

# 河南偃师二里头遗址动物骨胶原的 H、O 稳定同位素分析\*

司 艺<sup>①②③</sup> 李志鹏<sup>④</sup> 胡耀武<sup>①②</sup> 袁 靖<sup>④</sup> 王昌燧<sup>①②</sup>

(①中国科学院古脊椎动物与古人类研究所,中国科学院脊椎动物演化与人类起源重点实验室,北京 100044; ②中国科学院大学人文学院科技史与科技考古系,北京 100049; ③河南大学历史文化学院,开封 475001; ④中国社会科学院考古研究所,北京 100710)

**摘要** 考古遗址中人(动物)骨胶原的 H、O 稳定同位素分析,是近些年来国际古食谱分析涌现的新研究方向,但我国在此方面尚无任何报道。本文对河南偃师二里头遗址出土动物骨骼胶原蛋白中的  $\delta D$  和  $\delta^{18}O$  值进行测试分析,以期深入了解动物的饲养方式以及可能的迁徙活动。作为杂食类动物的猪,较食草类动物(鹿、黄牛和绵羊)具有稍高的  $\delta D$  值,这主要缘于  $\delta D$  沿营养级上升时产生的富集作用。在所有动物中,猪的  $\delta^{18}O$  值标准偏差(0.3‰)最小,可能与先民对猪繁殖时间和宰杀年龄的严格控制密切相关。在食草类动物中,与野生动物鹿( $\delta^{18}O$  平均值为  $9.1 \pm 0.7\text{‰}$ ,  $n=5$ )相比,家养的黄牛( $\delta^{18}O$  平均值为  $10.4 \pm 0.4\text{‰}$ ,  $n=5$ )和绵羊( $\delta^{18}O$  平均值为  $11.1 \pm 0.6\text{‰}$ ,  $n=5$ )具有较高的  $\delta^{18}O$  值,表明它们栖息于更为开阔的环境且食用了较多的  $C_4$  类植物(粟类农作物的副产品)和植物纤维素。相对而言,绵羊较黄牛摄取了更多富含  $^{18}O$  的植物茎叶,从而使其  $\delta^{18}O$  值高于黄牛。因新陈代谢方式及饮用水来源的差异,反刍动物(鹿、黄牛和绵羊)的  $\delta^{18}O$  值普遍高于非反刍动物(猪,  $\delta^{18}O$  平均值为  $7.3 \pm 0.3\text{‰}$ ,  $n=11$ )。此外,4 种动物均出现了具有迥异  $\delta D$  和  $\delta^{18}O$  值的个体,表明他们很可能来源于外地,出于进贡或交流的目的出现于二里头遗址。

**关键词** H、O 稳定同位素 二里头遗址 管理策略 代谢类型 饮食结构

**中图分类号** K871.2, Q915.2<sup>3</sup>, P593

**文献标识码** A

## 1 前言

通过考古遗址中出土人(动物)骨中骨胶原的 C、N 稳定同位素分析,探讨人(动物)的食物结构,揭示先民生活方式的转变以及动物的驯化、饲养和管理方式,了解人与动物同行的发展史,已成为国际生物考古研究的重要组成部分<sup>[1-8]</sup>。近些年来,骨胶原中的另两种稳定同位素——H、O,正日益成为国际古食谱分析的新研究生长点<sup>[9-11]</sup>。

所有的水文学进程都遵循同样一个简单的定律:重同位素倾向于存留在液相或固相中,而轻同位素更易分配于气相中<sup>[12,13]</sup>。某一区域内降水的 H、O 稳定同位素组成,就与当地的温度、湿度等环境因素正相关,与该地区的纬度、海拔成负相关<sup>[14]</sup>。因此,各地区环境(包括温度、湿度、纬度等)的不同,将导致其降水中的  $\delta D$  和  $\delta^{18}O$  值也产生相应的差异。对于生态系统中的生物而言,其食物和饮水,均直接

