

# 旧石器遗址出土烧骨的技术分析及其考古学应用

黄超<sup>1,2,3</sup>, 张双权<sup>1,2,3</sup>

1. 中国科学院脊椎动物演化与人类起源重点实验室；中国科学院古脊椎动物与古人类研究所，北京 100044；2. 中国科学院生物演化与环境卓越创新中心，北京 100044；3. 中国科学院大学，北京 100049

**摘要：**烧骨常见于各类旧石器时代遗址中，作为用火残留物的一类，烧骨对研究人类用火行为有着极为重要的意义，而目前国内针对烧骨的研究工作开展得尚不够深入。本文通过介绍目前烧骨研究领域若干种主流的分析手段及其在考古学上的应用，以求能进一步完善国内关于旧石器时代人工用火的研究框架，同时希望能对中国古人类用火能力的相关研究提供有益的借鉴。

**关键词：**烧骨；用火残留物；人类行为；旧石器时代；动物考古学

中图分类号：K871.1/Q915.86；文献标识码：A；文章编号：1000-3193(2019)e-0243-12

## Technological analysis of the burned bones and its implications for Paleolithic archaeology

HUANG Chao<sup>1,2,3</sup>, ZHANG Shuangquan<sup>1,2,3</sup>

1. Laboratory for Vertebrate Evolution and Human Origins of CAS at the Institute of Vertebrate Paleontology and Paleoanthropology, Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100044; 2. CAS Center for Excellence in Life and Paleoenvironment, Beijing 100044; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100049;

**Abstract:** Burned bones are commonly found in Paleolithic sites. As one particular category of fire-use residues, burned bones are significant to a due understanding of the repertoire of hominin behaviors. However, the significance of these objects still remains largely unexplored in Chinese Paleolithic sites. In this paper, we present a review of analytical techniques in observation and quantification of the main features, including colors, fracture patterns, black carbon content, bone histology changes and the crystallinity of hydroxyapatite, of the burned skeletal remains from a

收稿日期：2018-07-05；定稿日期：2018-08-02；

基金项目：国家自然科学基金面上项目（41672023；41772025）

作者简介：黄超，（1991.6-），男，中国科学院古脊椎动物与古人类研究所硕士研究生，研究方向为旧石器时代动物考古学。

E-mail: [huangchao16@mailsucas.ac.cn](mailto:huangchao16@mailsucas.ac.cn)

通讯作者：张双权（1972-），男，中国科学院古脊椎动物与古人类研究所副研究员，主要从事埋藏学与旧石器时代动物考古学研究。E-mail: [zhangshuangquan@ivpp.ac.cn](mailto:zhangshuangquan@ivpp.ac.cn)

**Citation:** Huang C, Zhang SQ. Technological analysis of the burned bones and its implications for Paleolithic archaeology[J]. Acta Anthropologica Sinica, 2019, 38(e): 243-254

variety of contexts. We also mention three types of fire-use behavior that may be related to burnt bones researchs. In this way, we seek to provide a referential framework for future analysis of the burned bones from archaeological sites of China.

**Keywords:** Burned bone; Fire-use residue; Human Behavior; Paleolithic; Zooarchaeology

## 1 引言

旧石器考古遗址出土的烧骨材料作为燃烧残留物的一个重要类别，其对人类用火行为如肉食资源的加工处理、燃料利用以及火葬仪式的出现等问题都有着极为重要的意义<sup>[1]</sup>。本文着重介绍目前较为主流的针对烧骨材料的研究与分析方法，并探讨其在中国旧石器考古研究中的应用潜力与价值。

中文的“烧骨”一词属于涵盖性术语。在国内，凡是经过热源烧灼的骨骼，都被习惯性地称为“烧骨”；在国外，对这类经过烧灼的骨骼遗存根据其性状（本质上是燃烧程度）的不同从名称上作了细分<sup>[2]</sup>。“焦骨”（charred bone），指骨骼已经暴露在热源中或者直接接触了热源，并且由于灼烧，骨骼物质和软组织逐渐碳化而骨骼整体开始变黑；“煨烧骨或焙烧骨”（calcined or incinerated），指骨骼受热影响以至于所有的有机质跟水分均已流失，骨骼出现翘曲变形、破裂、颜色变白等现象，只是剩下一些融合在一起的骨盐仍然维持着骨骼的原本形态。而在火葬等仪式行为的研究中，“骨灰”（cremains or bone ashes）这一词也常用于经过烧灼的动物骨骼。因此，在介绍描述烧骨材料时，我们可能还需根据材料的性状进行更进一步的分类与命名，而非一概而论。为描述方便，本文依然采用“烧骨”一词来指代经过烧灼的骨骼，特殊情况则再另作说明。

相关实验研究显示，骨骼在焚烧过程中会发生一系列变化，包括变色、失重、破裂、强度改变、重结晶、孔隙度以及尺寸变化（主要是收缩）等<sup>[3]</sup>，其本质是组成骨骼的有机物与无机物在受热燃烧的条件下发生了各种反应<sup>[4]</sup>。Bonucci 和 Granziani 描述了骨骼在焚烧时所经历的变化<sup>[5]</sup>。Correia 根据这些变化以及它们发生在不同的温度，划分出了骨骼在焚烧过程中经历的脱水（dehydration）、分解（decomposition）、转化（inversion）和融合（fusion）四个阶段<sup>[6]</sup>。Thompson 则对其结论进行了一定程度的延伸与修正<sup>[3]</sup>，他认为，脱水阶段的主要表现是骨骼出现破裂、重量流失，这一现象大致发生在 100-600°C 之间；在分解阶段，骨骼颜色开始改变，机械强度减弱，孔隙度也开始改变，此阶段发生在 300-800°C；转化阶段骨骼则主要表现为内部晶体（主要为羟基磷灰石）尺寸增大，此变化出现在 500-1100°C；在融合阶段，骨骼收缩，机械强度又重新增加，孔隙度继续发生变化，晶体尺寸也继续增大，此阶段出现于 700°C 以上<sup>[3, 5-9]</sup>。每个阶段的烧骨都发生着复杂的物理和化学变化，包括可视的与不可视的，而烧骨研究的目的是去弄清楚发生这些变化的原因，尽可能地还原其从焚烧前到埋藏后的整个过程，并研究骨骼的焚烧程度，以更好地开展古人类用火行为的研究。以下根据这些变化来展开介绍相关分析手段并作考

