赵克良^{1,2}, 孙楠^{1,2}, 杨青^{1,2}

(1: 中国科学院地球环境研究所, 中国科学院黄土与第四纪国家重点实验室, 西安 710075)

(2: 中国科学院研究生院, 北京 100049)

(3: Institute for Environmental Research, Australian Nuclear Science and Technology Organization, Menai, NSW, Australia, 2234)

摘要: 金属的使用与冶炼是人类社会发展过程中一项革命性事件。河西走廊地区全新世条湖湖相沉积元素地球化学记录显示, 10500–9500cal aBP 和 8000–7200cal aBP 时段 Cu、Pb、Zn、Ni 元素含量高值区, 分别对应了早全新世增温期冰川融水量增加和全新世适宜期季风降水的增强。Cu、As、Pb、Zn、Ni 含量在 4200–3700cal aBP 时段出现最高峰值, 另外 Cu、Pb、Zn、Ni 4 种元素在 3000–2700 和 2100–1900cal aBP 时段出现较高峰值。4200–3700cal aBP 时段元素异常记录了我国西北地区最早的青铜冶炼, As 元素是这一时期青铜合金的主要成份。另外, 西周时期(3000–2700cal aBP) 和汉代(2100–1900cal aBP) Cu、Pb、Zn、Ni 元素峰值, 可能是先民青铜冶炼的结果。元素地球化学记录不仅可以判定早期青铜冶炼的起迄时间, 也提供了甄别不同时代青铜合金元素组成变化的信息。

关键词: 河西走廊; 元素地球化学; 4200 年以来; 青铜冶炼

Records of element geochemistry on the bronze smelting in Hexi Corridor since 4200 aBP

LI Xiaoqiang¹, JI Ming^{1,2}, Dodson J.³, ZHOU Xinying^{1,2}, ZHAO Keliang^{1,2}, SUN Nan^{1,2} & YANG Qing^{1,2}

(1: *State Key Laboratory of Loess and Quaternary Geology, Institute of the Earth Environment, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710075, P. R. China*)

(2: *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, P. R. China*)

(3: *Institute for Environmental Research, Australian Nuclear Science and Technology Organization, Menai, NSW, Australia, 2234*)

Abstract: The utilization and smelting of metal is a revolutionary event during developing process of human society. The records of element geochemistry from lacustrine sediment at Lake Tiaohu in Hexi Corridor, during Holocene indicated that the high values of element such as Cu, Pb, Zn, and Ni appeared in the period of 10500–9500 and 8000–7200cal aBP, responding to the episode of glacial meltwater rising in the period of increasing temperature in early Holocene of the and the period of precipitation strength during Holocene optimum, respectively. The highest peak values of Cu, As, Pb, Zn and Ni appeared between 4200 and 3700cal aBP. Additionally, the secondary high values of Cu, Pb, Zn and Ni appeared in the period of 3000–2700cal aBP and 2100–1900cal aBP. The element abnormality between 4200 and 3700cal aBP record the earliest bronze smelting in Northwest China and the element of arsenic was the major component in bronze alloy in this period. The element high values of Cu, Pb, Zn, Ni in Western Zhou Dynasty (3000–2700cal aBP) and Han Dynasty (2100–1900cal aBP) were probably the result of bronze smelting by ancient people. The record of element geochemistry could identify the starting-end time of bronze smelting, and it also provided the message on the component characteristic of bronze alloy in different periods.

Keywords: Hexi Corridor; element geochemistry; 4200cal aBP; bronze smelting

* 国家自然科学基金项目(40572108, 40599423)、“西部之光”项目和黄土与第四纪地质国家重点实验室自主部署项目(LQ0701)联合资助。2009–04–07 收稿; 2009–05–06 收修改稿。李小强, 男, 1965 年生, 博士, 研究员; E-mail: lxq@loess.llqg.ac.cn.