古学研究方面的讨论。

## 2 烧骨性质的判断与识别

在考古遗址中,尤其是在旧石器时代,由于埋藏学因素(如铁锰污染、微生物作用等)的影响或干扰,某些可能并未经历火烧事件的动物骨骼在颜色、形态等方面也会呈现与烧骨较为类似的一些特点<sup>[10-12]</sup>。因此,对于烧骨材料的研究与分析首先就要致力于其客观性质的判断与识别。在这一方面,目前学术界的工作主要是围绕以下几个方面展开的:

### 2.1 骨骼颜色变化的分析

骨骼在焚烧过程中,随着焚烧程度的加强,骨骼中的有机物会产生一系列的化学反应,在外观上的表现则是骨骼表面会产生一系列的颜色变化。

最早在 1954 年的时候, Baby 就针对性地描述过骨骼在受热条件下表面颜色与表面形态相关的三个阶段<sup>[13,14]</sup>。Bonucci 和 Graziani 同样认为可以根据烧骨的颜色去推断其焚烧的温度<sup>[5]</sup>。Shipman 认为骨骼在烧灼中会发生不同的颜色变化是因为其中的化学组成在燃烧中发生了变化,并在烧骨实验中利用了 Munsell 测色系统来对烧骨的颜色进行了定量化的描述,她将实验中的烧骨样品依据不同颜色出现的温度划分了 5 个阶段:第一阶段为 20-285°C,骨骼样品大体颜色为原来的黄白色;第二阶段为 285-525°C,骨骼开始出现红棕色、深灰褐色、深灰色以及黄褐色;第三阶段为 525-645°C,骨骼样品由于碳化通体逐渐变黑,夹杂着蓝色和黄褐色;第四阶段为 645-940°C,骨骼样品变得通体发白,带有轻微的蓝灰色以及轻微的灰色;第五阶段为 940°C 以上,骨骼样品通体发白,夹杂着些许灰色以及黄褐色<sup>[9]</sup>。Nicholson 在其重复的烧骨实验中没能全部还原 Shipman 的实验结果,虽然颜色的变化序列大致相同,但烧骨的变化不能准确对应到后者所划分的温度范围中,通过实验结果, Nicholson 还提出烧骨的颜色变化应该与骨骼中的有机物含量有关<sup>[15]</sup>。Devlin 和 Herrmann 认为烧骨呈现黑色跟骨骼中的有机物焚烧碳化有关<sup>[14]</sup>。McKinley 则指出,烧骨颜色的不同除了与烧骨不同的焚烧温度有关,往往还跟供氧环境以及焚烧时间有关——骨骼在烧灼中呈现蓝色以及灰白色就是由于燃烧时氧气不足导致的<sup>[16]</sup>。无一例外的是,大多数学者都赞同骨骼在氧气充足持续的燃烧条件下,颜色会大致经历由未烧骨骼的自然颜色(多为黄白色),逐渐变化为深棕色,然后变成黑色,直到最后通体发白的这样一系列颜色上的变化<sup>[9,17,18]</sup>。

针对烧骨颜色的分析,可以判断骨骼的焚烧程度以及部分焚烧时的状况和埋藏环境,但研究者们也都承认,单一地通过颜色判断骨骼的焚烧程度是不可靠的,因为骨骼在埋藏过程中会由于矿物元素(锰、铁等)的污染而在表面形成类似焚烧后的颜色<sup>[10]</sup>。因此,在分析考古遗址出土的烧骨材料时,必须结合其它手段来做进一步的研究和确认<sup>[7,9,19-21]</sup>。

### 2.2 骨骼表面破裂形态的观察

骨骼在焚烧过程中，由于受热会形成宏观或微观上的破裂现象。

对于骨骼在受热情况下的破裂状况研究，已有考古学家和法医学工作者做了一系列的观察和描述<sup>[6, 22]</sup>，根据 Rockhold 的研究，骨骼焚烧时表面所产生的破裂根据出现的位置和延伸的方向可分为（以长骨为例）沿骨骼长轴（longitudinal）破裂、弯曲横向（curved transverse）破裂、笔直横向（straight transverse）破裂、皴裂（patina）和分层（delamination）5 个类型<sup>[23]</sup>。Herrmann 和 Bennett 在此基础上对各类型的破裂进行了更深一层的描述，他们认为骨骼中的胶原质给骨骼提供了良好的弹性，骨盐 - 羟基磷灰石则给骨骼提供了良好的硬度；当骨骼在焚烧的时候，有机质会被氧化分解，骨骼弹性发生剧变引起骨骼整体的收缩、扭曲（翘曲）和变形<sup>[22]</sup>。Stiner 认为焚烧引起的骨骼内羟基磷灰石结晶度的变化则对骨骼整体的脆性产生了影响<sup>[24]</sup>，骨骼经焚烧受热导致弹性和脆性的改变，是宏观上出现一系列破裂的原因。Herrmann 等人还开展了针对骨骼破损状况在焚烧后的识别度研究，认为焚烧前锐器在骨骼上形成的创伤（trauma）能够在焚烧后识别出来<sup>[22]</sup>。但他们的实验没有考虑到埋藏学的影响。另外，过去被认为是焚烧带肉骨骼特有的指甲型破裂（thumbnail fracture），在后来的实验研究上也被证明是不可靠的<sup>[25]</sup>。

在微观尺度下也有学者观察到了焚烧后骨骼组织产生裂纹和收缩的状况<sup>[20, 26, 27]</sup>，一些学者认为此现象可以作为骨骼焚烧的指示证据，但 Hanson 认为纵横交错的裂纹并不能作为判断烧骨的充分条件，后期埋藏对骨骼表面裂纹的形态也会起作用，不能以交错的裂纹作为判断骨骼经过高强度焚烧的唯一标准<sup>[18]</sup>。Stiner 也认为，烧骨更容易产生破裂，但破裂却不单是受热所导致的，压力也是其中的因素之一，如踩踏可能是导致骨骼变得破碎的主要原因之一，特别是在那些长期重复使用的考古遗址当中，情况可能更为普遍<sup>[24]</sup>。

### 2.3 黑碳类物质的测定

在有古人类用火迹象的遗址中，灰烬是常见的用火残留物，它是古人类在用火过程中，焚烧各类动植物形成的集合体的统称。在针对具有争议性的早期用火遗址的研究当中，过往常采取检测燃烧残留物中黑碳（black carbon）的化学分析手段来作为判断遗址中是否发生过燃烧事件的依据，分析对象常为遗址中的疑似经过燃烧的残留物。对于什么是黑碳，学界目前还没有一个十分明确的定义。一般认为，黑碳是化石燃料和生物质不完全燃烧产生的含碳物质的连续统一体，描述用语包括木炭（charcoal）、焦炭（char）、烟炱（soot）、石墨碳（graphitic carbon）、元素碳（elemental carbon）、聚合碳（polymeric carbon）、丝炭（fusain）、黑碳（black carbon）等<sup>[28-30]</sup>。通常骨骼中的有机质——胶原质（collagen）在燃烧的过程中就会产生此种黑碳类物质，在不完全燃烧的情况下，骨骼会呈现黑色的外观，这种状态就是我们俗称的碳化（carbonization）。在实际操作中，可以通过检测遗址中出土的带色骨骼是否包含游离炭来确认其是否为烧骨，也可以通过检测灰烬或沉积物中的元素碳含量来判断是否发生过燃烧事件<sup>[29]</sup>。围绕着周口店第一地点人类用火的可能性，许多学者都曾发表过自己的看法<sup>[31-34]</sup>，为了证明周口店第一地点曾经存在过人工用火事件，步达生等人对出土的黑色物质做过游离碳的鉴定，实验结果虽然证明了游离碳的存在，但却仍无法确认燃烧事件是否具有人工性质<sup>[35]</sup>。沈承德等人用在周口店第一地点开

展了针对沉积物和灰烬中元素碳的提取和含量的测定, 根据实验数据, 他认为第 10 层曾经有过原地燃烧事件, 但仍暂时无法通过这个方法区分燃烧事件是否具有人工性质<sup>[29]</sup>。除了周口店第一地点, 国内的一些疑为早期用火遗址也针对出土的黑色物质进行了碳含量的检测与分析<sup>[36-38]</sup>, 但具体是否为人工用火, 都还需要作进一步的探讨。而在国外类似的疑似早期用火遗址中, 针对 Swartkrans 遗址出土的黑色骨骼是否为烧骨, 学界内也做过一系列的讨论和黑碳类物质的提取分析<sup>[21,39]</sup>, 而除了游离碳的检测外, Brain 等人针对该遗址的燃烧残留物还进行了 CHN 元素的定量比值分析<sup>[11,40]</sup>, 通过对遗址中出土的黑色骨骼中碳氮元素的含量比值测定以及与其它用火现象明确的遗址中出土的烧骨做对比, 发现 Swartkrans 中的黑色骨骼碳氮元素比值具有明显的燃烧所形成的特征, 因而确认该黑色骨骼为烧骨。

总而言之, 对烧骨材料中黑碳类物质的检测 (游离炭、元素碳以及 CHN 比值) 可以确定其是否经过燃烧, 这一手段可以在一定程度上用于排除骨骼因矿物污染而变色的情况, 结合发掘环境中的其它要素如烧土等, 还能够一定程度上判断是否属于原地燃烧事件, 尤其是在研究早期疑似有用火现象的遗址时, 该方法具有较为重要的意义。但是, 该方法本身还暂时不能很好地区分原地的自燃火和人为用火, 从而具有相当的局限性<sup>[29]</sup>。

## 2.4 羟基磷灰石结晶度的测定

骨骼中的无机物——即骨盐, 占干重量骨的 65%~75%, 其中 95% 是固体的钙和磷, 这种无定形的钙-磷固体是一种结晶度很差的羟基磷灰石 (hydroxyapatite), 分子式为  $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ <sup>[41]</sup>。结晶度是指聚合物中晶体所占区域的比例, 结晶度指数 (Crystallinity Index) 也称为劈裂因子 (Splitting Factors)<sup>[42]</sup>, 是用来测量骨骼内晶体结构和组成的有序性的参数, 在新鲜骨骼中结晶度很低, 一般在 2.50-3.25 之间; 在成岩作用或者加热的条件下结晶度会增加, 意味着骨骼内晶体的有序性也在上升<sup>[9,42]</sup>。有多种方法可以测试骨骼中的结晶度, 而在烧骨研究中, 常用的是 X 射线衍射分析 (XRD) 和傅里叶红外光谱分析 (FTIR)。

XRD 测定结晶度的基本原理是当单色波的 X 射线接触到晶体样品时会产生构造的干涉, 如果条件满足布拉格定律 ( $n\lambda = 2d\sin\theta$ ), 则衍射的 X 射线能够被检测、处理并且计数下来。XRD 技术的一个缺点是不能准确地诊断出较低燃烧温度的结晶度具体变化。因而一些学者提议可以用 FTIR 来研究燃烧温度较低的情况<sup>[43]</sup>。FTIR 检测结晶度的原理是, 由于物质中分子间的联系并不稳定, 一直在进行运动例如振动、旋转和扭曲。当样品被红外线照射时, 这些一系列的运动能够被特定波长的官能团所吸收。FTIR 测结晶度指数有两种常用方法, 一种是 FTIR-KBr, 使用溴化钾来作为放置于分光仪试样室的待吸光测试的样品的辅助媒介; 另一种方法是 FTIR-ATR (attenuated total reflectance), 后者不需要太多的样品前处理工作, 效率较高, 但通过 XRD 检测出的结晶度指数不能直接和 FTIR 的结果做对比<sup>[43,44]</sup>。

Shipman 等人在烧骨实验中最先利用了 XRD 技术对不同焚烧温度下的骨骼中的结晶度进行了测试。她观察到了受热状况下骨骼在 X 射线衍射下图像的变化, 在 645°C 时, 图像中代表羟基磷灰石的波峰发生了明显的变化, 意味着骨骼中结晶度的迅速增大<sup>[9]</sup>; 往后多数研究者使用 FTIR 或 XRD 进行骨骼焚烧实验对羟基磷灰石进行观察时, 也都得出大致同样的结论<sup>[24,43,45-48]</sup>。FTIR 能够检测出低温受热状况下的骨骼的结晶度指数, 所以有