“人类世”作为单独且有特殊含义和内容的地质时期,是 21 世纪提出的一个新的地质单元^[1-2],即从全新世的 1 万年中,提出一个新的地质时期^[3],包括了考古学上的新石器时代、铜器时代、铁器时代、工业时代以及目前的信息时代。“人类世”强调人类活动作为新的地质营力对地球环境产生的重要影响。

金属的使用与冶炼是继农业起源后人类社会过程中又一重大革命性事件,人类发现并利用铜金属开始于公元前 6000 年的安纳托利亚高原地区(位于亚洲西部小亚西亚半岛,土耳其境内。北临黑海、南临地中海、东隔内托罗斯山与亚美尼亚高原相邻,西至土耳其西部地区),由于矿物学知识的匮乏,人类最早利用的是天然的铜,在进入真正的锡青铜时代以前,曾有很长一段时间使用红铜和砷铜^[4]。近东地区是被大多数学者所公认冶金术最早出现的地区。人工冶炼铜器最早的记录是 5800aBP 的伊朗叶海亚地区的含有少量砷的铜器,是中东地区目前所知最为古老的人工铜制品^[5]。后来以安纳托利亚为中心的金属文明向各地传播,公元前 2000 年左右,金属冶炼技术经由高加索或伊朗传入中国^[4]。美国学者菲兹杰拉德-胡博认为,二里头青铜文明的起源或许与中亚地区 Bactrian 的冶金术东传有密切关系,而活跃在中亚和西伯利亚一代的 Seima-Turbino 文化,Okunevo 文化和安德罗诺沃文化等游牧民族文化在这中间扮演了重要的中介角色。这几支分布在欧亚草原的青铜文化首先进入新疆地区,继而通过河西走廊作用于河湟地区,最终通过齐家文化对中原的二里头文化施加了影响^[6]。安志敏也认为“很可能是通过史前时期的‘丝绸之路’进入中国的”^[7]。因此,中国早期金属起源研究一直是学术界重点关注的问题,研究的焦点一般集中在中国冶铜业到底是本土起源还是外来影响的产物,严文明,安志敏,金正耀,李水城,李延祥,水涛,常向阳,梅建军,秦颖^[5-17]等从不同的角度以及不同的方法对中国早期铜器的起源和制作工艺等进行了研究。

从考古发现来看,中国境内所发现的早期铜器绝大部分集中在甘(肃)青(海)地区和新疆东部一带,其文化类型包括了马家窑文化、半山-马厂文化、齐家文化和四坝文化。东乡林家马家窑文化遗址(距今约 5000 年前)出土的铜刀系铸造而成,含锡 6% - 10%,是目前国内所知年代最早的锡青铜制品^[5]。

甘肃西部的河西走廊地区是连接东亚和西亚的关键地区,新石器时代晚期以来文化沉积序列完整,文化类型丰富。2006 年以来,我们在河西走廊地区开展了大量的野外调查工作,在酒泉的金塔地区发现了许多先民农业活动和铜冶炼的遗迹,主要的人类活动遗址点位于巴丹吉林南缘沙地中已干涸的条湖之东。目前已开展了大量生物指标记录、¹⁴C 年代测定以及炼渣的元素和同位素分析工作,条湖湖相沉积物的元素地球化学分析研究,结合高精度 AMS¹⁴C 测年,以提取更多先民早期铜冶炼的信息。

1 研究点与研究方法

河西走廊位于合黎山、龙首山和祁连山之间,东南-西北走向,长达 1000 多千米,走廊地势平坦,一般海拔 1500m 左右。自南而北,依次出现南山北麓坡积带、洪积带、洪积冲积带、冲积带和北山南麓坡积带,沿河有许多冲积平原,形成绿洲。金塔县位于河西走廊西部黑河流域的下游,区内戈壁和沙漠广泛分布。金塔县东北 15km 的巴丹吉林南缘沙地中分布有大量新石器时代晚期至汉、唐时期的遗址和遗存,我们已对火石梁和缸缸洼冶炼遗址开展了大量研究工作^[18-19]。据史料记载,遗址西侧的条湖在公元 700 年左右干涸,我们在湖心挖掘了一个厚约 650cm 的探坑(40°15'42.2"N, 99°18'25.6"E,海拔 1188m)(图 1)。根据沉积物特征将剖面分为两个部分,上部 0 - 440cm 主要为风成沙堆积,下部 440 - 650cm 为湖相沉积,其中 440 - 630cm 为湖相粘土层,630 - 650cm 为细沙层,635 - 637cm 夹杂一层炭屑层。

选择探坑下部湖相沉积中 3 个炭屑和 1 个植物残体样品,在澳大利亚原子能科学与技术组织环境研究所完成加速器¹⁴C 测年,并根据 Reimer 等的年龄校正项目对所测年龄进行日历年校正^[20](表 1)。湖相沉积物以 4cm 间距分析元素样品 49 个,每个样品取样 5g,在恒温 60℃ 下烘干 24h 后,在玛瑙研钵中研磨成粉状颗粒,直至完全过筛(筛孔目数为 200 目,74μm)。以硼酸作为固定剂,在 SL201 型半自动压样机上以 29TN 的压力压成圆饼状,在中国科学院地球环境研究所 XRF 实验室波长色散的 XRF (PANalytical EA Almelo, 荷兰)完成测样。样品测试结果的校正选择 28 个国际标准参考样品,在 GSS-8 标准下通过平行分析进行测试精度的检验。主量元素的相对标准偏差在 1% - 2% 内,微量元素的相对标准偏差 < 5%。

2 研究结果

条湖剖面 440cm 以上是一套风成沙与河流相混杂堆积,可能是唐代中期(约公元 700 年左右)条湖干涸

以后^[21],该套沉积物覆盖在条湖湖相沉积之上所致。以湖相沉积开始的深度(440cm处)作为条湖湖相剖面的顶部,其下厚 210cm 的沉积由 4 个年龄点控制,对此 4 个年龄点进行校正,年龄校正参考 Reimer 等的年龄校正项目^[20]。450cm 深度的植物残体年龄为 1470aBP,校正后的年龄为 1398cal aBP; 500cm 深度炭屑年龄 3010aBP,校正后的年龄为 3209.5cal aBP; 570cm 深度炭屑年龄为 4520aBP,校正后的年龄为 5100.5cal aBP; 640cm 深度炭屑年龄为 9360aBP,校正后的年龄为 10564.5cal aBP; 校正后的上述 4 个年龄具有良好的线性关系,以 4 个¹⁴C 测年数据为控制点,假设两个测年数据间的沉积速率恒定,用线性内插和外推方法对采样点年龄进行推算,条湖湖相剖面的沉积年代为 10564.5 - 1398cal aBP,约为 9166 年的一套沉积(表 1)。

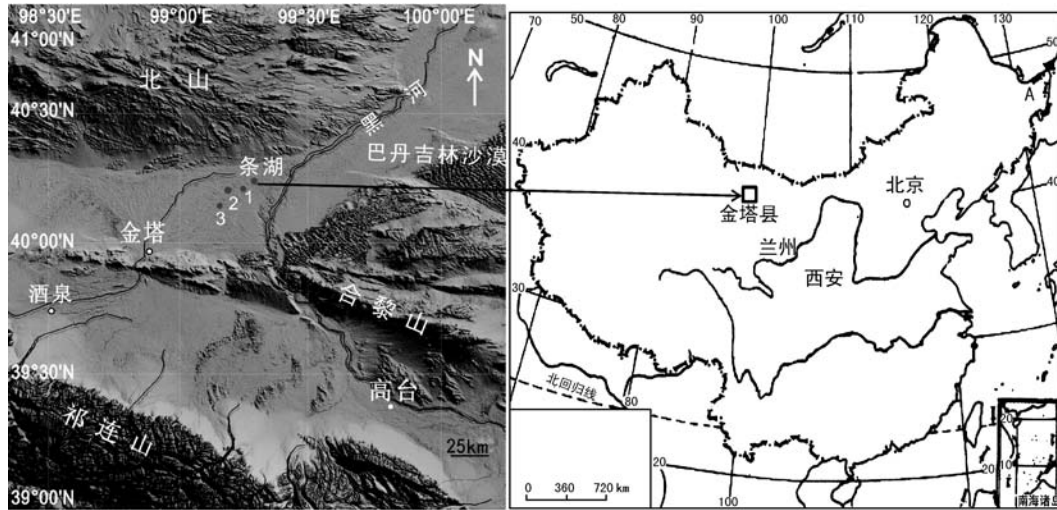


图 1 研究区域文化遗址分布(1: 火石梁遗址; 2: 汉代冶炼遗址; 3: 缸缸洼遗址)

Fig. 1 Map of cultural sites in the study area

表 1 条湖剖面加速器¹⁴C 测年

Tab. 1 Accelerator mass spectrometry (AMS) dates from Lake Tiaohu section

深度 (cm)	样品类型	ANSTO 实验室标号	¹⁴ C 年龄 (aBP)	校正年龄 (cal aBP, 取 2σ)	校正年龄 (cal aBP, 均值)
451	植物残体	OZK611	1470 ± 90	1241 - 1555	1398
499	炭屑	OZK612	3010 ± 60	3059 - 3360	3210
569	炭屑	OZK613	4520 ± 90	4872 - 5329	5100
636	炭屑	OZK614	9360 ± 70	10373 - 10756	10565