学者提议可以利用此方法去对古人类的处理食物的方式进行研究<sup>[49]</sup>。但也有学者指出, FTIR 技术在检测烧骨中羟基磷灰石结晶度的变化适用的范围仍然有争议, 骨骼在干燥的环境下埋藏, 由于风化与成岩作用的影响会在骨骼内部产生一定的重结晶作用, 形成类似于低温燃烧事件所达到的结晶度, 结晶度增大的速率则跟风化条件有关<sup>[24, 42]</sup>。不过有学者经过研究认为, 骨骼在埋藏后的成岩作用进程, 跟其埋藏时的状态也有关, 比达到焙烧程度的骨骼 (calcined bone), 普通骨骼和经过焚烧而碳化的骨骼 (charred bone) 会在埋藏过程中受成岩作用的影响更明显, 也就是说骨骼在埋藏前经历的焚烧程度越高, 埋藏后受成岩作用的影响就越小<sup>[47]</sup>。Thompson 等人通过实验则认为, 运用 FTIR-ATR 技术能够将未经烧过的骨骼从烧骨中区分出来<sup>[43]</sup>。还有学者表示, 如果在实验数据和分析手段足够精确的条件下, 成岩作用在骨骼矿物中其实只会产生有限的影响<sup>[50]</sup>。

## 2.5 烧骨的组织学观察

骨骼在埋藏过程当中, 有时会产生类似经过烧灼的痕迹, 如被土壤中的金属氧化物污染 (通常是氧化锰和氧化铁)<sup>[10, 24, 39]</sup> 或者微生物的作用<sup>[12, 26]</sup> 而导致骨骼表面以及内部变色, 又或是在埋藏过程中经历了踩踏事件和成岩作用的影响而导致骨骼表面产生类似焚烧后的破裂状况, 这些现象在判断遗址中出土的骨骼是否经过烧灼事件时都会产生一定的干扰<sup>[10, 24, 40, 51]</sup>, 因而一些学者开始期待在对烧骨的骨组织学观察上有所突破<sup>[18, 20]</sup>。

出于案件调查的需要, 法医学工作者是较早关注到烧骨组织学研究的领域的。Forbes 开展了关于骨骼组织在焚烧后的变化观察, 讨论了密质骨和松质骨在焚烧后组织学观察上的变化并根据这些变化的出现进行了简单的阶段划分与描述<sup>[27]</sup>。Herrmann 则对“彻底火化的骨骼” (completely cremated bone) 和新鲜骨骼做了镜下观察对比, 提出应该着重关注骨骼焚烧后产生的骨单元收缩现象<sup>[20]</sup>。Brain 为了验证 Swartkrans 遗址出土的黑色骨骼是焚烧事件的产物, 尝试性地做了骨骼焚烧实验, 他在 200-800°C 的温度范围中, 每隔 100°C 分别放置骨骼样品进行焚烧, 随后对焚烧的骨骼样品进行镜下的组织学观察并详细地描述了不同温度下样品的组织学上的变化, 通过与遗址出土的带色骨骼的切片进行对比, 认为其与焚烧实验的样品有着对应的相似性, 故认为 Swartkrans 出土的带色骨骼是焚烧后的结果<sup>[26]</sup>。Hanson 则在 Brain 的基础上进一步完善了烧骨组织学的对比实验; 他将实验骨骼分了四组, 进行焚烧的分为带肉、带油脂和脱油脂三组, 此外留了一组不加热的作为对照组; 在实验过程中, Hanson 详细地记录了实验骨骼加入和拿出时火堆的温度, 还记录了骨骼加入火堆中的时间和骨骼的焚烧延续时间, 此外还有火堆的燃料种类和骨骼在火堆中所放的位置; 根据实验烧骨的组织学观察状况, 他将焚烧程度划分了 6 个等级, 并依此对 Sibudu 遗址和 Cave of Hearths 遗址的出土烧骨进行了组织学对比观察, 确认了这两个遗址存在着不同焚烧程度的烧骨, 并且在 Sibudu 遗址中还确认到了高焚烧程度的骨骼<sup>[18]</sup>。Squires 等人则应用组织形态测定 (histomorphometry) 来对早期安哥拉 - 撒克逊人的火葬技术进行了一定程度的研究, 通过对骨膜等部位的观察推测了火葬温度、大致焚烧的持续时间和焚烧环境<sup>[52]</sup>。国内也有法医学工作者做过烧骨组织学的实验观察, 徐国昌等人利用光学显微镜和扫描电子显微镜技术对 200°C、400°C、600°C、800°C 以及 1000°C 的烧骨进行了组织形

态学观察, 认为通过组织学观察烧骨组织变化可以作为烧骨判定的基础资料<sup>[17]</sup>。

在对焚烧样品骨骼的切片观察中, 研究者们都观察到骨骼组织会随着温度的升高而产生明显的变化, 这些变化主要表现为骨板结构的分解、骨单元(哈佛氏系统)的变形收缩以及骨细胞等物质碳化后对哈佛氏管、沃克曼氏管和骨陷窝等区域的填充, 在焚烧的最终阶段, 骨骼中骨组织结构全部不可辨认<sup>[18, 20, 26, 27]</sup>。此外, 羟基磷灰石结晶也会在焚烧的过程中增大并逐渐填充整个骨骼内部的现象也有被研究者观察到<sup>[9]</sup>。

总之, 烧骨组织学研究能够给传统的烧骨研究提供另外一种观察的角度。通过烧骨组织学的观察, 可以有效地确认考古遗址出土的骨骼是否经过焚烧事件和经历的焚烧程度; 再者, 可以排除一些在后期沉积埋藏过程中由于物理和生物原因所形成的对焚烧特征辨别的干扰; 除此以外, 组织学的研究还能应用和推广到其它具有保存情况类似的材料的遗址当中<sup>[18]</sup>。但不少研究者也认为, 在对烧骨材料进行分析的时候, 不能单纯依靠骨组织学观察一种方法, 必须结合其它手段来共同研究<sup>[18, 20, 52]</sup>, 而且在做骨骼焚烧实验时, 要充分考虑骨骼的初始状态, 骨骼带肉与否以及去油脂与否都会一定程度上影响骨骼的最终焚烧状况<sup>[18]</sup>。

### 3 烧骨与古人类用火行为的研究

随着技术的创新与发展, 越来越多的新技术开始应用到烧骨材料的分析工作上, 虽然通过一系列的观察以及物理和化学分析方法能从其中提取出不少的关于信息, 但是对于考古学领域的研究来说, 还必须充分有效地利用这些信息去解答一些考古学问题, 许多学者也意识到了这一状况, 提出应将实验室得到的数据运用到有关人类行为的具体问题研究上<sup>[4, 18, 53-56]</sup>。

通过各种实验室检测分析手段的应用, 我们能够基本判知考古遗址出土的骨骼是否经过了焚烧以及大致的焚烧程度(温度和持续时间), 也能够估测骨骼在焚烧前的大致状况(带肉、不带肉、去油脂), 还能够了解骨骼在埋藏过程中的一些内部的变化(结晶度、组织学)。在确定人工用火性质明确的前提下, 遗址当中出现的烧骨材料, 除了反映骨骼垃圾的废弃行为外, 通常还意味着古人类的数种用火行为: ①对肉类资源进行热加工的行为; ②使用骨骼做燃料的行为; ③早期火葬或具有其它目的的仪式性行为。