用 XRF (PANalytical EA Almelo, 荷兰) 分析了 49 个湖相沉积样品中 Cu、As、Pb、Zn、Ni、P、Mn、Rb、Sr、Ba、Al、Fe、Na 等元素。选择与先民冶铜活动密切相关的 Cu、Pb、Zn、Ni、As 等元素, 绘制其 10000 - 1500cal aBP 时段的变化曲线(图 2), 从底到顶大致可分为以下 9 个阶段: (1) 约 10500 - 9500cal aBP, Cu、Pb、Zn、Ni 元素含量较高且具有较好的相关性, 但 As 元素含量很低; (2) 约 9500 - 8000cal aBP, Cu、Pb、Zn、Ni 元素含量较低, 但 As 元素出现一个小高峰; (3) 8000 - 7200cal aBP, 出现 Cu、Pb、Zn、Ni、As 元素的小高峰; (4) 7200 - 5200cal aBP, Cu、As、Pb、Zn、Ni 元素的含量均较低的阶段, As 元素基本稳定在 20mg/kg 左右; (5) 5200 - 4200cal aBP, 5 种元素含量, 特别是 As 元素的含量增长明显; (6) 4200 - 3700cal aBP, Cu、As、Pb、Zn、Ni 元素均显示出最高峰值, 变化趋势对应很好, Cu 元素的最高含量达到 53.1mg/kg; (7) 3700 - 3000cal aBP, Cu、As、Pb、Zn、Ni 元素含量急速降低, 在整个剖面中显示明显的低谷; (8) 3000 - 2700cal aBP, 出现 Cu、Pb、Zn、Ni 元素的小峰值, 但 As 元素的含量很低; (9) 2100 - 1900cal aBP, Cu、Pb、Zn、Ni 元素再次出现小峰值, As 元素含量有所提高。

运用 SPSS 软件中的 Pearson 简单相关系数分析方法对条湖剖面元素相关性进行分析, 并对结果做双尾

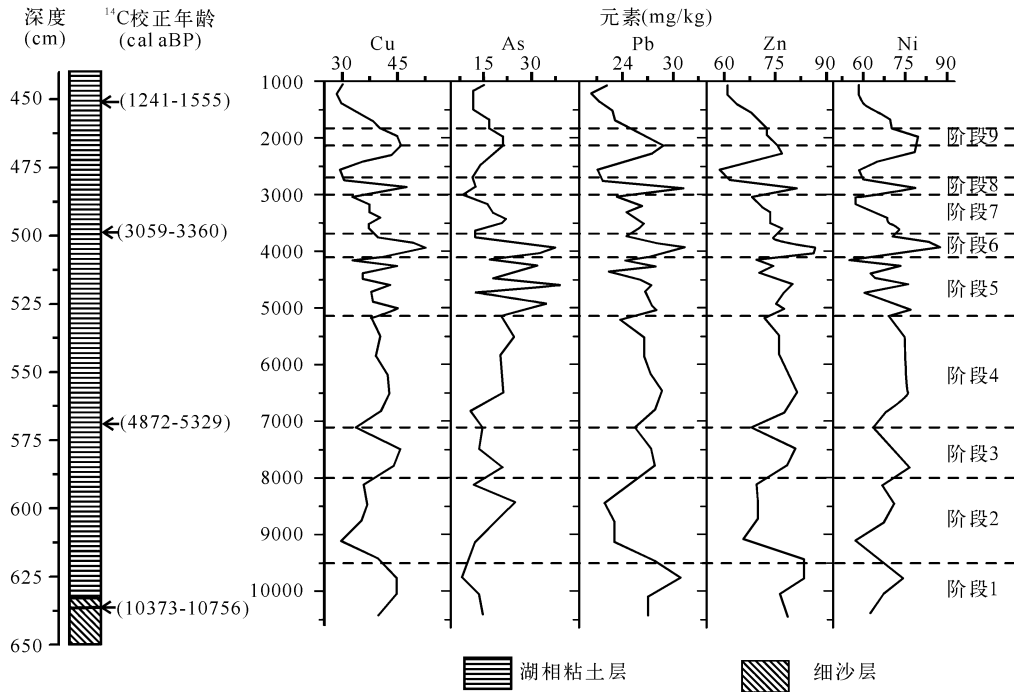


图2 10000 - 1500cal aBP 元素含量的变化

Fig. 2 Elements changes between 10000 and 1500cal aBP

(2-tailed) 和单尾 (1-tailed) 检验 (表 2), 分析结果显示, Cu、Pb、Zn、Ni 元素的相关性较好, 但 As 元素除 4200 - 3700cal aBP 时段外, 与 Cu、Pb、Zn、Ni 元素相关性差, 大部分时段甚至出现反相关, 反映出 As 元素可能与以上 4 种元素有着不同的来源.

表 2 条湖剖面特征元素相关性分析 ($N=49$)Tab. 2 The correlation analysis of typical elements from Lake Tiaohu section ($N=49$)

		Cu (mg/kg)	As (mg/kg)	Pb (mg/kg)	Zn (mg/kg)	Ni (mg/kg)
Cu (mg/kg)	Pearson 相关系数	1	0.467 **	0.842 **	0.817 **	0.839 **
	显著水平 (2-tailed)		0.001	0.000	0.000	0.000
As (mg/kg)	Pearson 相关系数	0.467 **	1	0.322 *	0.361 *	0.542 **
	显著水平 (2-tailed)	0.001		0.024	0.011	0.000
Pb (mg/kg)	Pearson 相关系数	0.842 **	0.322 *	1	0.859 **	0.654 **
	显著水平 (2-tailed)	0.000	0.024		0.000	0.000
Zn (mg/kg)	Pearson 相关系数	0.817 **	0.361 *	0.859 **	1	0.684 **
	显著水平 (2-tailed)	0.000	0.011	0.000		0.000
Ni (mg/kg)	Pearson 相关系数	0.839 **	0.542 **	0.654 **	0.684 **	1
	显著水平 (2-tailed)	0.000	0.000	0.000	0.000	

** 显著水平为 0.01 时线性相关明显 (2-tailed); * 显著水平为 0.05 时线性相关明显 (2-tailed).

3 讨论与结论

现代科技考古研究不仅注重发掘中的实物资料, 同时关注文化层以及周边沉积物中保留的人类活动与环境变化信息, 重建人类活动的特征和过程. 早期铜冶炼研究的常用方法有器型比对与铭文研究划分文化

类型,铜器的金相分析以探讨其制作和加工工艺,能谱分析研究青铜材质及冶炼工艺,同位素示踪法以探索冶炼矿料的来源等。

土壤化学分析在 20 世纪初期就应用在考古研究中以确定史前人类活动的区域和范围^[22]。地层沉积物记录了不同时期金属元素和其它污染物的输入,湖泊沉积物响应流域盆地输入湖泊物源的变化,不仅记录气候变化特征,也为全新世人类活动研究提供了良好载体^[23-24]。金属元素可以通过多种途径释放出来,例如煤和石油的燃烧、采矿活动、冶炼活动以及其它人类活动^[25-27],金属元素通过大气沉降、流水冲刷等方式进入湖泊,如果沉积速率已知,沉积序列中特征元素随深度的变化可以用来恢复过去金属元素的输入率。湖相沉积物可以获取过去元素变化记录^[28-34],川西红原泥炭的元素地球化学研究,在元素含量异常与考古学文化发生之间的关系作了一定尝试^[35],湖北梁子湖沉积物元素分析显示,7000 年以来的 Cu、Pb、Zn、Ni 等元素变化记录了湖北地区采矿和金属利用活动^[36]。人类的采矿和冶炼活动等可以将一定量的金属元素释放到大气中或残留在土壤里,因此,冶炼遗址周边的土壤或湖泊沉积中保留了人类冶炼活动的记录,沉积物元素变化或异常可以帮助我们获取人类冶炼活动的信息,确定冶炼活动的起讫时间以及强度等,可视为人类冶炼活动研究的重要替代指标。