#### 3.1 肉类资源热加工

目前最早关于人类对肉食资源获取行为的确切证据出现在距今约 260 万年的 Gona 遗址中<sup>[57]</sup>, 而真正的习惯性食肉行为则可能出现在 200 万年前<sup>[58]</sup>。Hlubik 认为, 推动古人类从偶尔性食肉向习惯性食肉转变的关键就是学会用火获取熟食。为了验证这个假说, 他认为必须在早更新世的考古工作中寻找直立人或者能人会使用火的确切证据<sup>[59]</sup>。而在探讨古人类对肉类资源的热加工问题上, Henry 认为难点在于如何判断那些受热破裂的碎骨是古人出于加工食物的行为所致还是只是随意地丢弃到火堆中所致<sup>[60]</sup>, Costamagno 提出可以通过烧骨中松质骨的出现频率、骨骼破碎强度以及焚烧强度来对烧骨堆的性质进行解释<sup>[61]</sup>。Cain 通过对 Sibudu 遗址的烧骨进行焚烧程度和烧骨破裂形式的统计观察, 认为遗

址中可能存在着人类消费了肉之后再 将骨骼丢进火堆的行为<sup>[56]</sup>。张双权等人在研究马鞍山遗址的动物骨骼时，则认为可以通过记录骨骼表面的火烧痕迹与切割痕迹的分布情况，并结合骨骼部位差异进行统计分析，可以一定程度反映古人类对肉食资源的热加工行为<sup>[62]</sup>。

### 3.2 骨骼燃料的使用

有学者认为出现在火塘遗迹中的部分烧骨还有可能是作为燃料使用的结果，Aldeias 做了相关燃料实验案例的统计，从中可以看出，实验中通常将骨骼和木料作为混合燃料去使用，特别是在生火后燃烧初始的阶段，这是因为点燃骨骼的温度大概在 380℃，所以骨骼需配合其它类型的燃料混合使用<sup>[63]</sup>。由于新鲜骨骼中含有大量的油脂，因而具有很好的助燃作用。实验显示，混合了骨骼的燃料与单纯用木材作为燃料对比，在具体的燃烧过程中会显示出不同的效果，使用新鲜的松质骨作为燃料能明显地增加燃烧时间<sup>[64]</sup>。

Costamagno 认为在讨论动物骨骼被用作燃料的可能性时，必须考虑以下三点：烧骨占总数的比例（通常占 76%）、烧骨的破碎程度（通常长度小于 2cm 的烧骨占总烧骨数的 56%）以及烧骨中松质骨的比例<sup>[61]</sup>。但由于燃烧和埋藏的影响，在实际研究工作中，能够将用于燃料功能的骨骼区分开来并不是那么的容易，因为它们与其它非燃料用途的烧骨差别甚微，而且由于埋藏风化或者人为踩踏等原因也会对烧骨本身造成相当程度的损坏<sup>[56, 63]</sup>，所以在对骨骼的燃料功能进行讨论时，需作更慎重的分析。

### 3.3 火葬行为研究

在火葬行为的研究上，目前已知世界上最早的火葬行为是出现在澳大利亚的 Lake Mungo<sup>[65, 66]</sup>，Bowler 等人在研究该遗址的火葬行为时，就针对了遗址出土烧骨中的 CN 同位素比值在受热条件下发生的变化做过相应的分析。另外，虽然不是旧石器时代的研究案例，但在历史时期的火葬研究中，针对烧骨的分析工作也起了较大的作用，而且对旧石器时代的火葬和仪式性行为研究有着极为重要的借鉴意义。有学者就盎格鲁-撒克逊（Anglo-Saxon）早期火葬行为做过一些详细的研究，McKinley<sup>[16]</sup>开展了综合的骨骼焚烧实验来对火葬的过程和结果进行了模拟重现；Squires 则通过利用烧骨的组织形态测定术结合 FTIR 作分析对比，推断出了火堆的温度大约在 600-900℃，而且个体之间在火化时间上可能具有差异<sup>[16, 52]</sup>。

总之，烧骨作为燃烧残留物的一类，它能够直接反映古人类的用火行为。在对考古遗址出土的烧骨材料进行分析研究时，考古学家尚需结合动物考古学<sup>[59, 62]</sup>、埋藏学<sup>[1, 24, 49, 67, 68]</sup>、野外焚烧实验<sup>[69, 70]</sup>和遗址中燃烧残留物综合性的空间分析<sup>[55, 59, 71, 72]</sup>等手段，综合研究、判断古人类对肉类资源的热处理<sup>[49, 59, 60, 73]</sup>、火塘燃料的选择与使用<sup>[63, 74-77]</sup>以及火葬<sup>[16, 78, 79]</sup>等相关科学问题。

## 4 讨论与展望

目前针对烧骨进行分析的手段有很多，目前常用的有颜色观察、骨骼表面破裂状况观

察、黑碳类物质的检测、结晶度测试以及骨组织学观察等,可以利用到的仪器技术也是多种多样,包括X射线衍射技术(XRD)、红外光谱分析(FTIR)和扫描电镜(SEM)等。通过观察和仪器分析,可以从烧骨中获取骨骼的焚烧程度,了解骨骼在焚烧前的大致状况以及推断烧骨的大致埋藏过程等信息;结合遗址中出土的火塘遗迹和其它燃烧残留物,利用动物考古学分析和空间分析等手段,我们可以更进一步地探讨古人类对肉食资源的加工利用以及用火目的、方式等学术问题。但是,目前该领域的研究工作虽然达成了一些共识,但也还存在着一些未解决的问题。骨骼焚烧是一个非常复杂的过程,加之焚烧后的骨骼还会经过一系列的人为活动或者其它动物的破坏,在进入埋藏阶段后,又会遭受一系列的风化和成岩作用的影响;所以要准确地还原出骨骼在焚烧前的状态和经历的焚烧过程具有较大的挑战性,还需要更多地开展不同环境下的骨骼焚烧实验和对应的埋藏学研究,同时应尽可能多地与发掘出土的烧骨材料做对比并结合各种分析测试手段,以获取更加全面的关于烧骨状态的信息,为古人类行为方面的研究提供更为科学、详尽的资料。