湖泊沉积物主要是水力作用下入湖的各种碎屑物、化学风化溶解的溶质^[37]。湖泊沉积物中元素含量的变化受控于物源以及搬运介质(风力搬运、流水搬运)动力的大小以及沉积速率、碳酸盐含量的变化,很大程度与气候变化相联系。条湖湖相沉积中 Cu、Pb、Zn、Ni 等元素含量的高值区出现在早、中全新世的 10500 - 9500 和 8000 - 7200cal aBP 时段,对应了河西走廊地区全新世早期增温期冰融水量增加和全新世适宜期季风降水的增强^[38],入湖水量的增强导致湖中碎屑物和溶解的溶质供给的增加,是 Cu、Pb、Zn、Ni 等元素含量升高的主要原因。

我国西北地区 5000cal aBP 以来气候逐渐转向冷干,降水减少,地表径流减少和湖面降低,对新石器时代晚期人类活动造成了重要影响^[39-43],唐代中期(约公元 700 年左右)条湖完全干涸主要是气候干旱化的结果^[21]。地表径流作为金属元素进入湖泊沉积的主要介质之一,对金属元素在湖泊沉积中的含量有着重要控制作用,地表径流的降低应减少进入湖泊的金属元素特别是重金属元素的含量,但条湖湖相沉积中 Cu、As、Pb、Zn、Ni 等 5 种元素含量均在 4200 - 3700cal aBP 时段却出现最高峰值,Cu 元素的最高含量可达 53.1mg/kg。另外 Cu、Pb、Zn、Ni 等 4 种元素在 3000 - 2700 和 2100 - 1900cal aBP 时段出现较高峰值,而 As 元素含量却较低,与 Cu、Pb、Zn、Ni 元素相关性较差(图 2,表 2)。4200cal aBP 以来元素含量的三次峰值,显然与气候变化导致的降水和入湖水量变化的总趋势呈反相关,那么,入湖沉积物物源的变化应是元素含量升高的主要原因。人类早期的青铜冶炼活动需要大量的铜矿石,矿石在高温煅烧过程中也会向大气以及周边地区输入大量的金属元素,产生一个新的、人为的金属元素输出源区,增加的金属元素通过大气沉降或流水冲刷作用保留在湖泊沉积物中,造成金属元素含量出现峰值。

金塔地区新石器时代晚期的人类活动较为发育,马家窑文化、齐家文化以及四坝文化均有分布,条湖周边地区是青铜冶炼点集中分布区域。最新研究表明火石梁和缸缸洼遗址年代距今 2100 - 1860BC^[18-19],是目前我国已知最早的青铜冶炼点。另外,条湖周边还有大量汉代的青铜冶炼遗址^[21]。条湖剖面记录的 4200 - 3700 和 2100 - 1900cal aBP 两期元素异常阶段,与这两期青铜冶炼活动的时段非常吻合。3000 - 2700cal aBP 时段对应了历史上的西周时期,西北地区在这一时期为犬戎游牧文化阶段^[44],条湖剖面中 Cu、Pb、Zn、Ni 元素的高值是否记录了游牧民族在条湖地区的一次青铜冶炼活动,还需要更多考古学证据的支持。

As 元素在早期的冶炼活动中(4200 - 3700cal aBP)与 Cu、Pb、Zn、Ni 元素一致,但在上部 3000 - 2700 和 2100 - 1900cal aBP 阶段却呈现反相关,这可能与不同时期先民采用的青铜合金成分不同密切相关。冶金考古学研究显示 As 作为一种合金成份较锡为早,在安纳托利亚、阿塞拜疆、南欧、塞克拉德斯、克里特、以色列、伊朗及印度河流域均是如此。乌尔泰姆(T. A. Wertime)认为^[6],在公元前四千纪和三千纪,人类曾有过一段“合金试验时期”,即人类了解到将 Sb、As 和 Bi 加入到自然铜铸件或冶炼矿石中,能够让铸造和冶炼更容易进行。As 似乎是在 Sn 应用以前常用的合金成份,其含量从 0.25% 到 3% 或 4%,有时高达 10% - 12%。到青铜时代中、晚期,Sn 被广泛用来冶炼青铜,逐渐取代了 As 的地位,成为主要的合金成份,As 就逐渐从铜合金中消失了^[6]。条湖沉积记录显示早期冶炼时期 As 元素出现峰值,而中、晚期特别是西周和汉代则出现

低值,充分揭示了河西走廊地区 4200-3700cal aBP 时段的早期青铜冶炼仍以砷合金为主,而历史时期的青铜冶炼则可能被其它元素所代替。

总之,条湖剖面 4200-3700cal aBP 时段出现的 Cu、As、Pb、Zn、Ni 元素异常峰值,记录了我国西北地区最早的青铜冶炼,As 元素是这一时期青铜合金的主要成份。另外,Cu、Pb、Zn、Ni 元素在西周(3000-2700 cal aBP)和汉代(2100-1900cal aBP)出现的峰值,可能是这一阶段先民青铜冶炼的结果,As 元素已不是青铜合金的主要成份。湖相沉积的元素地球化学记录不仅可以判定早期青铜冶炼的起迄时间,也提供了甄别不同时代青铜合金元素组成变化的信息。

4 参考文献

- [1] Crutzen PJ, Stoermer EF. The "Anthropocene". *IGBP Newsletter*, 2000, **41**: 17-18.
- [2] Crutzen PJ. Geology of mankind. *Nature*, 2002, **415**(1): 23.
- [3] 刘东生. 科学工作假说(Working Hypothesis)是科学创新的基础. 第四纪研究, 2006, **26**(5): 673-677.
- [4] Tylecote RF. A history of Metallurgy. London: The Metals Society, 1976.
- [5] 白云翔. 中国的早期铜器与青铜器的起源. 东南文化, 2002, (5): 25-37.
- [6] 李水城. 西北与中原早期冶铜业的区域特征及交互作用. 考古学报, 2005, (3): 239-278.
- [7] 安志敏. 试论中国的早期铜器. 考古, 1992, (12): 1110-1117.
- [8] 金正耀. 铅同位素示踪方法应用于考古研究的进展. 地球学报, 2003, **24**(6): 548-551.
- [9] 常向阳, 朱炳泉, 金正耀. 殷商青铜器矿料来源与铅同位素示踪应用. 广州大学学报(自然科学版), 2003, **2**(4): 323-326.
- [10] 李水城, 水涛. 四坝文化铜器研究. 文物, 2000, (3): 36-44.
- [11] 李延祥, 贾海新, 朱延平. 熬汉旗大甸子夏家店下层文化墓葬出土铜器初步研究. 有色金属, 2002, **54**(4): 123-126.
- [12] 李延祥, 梅建军. 奴拉赛古铜矿冶炼技术研究. 有色金属, 2001, **53**(1): 64-66.
- [13] 梅建军, 李延祥. 新疆奴拉赛古铜矿冶遗址冶炼技术初步研究. 自然科学史研究, 1998, **17**(3): 289-295.
- [14] 水涛. 四坝文化铜器研究. 文物, 2000, (3): 36-44.
- [15] 水涛. 西域史前文明发展的若干理论问题. 西域研究, 2005, (4): 44-51.
- [16] 秦颖, 朱继平, 王昌遂. 利用微量元素示踪青铜器矿料来源的实验研究. 东南文化, 2004, (5): 89-92.
- [17] 魏国锋, 秦颖, 罗丰等. 古代铜矿冶炼过程中稀土元素的变化研究. 中国稀土学报, 2005, **23**(3): 357-362.
- [18] Li XQ, Dodson J, Zhou XY *et al.* Early writing, bronze smelting, and wheat agriculture in NW China. *Quaternary Science Review*, 2009 (in press).
- [19] Dodson J, Li XQ, Ji M *et al.* Bronze in two Holocene archaeological sites in Gansu, NW China. *Quaternary Research*, 2009, **72**: 309-314.
- [20] Reimer PJ, Baillie MG, Bard E *et al.* Intcal04 Terrestrial radiocarbon Age Calibration, 0-26 cal. k yr BP. *Radiocarbon*, 2004, **46**: 1029-1058.
- [21] 李并成. 沙漠历史地理学的几个理论问题——以我国河西走廊历史上的沙漠化研究为例. 地理科学, 1999, **19**(3): 211-215.
- [22] 董广辉, 夏正楷, 刘德成等. 文明起源时期河南孟津地区人类活动对土壤化学性质的影响. 兰州大学学报(自然科学版), 2007, **43**(1): 6-10.
- [23] Battarbee RW, Thompson R, Catalan J *et al.* Climate variability and ecosystem dynamics of remote alpine and arctic lakes: the MOLAR project. *J Paleol*, 2002, **28**: 1-6.
- [24] Lotter AF, Appleby PG, Bindler R *et al.* The sediment record of the past 200 years in a Swiss high-alpine lake: Hagelseewli(2339m a. s. l.). *J Paleol*, 2002, **28**: 111-127.
- [25] Nriagu JO, Pacyna JM. Quantitative assessment of worldwide contamination of air, water and soils by trace metals. *Nature*, 1988, **333**: 134-139.
- [26] Shotyk W, Cheburkin AK, Appleby PG *et al.* Two thousand years of atmospheric arsenic, antimony, and lead deposition recorded in an ombrotrophic peat bog profile, Jura Mountains, Switzerland. *Earth Planet Sci Lett*, 1966, **145**: E1-E7.
- [27] Kylander ME, Weiss DJ, Cortizas AM *et al.* Refining the pre-industrial atmospheric Pb isotope evolution curve in Europe