烧骨材料在国内旧石器时代早期到晚期的各类型遗址中均有发现,但在烧骨的研究领域目前还存在着较大的空白,针对烧骨开展相关实验室分析的多集中在碳含量的检测<sup>[29, 35-38]</sup>,讨论也大多集中在判断骨骼是否经过焚烧,少有学者就烧骨去联系人类行为开展深入的探讨。张双权等在研究马鞍山的材料时,尝试根据骨骼部位焚烧程度的差异来分析古人类的用火行为<sup>[62]</sup>。但总体来说,对烧骨材料的研究仍存在着较多的不足,而且还停留在较为单一的研究方向。根据此现状,未来国内在烧骨材料方面可能需要在以下三个方面进行强化与尝试:

1) 建立一套鉴定烧骨的标准。早期的遗迹中出土的带色骨骼常常成为争论遗址中古人类是否具有用火能力的焦点,如果能结合各种分析研究手段和模拟实验方法,建立起一套完整的烧骨鉴定标准,对此类骨骼材料的性质也会有相对更准确的判断。

2) 建立一套行之有效的烧骨分析技术流程。国内不少旧石器时代晚期的遗址有着丰富而明确的用火迹象,其中不乏大量的烧骨材料,而目前对用火现象的关注点都在火塘结构、木炭以及烧石烧土等方面,在烧骨方面则集中于种属和部位鉴定等工作,缺乏对燃烧信息进一步的提取,如果能合理地综合应用各交叉学科的分析技术去获取更多的信息,建立一套行之有效的分析流程,能够有利于拓宽研究视角,对随后的研究工作会有极大的帮助。

3) 获取更多的信息去研究人类行为。考古工作者们在对出现的烧骨材料进行解释时有时会过于理想化,缺乏对一些能够反映人类复杂用火行为的讨论。如若能积累更多的国内烧骨材料的研究经验和成果,可以让我们在面对一些早期具有争议性的用火遗址的材料时获得更多的信息,能够对我国旧石器时代人群的用火能力以及相关的人类行为有更立体和更清晰的了解。

总而言之,烧骨作为古人类的用火残留物,其和火塘、炭屑以及烧石等其它类型的燃烧残留物一样,对研究旧石器时代古人类的用火行为有着极其重要的作用。如今的研究手段也较为成熟,国内丰富的材料也可以保证研究的物质基础,故此领域仍具有巨大的研究潜力。如能对烧骨材料进行充分的分析,定能对中国乃至东亚地区古人类用火行为的研究做出独特的贡献。但也应了解到,对于焚烧骨骼的各种分析方法仍存在着较多的争议,故在针对烧骨进行分析时需尽可能地多利用各种方法,并在做出判断时保持谨慎。

致谢：本文在撰写过程中与张乐副研究员以及栗静舒博士进行过有益的交流；高星研究员为本文的写作提出了中肯的意见。作者在此一并致谢！

### 参考文献：

- [1] Pérez L, Sanchis A, Hernández CM, et al. Hearths and bones: An experimental study to explore temporality in archaeological contexts based on taphonomical changes in burnt bones[J]. *Journal of Archaeological Science: Reports*. 2017, 11: 287-309
- [2] Ellingham STD, Thompson TJU, Islam M, et al. Estimating temperature exposure of burnt bone — A methodological review[J]. *Science & Justice*. 2015, 55(3): 181-188
- [3] Thompson TJU. Recent advances in the study of burned bone and their implications for forensic anthropology[J]. *Forensic Science International*. 2004, 146: S203-S205
- [4] Reidsma FH, van Hoessel A, van Os BJH, et al. Charred bone: Physical and chemical changes during laboratory simulated heating under reducing conditions and its relevance for the study of fire use in archaeology[J]. *Journal of Archaeological Science: Reports*. 2016, 10: 282-292
- [5] Bonucci E, Graziani G. Comparative thermogravimetric, X-ray and electron microscope investigations of burnt bone from recent, ancient and prehistoric age.[J]. *Atti Della Accademia dei Cincei, Scienze Fisiche, Matematiche e Naturali Series*. 1975, 8(59): 517-534
- [6] Correia PMM. Fire Modification of Bone: A Review of the Literature[M]. *Forensic Taphonomy: The Post-mortem Fate of Human Remains*, Sorg MH, Haglund WD, CRC Press, 1997, 668
- [7] 李骁勇, 靳万祥, 马伟龙, 等. 烧骨的研究现状与展望 [J]. *刑事技术*. 2009(01): 32-35
- [8] Thompson TJU. Heat-induced dimensional changes in bone and their consequences for forensic anthropology[J]. *Journal of Forensic Science*. 2005, 50(5): 1008-1015
- [9] Shipman P, Foster G, Schoeninger M. Burnt bones and teeth: an experimental study of color, morphology, crystal structure and shrinkage[J]. *Journal of Archaeological Science*. 1984, 4(11): 307-325
- [10] Shahack-Gross R, Bar-Yosef O, Weiner S. Black-Coloured Bones in Hayonim Cave, Israel: Differentiating Between Burning and Oxide Staining[J]. *Journal of Archaeological Science*. 1997, 24(5): 439-446
- [11] Brain CK, Sillen A. Evidence From The Swartkrans Cave For The Earliest Use Of Fire[J]. *Nature*. 1988, 336(6198): 464-466
- [12] Hackett CJ. Microscopical Focal Destruction (Tunnels) in Exhumed Human Bones[J]. *Medicine, Science and the Law*. 1981, 21(4): 243-265
- [13] Baby R. Hopewell cremation practices.[J]. *The Ohio Historical Society. Papers in Archaeology*. 1954(1): 1-17
- [14] Devlin JB, Herrmann NP. Bone Color as an Interpretive Tool of the Depositional History of Archaeological Remains[M]. *The Analysis of Burned Human Remains*, Schmidt CW, Symes SA, London: Academic Press, 2008, 109-128
- [15] Nicholson RA. A Morphological Investigation of Burnt Animal Bone and an Evaluation of its Utility in Archaeology[J]. *Journal of Archaeological Science*. 1993, 20(4): 411-428
- [16] Mckinley JI. The Anglo-Saxon Cemetery at Spong Hill, North Elmham Part VIII: The Cremations. *Field Archaeology Division, Norfolk. East Anglian Archaeology Report No. 69*. [G]. 1994
- [17] 徐国昌, 张培华, 任甫, 等. 基于光学、电子显微镜图像的烧骨组织学变化特征 [J]. *解剖学杂志*. 2012, 35(3): 380-383
- [18] Hanson M, Cain CR. Examining histology to identify burned bone[J]. *Journal of Archaeological Science*. 2007, 34(11): 1902-1913
- [19] 张森水. 关于西侯度的问题 [J]. *人类学学报*. 1998(02): 2-14
- [20] Herrmann B. On histological investigations of cremated human remains[J]. *Journal of Human Evolution*. 1977, 6(2): 101-103
- [21] Oakley KP. Evidence of Fire in South African Cave Deposits[J]. *Nature*. 1954, 174(4423): 261-262
- [22] Herrmann NP, Bennett JL. The differentiation of traumatic and heat-related fractures in burned bone[J]. *Journal of Forensic Sciences*. 1999, 44(3): 461-469
- [23] Rockhold LA. Bones: Bullets, Burns, Bludgeons, Blunders and Why[A]. In *Burned bone, Proceedings of the bone trauma workshop: American Academy of Forensic Sciences*[C], Nashville, 1996:19-24
- [24] Stiner MC, Kuhn SL, Weiner S, et al. Differential Burning, Recrystallization, and Fragmentation of Archaeological Bone[J]. *Journal of Archaeological Science*. 1995, 22(2): 223-237
- [25] Gonçalves D, Thompson TJU, Cunha E. Implications of heat-induced changes in bone on the interpretation of funerary behaviour and practice[J]. *Journal of Archaeological Science*. 2011, 38(6): 1308-1313

- [26] Brain CK. The Occurrence of Burnt Bones at Swartkrans and Their Implications for the Control of Fire by Early Hominids[M]. Swartkrans: A Cave's Chronicle of Early man., Brain CK, Pretoria:Transvaal Museum, 1993, 229-242
- [27] Forbes G. The Effects of Heat on the Histological Structure of Bone[J]. The Police Journal. 1941, 14(1): 50-60
- [28] 曹军骥, 占长林. 黑碳在全球气候和环境系统中的作用及其在相关研究中的意义 [J]. 地球科学与环境学报. 2011(02): 177-184
- [29] 沈承德, 易惟熙, 杨英, 等. 周口店猿人遗址样品“元素碳”浓度机器应用于人类用火证据探究的可能性 [J]. 科学通报. 2004,49(3):275-278
- [30] 周斌, 沈承德, 易惟熙, 等. 土壤中元素碳的测定与研究 [J]. 土壤与环境. 2002(02): 133-135
- [31] Binford LR, Stone NM, Aigner JS, et al. Zhoukoudian: A Closer Look[J]. Current Anthropology. 1986, 27(5): 453-475
- [32] Wu XZ, Weiner S, XuQQ, et al. Investigating the Possible Use of Fire at Zhoukoudian, China[J]. Science. 1999, 283: 299
- [33] Weiner S, Xu Q, Goldberg P, et al. Evidence for the use of fire at Zhoukoudian[J]. Science. 1998(281): 251-253
- [34] Gao X, Zhang SQ, Zhang Y, et al. Evidence of Hominin Use and Maintenance of Fire at Zhoukoudian[J]. Current Anthropology. 2017, 58(S16): S267-S277
- [35] Black D. Evidences of the use of fire by Sinanthropus[J]. Bulletin of the Geological Society of China 1931, 11(2):107-108
- [36] 金牛山联合发掘队. 辽宁营口金牛山遗址旧石器文化的研究 [J]. 古脊椎动物与古人类. 1978, 16(2): 129-136
- [37] 张森水. 富林文化 [J]. 古脊椎动物与古人类. 1977, 15(1): 14-27
- [38] 吴茂森, 王令红, 张银运, 等. 贵州桐梓发现的古人类化石及其文化遗物 [J]. 古脊椎动物与古人类. 1975(01): 14-23
- [39] Oakley KP. On man's use of fire, with comments on tool-making and hunting[J]. Social life of early man. 1961, 31: 176-193
- [40] Sillen A, Hoering T. Chemical Characterization of Burnt Bones from Swartkrans[M]. Swartkrans: A Cave's Chronicle of Early man., Brain CK, Pretoria:Transvaal Museum, 1993, 243-249
- [41] 胥少汀, 葛宝丰, 徐印坎. 实用骨科学 [M]. 人民军医出版社, 2012: 19
- [42] Stiner MC, Kuhn SL, Surovell TA, et al. Bone Preservation in Hayonim Cave (Israel): a Macroscopic and Mineralogical Study[J]. Journal of Archaeological Science. 2001, 28(6): 643-659
- [43] Thompson TJU, Gauthier M, Islam M. The application of a new method of Fourier Transform Infrared Spectroscopy to the analysis of burned bone[J]. Journal of Archaeological Science. 2009, 36(3): 910-914
- [44] Thompson TJU, Islam M, Piduru K, et al. An investigation into the internal and external variables acting on crystallinity index using Fourier Transform Infrared Spectroscopy on unaltered and burned bone[J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology. 2011, 299(1-2): 168-174
- [45] Snoeck C, Lee-Thorp JA, Schulting RJ. From bone to ash: Compositional and structural changes in burned modern and archaeological bone[J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology. 2014, 416: 55-68
- [46] Monge G, Carretero MI, Pozo M, et al. Mineralogical changes in fossil bone from Cueva del Angel, Spain: archaeological implications and occurrence of whitlockite[J]. Journal of Archaeological Science. 2014, 46: 6-15
- [47] Lebon M, Reiche I, Bahain JJ, et al. New parameters for the characterization of diagenetic alterations and heat-induced changes of fossil bone mineral using Fourier transform infrared spectrometry[J]. Journal of Archaeological Science. 2010, 37(9): 2265-2276
- [48] Piga G, Malgosa A, Thompson TJU, et al. A new calibration of the XRD technique for the study of archaeological burned human remains[J]. Journal of Archaeological Science. 2008, 35(8): 2171-2178
- [49] Koon HEC, Nicholson RA, Collins MJ. A practical approach to the identification of low temperature heated bone using TEM[J]. Journal of Archaeological Science. 2003, 30(11): 1393-1399
- [50] Schmahl WW, Kocsis B, Toncala A, et al. The Crystalline State of Archaeological Bone Material[M]. Across the Alps in Prehistory, Al GGE, Springer International Publishing, 2017:75-104
- [51] Taylor RE, Hare PE, White TD. Geochemical criteria for thermal alteration of bone[J]. Journal of Archaeological Science. 1995, 22(1): 115-119
- [52] Squires KE, Thompson TJU, Islam M, et al. The application of histomorphometry and Fourier Transform Infrared Spectroscopy to the analysis of early Anglo-Saxon burned bone[J]. Journal of Archaeological Science. 2011, 38(9): 2399-2409
- [53] Sandgathe DM. Identifying and Describing Pattern and Process in the Evolution of Hominin Use of Fire[J]. Current Anthropology. 2017, 58(S16): S360-S370
- [54] Goldberg P, Miller CE, Mentzer S M. Recognizing Fire in the Paleolithic Archaeological Record[J]. Current Anthropology. 2017, 58(S16): S175-S190
- [55] Alperson-Afil N. Spatial Analysis of Fire: Archaeological Approach to Recognizing Early Fire[J]. Current Anthropology. 2017, 58(S16): S258-S266
- [56] Cain CR. Using burned animal bone to look at Middle Stone Age occupation and behavior[J]. Journal of Archaeological Science.