- using an 8000 year old peat core from NW Spain. *Earth Planet Sci Lett*, 2005, **240**: 467-485.
- [28] Dominik J, Mangini A, Prosi F. Sedimentation rate variations and anthropogenic metal fluxes into Lake Constance sediments. *Environ Geol*, 1984, **5**: 151-157.
- [29] Bollhofer A, Mangini A, Lenhard A *et al.* High-resolution ^{210}Pb dating of Lake Constance sediments: stable lead in Lake Constance. *Environ Geol*, 1994, **24**: 267-274.
- [30] Boyle JF, Rose NL, Bennion H *et al.* Environmental impacts in the Jiangnan Plain: evidence from lake sediments. *Water Air Soil Pollut*, 1999, **112**: 21-40.
- [31] Kober B, Wessels M, Bollhofer A *et al.* Pb isotopes in sediments of Lake Constance, Central Europe constrain the heavy metal pathways and the pollution history of the catchment, the lake and the regional atmosphere. *Geochim Cosmochim Acta*, 1999, **63**: 1293-1303.
- [32] Astrom M, Nylund K. Impact of historical metalworks on the concentrations of major and trace elements in sediments: a case study in Finland. *Appl Geochem*, 2000, **15**: 807-817.
- [33] Mccray EL, King JW, Appleby PG *et al.* Historical trace metal accumulation in the sediments of an urbanised region of the Lake Champlain watershed, Burlington, Vermont. *Water Air Soil Pollut*, 2001, **125**: 201-230.
- [34] Outridge PM, Hermanson HH, Lockhart WL. Regional variations in atmospheric deposition and sources of anthropogenic lead in lake sediments across the Canadian Arctic. *Geochim Cosmochim Acta*, 2002, **66**: 3521-3531.
- [35] 于学峰, 周卫健. 红原泥炭 6000a 以来元素异常及其可能反映甘青地区人类活动信息的初步研究. *第四纪研究*, 2006, **26**(4): 597-603.
- [36] Celine SL Lee, Qi Shihua, Zhang Gan *et al.* Seven thousands years of records on the mining and utilization of metals from lake sediment in central China. *Environmental Science and Technology*, 2008, **42**(13): 4732-4738.
- [37] 金章东, 张恩楼. 湖泊沉积物 Rb/Sr 比值的古气候意义. *科学技术与工程*, 2002, **2**(3): 20-22.
- [38] 陈发虎, 黄小忠, 杨美临等. 亚洲中部干旱区全新世气候变化的西风模式——以新疆博斯腾湖记录为例. *第四纪研究*, 2006, **26**(6): 881-887.
- [39] 朱艳, 陈发虎, 张家武等. 距今五千年左右环境恶化事件对我国新石器文化的影响及其原因的初步探讨. *地理科学进展*, 2001, **20**(2): 111-121.
- [40] 安成邦, 冯兆东, 陈发虎. 甘青地区全新世中期的环境变化与文化演进. *西北大学学报(自然科学版)*, 2003, **33**(6): 729-740.
- [41] 安成邦, 王琳, 吉笃学等. 甘青文化区新石器文化的时空变化和可能的环境动力. *第四纪研究*, 2006, **26**(6): 923-927.
- [42] 侯光良, 刘峰贵, 刘翠华等. 全新世甘青地区古文化变迁的环境驱动. *地理学报*, 2009, **64**(1): 53-58.
- [43] 王乃昂, 赵强, 胡刚等. 近 2ka 河西走廊及毗邻地区沙漠化过程的气候与人文背景. *中国沙漠*, 2003, **23**(1): 95-100.
- [44] 那木吉拉. 犬戎北狄古族犬狼崇拜及神话传说考辨. *民族文化研究*, 2008, (2): 47-52.