- 2005, 32(6): 873-884
- [57] Semaw S, Rogers MJ, Quade J, et al. 2.6-Million-year-old stone tools and associated bones from OGS-6 and OGS-7, Gona, Afar, Ethiopia[J]. *Journal of Human Evolution*. 2003, 45(2): 169-177
- [58] Ferraro JV, Plummer TW, Pobiner BL, et al. Earliest Archaeological Evidence of Persistent Hominin Carnivory[J]. *PLoS ONE*. 2013, 8(4): e62174
- [59] Hlubik S, Berna F, Feibel C, et al. Researching the Nature of Fire at 1.5 Mya on the Site of FxJ20 AB, Koobi Fora, Kenya, Using High-Resolution Spatial Analysis and FTIR Spectrometry[J]. *Current Anthropology*. 2017, 58(S16): S243-S257
- [60] Henry AG. Neanderthal Cooking and the Costs of Fire[J]. *Current Anthropology*. 2017, 58(S16): S329-S336
- [61] Costamagno S, Théry-Parisot I, Castel J, et al. Combustible ou non? Analyse multifactorielle et modèles explicatifs sur des ossements brûlés paléolithiques[M]. *Fuel Management during the Palaeolithic and Mesolithic Periods New tools, new interpretations*, Théry-Parisot I, Costamagno S, Henry A, England: British Archaeological Reports, 2008, 65-84
- [62] 张双权, 张乐, 栗静舒, 等. 晚更新世晚期中国古人类的广谱适应生存——动物考古学的证据 [J]. *中国科学: 地球科学*. 2016(08): 1024-1036
- [63] Aldeias V. Experimental Approaches to Archaeological Fire Features and Their Behavioral Relevance[J]. *Current Anthropology*. 2017, 58(S16): S191-S205
- [64] Théry-Parisot I, Costamagno S, Brugal J. The use of bone as fuel during the Palaeolithic, experimental study of bone combustible properties[M]. *The Zooarchaeology of Fats, Oils, Milk and Dairying*, Mulville J, Outram K, Oxbow Books, 2005, 50-59
- [65] Bowler JM, Thome AG, Polach HA. Pleistocene Man in Australia: Age and Significance of the Mungo Skeleton[J]. *Nature*. 1972(240): 48-50
- [66] Bowler JM, Jones R, Allen H, et al. Pleistocene human remains from Australia: A living site and human cremation from Lake Mungo, western New South Wales[J]. *World Archaeology*. 1970: 39-60
- [67] Seitsonen O, Seitsonen S, Broderick LG, et al. Burnt bones by Europe's largest lake: Zooarchaeology of the Stone Age and Early Metal period hunter-gatherers at Lake Ladoga, NW Russia[J]. *Journal of Archaeological Science: Reports*. 2017, 11: 131-146
- [68] Rhodes SE, Walker MJ, López-Jiménez A, et al. Fire in the Early Palaeolithic: Evidence from burnt small mammal bones at Cueva Negra del Estrecho del Río Quípar, Murcia, Spain[J]. *Journal of Archaeological Science: Reports*. 2016, 9: 427-436
- [69] Carroll EL, Smith M. Burning questions: Investigations using field experimentation of different patterns of change to bone in accidental vs deliberate burning scenarios[J]. *Journal of Archaeological Science: Reports*. 2018, 20: 952-963
- [70] Gowlett JAJ, Brink JS, Caris A, et al. Evidence of Burning from Bushfires in Southern and East Africa and Its Relevance to Hominin Evolution[J]. *Current Anthropology*. 2017, 58(S16): S206-S216
- [71] 关莹, 高星, 王惠民, 等. 水洞沟旧石器时代晚期遗址结构的利用分析 [J]. *科学通报*. 2011(33): 2797-2803
- [72] Alpers-Afli N, Goren-Inbar N. The Acheulian Site of Gesher Benot Ya'aqov [M]. Volume II ed. Springer, 2010: 19-71
- [73] Wrangham R. Control of Fire in the Paleolithic: Evaluating the Cooking Hypothesis[J]. *Current Anthropology*. 2017, 58(S16): S303-S313
- [74] Monteiro PD, Zapata L, Bicho N. Fuel uses in Cabeço da Amoreira shell midden: An insight from charcoal analyses[J]. *Quaternary International*. 2017, 431: 27-38
- [75] Allué E, Solé A, Burguet-Coca A. Fuel exploitation among Neanderthals based on the anthracological record from Abric Romani (Capellades, NE Spain)[J]. *Quaternary International*. 2017, 431: 6-15
- [76] Costa C. The Use of Animal Bone as Fuel in the Third Millennium BC Walled Enclosure of Castanheiro do Vento (Northern Portugal)[J]. *International Journal of Osteoarchaeology*. 2016, 26(5): 877-884
- [77] Braadbaart F, Poole I, Huisman HDJ, et al. Fuel, Fire and Heat: an experimental approach to highlight the potential of studying ash and char remains from archaeological contexts[J]. *Journal of Archaeological Science*. 2012, 39(4): 836-847
- [78] Snoeck C, Schulting RJ, Lee-Thorp JA, et al. Impact of heating conditions on the carbon and oxygen isotope composition of calcined bone[J]. *Journal of Archaeological Science*. 2016, 65: 32-43
- [79] Webb H. Cremated Human Remains[M]. *London Gateway: Iron Age and Roman salt making in the Thames Estuary. Excavation at Stanford Wharf Nature Reserve, Essex.*, Biddulph E, Stafford E, Foreman S, et al, Oxford Archaeology, 2012, 209