或间接的与该地区的降水密切相关。因此,通过分析生物组织中的  $\delta D$  和  $\delta^{18}O$  值,即可总体上揭示其生存环境的特征,了解其可能的迁徙活动和来源<sup>[15,16]</sup>。骨胶原中的 H,以 C-H 基团、O-H 基团和 N-H 基团 3 种形式存在。对于哺乳动物而言,其中只有 C-H 基团中的氢为不可交换的氢,约占骨胶原中所有氢的 80%<sup>[11]</sup>。显然,仅有骨胶原中的不可交换 H 同位素,才对食物及水源具有指示意义<sup>[17]</sup>。在沿营养级传递时,  $\delta D$  值会产生一定程度的富集作用<sup>[18]</sup>。故此,通过对骨胶原中 H 同位素的分析,可望进一步判断生物的营养级级别。相对于 H 而言, O 来源则更为复杂,可来源于食物、饮用水和空气<sup>[19]</sup>。此外, O 的代谢可从消化、汗液、呼吸等途径加以排泄<sup>[20]</sup>。因此,相对 H 同位素而言, O 同位素的诠释,更为困难一些。但无论如何,骨胶原中 H 和 O 同位素的分析,可用以指示个体的生存环境、食物来源及饮用水的特征<sup>[9,10]</sup>。

第一作者简介:司 艺 女 28 岁 讲师 科技考古专业 E-mail: simuxuan@163.com

\* 中国科学院战略性先导科技专项项目(批准号: XDA05130303)、科技部国家科技支撑计划项目(批准号: 2010BAK67B03 和 2013BAK08B03)和国家自然科学基金项目(批准号: 41373018)共同资助

2013-08-17 收稿, 2013-10-28 收修改稿

通讯作者: 胡耀武 E-mail: yw.hu@ucas.ac.cn

Ehleringer 等<sup>[15]</sup>对美国 18 州 65 城市居民头发与当地饮用水的  $\delta D$  和  $\delta^{18}O$  值进行调查对比,发现人体胶原蛋白与饮用水间的  $\delta D$  和  $\delta^{18}O$  值存在显著的正相关性,依据全美国饮用水  $\delta D$  值的地区分布,进一步建立了美国 48 个州当地居民的头发  $\delta D$  值分布地图,这对研究个体的迁徙和对不明身份个体的来源鉴定有重要意义。Hobson 和 Wassenaar<sup>[21]</sup>利用  $\delta D$  值的地域分布特征,对新热带区鸟类在繁殖地和越冬地之间的迁移活动进行了论证。Sjögren 和 Price<sup>[14]</sup>对瑞典西部两个新石器时代遗址中的家养羊、牛、猪和人的 Sr、O、C 稳定同位素进行了研究,表明与猪本地饲养情况不同,牛、羊都存在迁徙,以牛的迁徙比例最大,反映了当时地区间的经济交流非常频繁,也暗示了新石器时代牛除了具有经济等实用功能外,可能还存在文化上的象征意义。Reynard 和 Hedges<sup>[11]</sup>对英国 Windmill Hill 遗址、Yarnton 遗址、Danebury 遗址和匈牙利 Balatonszarszo 遗址出土的牛和人的骨胶原 H 稳定同位素进行对比研究,指出 Windmill Hill 遗址时期很可能发生过短期的气候波动。

我国的古食谱分析工作,始于 20 世纪 80 年代。近些年来,无论在我国的考古界或科技考古界,古食谱的分析业已受到越来越多学者的重视,有关研究的报道也层出不穷。然而,总体而言,我国目前的研究,还主要集中在 C、N 稳定同位素上,在 H、O 稳定同位素的分析与研究上尚属空白。鉴于此,本文尝试对二里头遗址出土动物(猪、鹿、黄牛和绵羊)骨骼胶原蛋白 H、O 稳定同位素进行分析,探索二里头先民家畜管理利用模式,饲养策略及可能的迁徙活动。

## 2 材料和方法

### 2.1 考古背景和样品选择

二里头遗址<sup>[22,23]</sup>位于河南省偃师市翟镇二里头村,地处黄河流域伊洛盆地,是二里头文化的超大型中心聚落,夏商周断代工程将二里头遗址的年代定为 1880~1521 BC<sup>[24]</sup>。迄今为止,该遗址发现了中国最早的宫城和大型宫室建筑群、最早的青铜礼器群和青铜冶铸作坊、最早的双轮车辙,以及同类遗存中前所未见的绿松石制作作坊。目前,二里头遗址是可确认的中国最早的王朝都城遗址<sup>[25]</sup>。

选取二里头遗址动物骨骼共 31 例,其中,黄牛 6 例,绵羊 6 例,猪 13 例,鹿 6 例。为保证样品的唯一性,对同一出土单位同种属动物选取同一部位、同一侧的骨骼制样。动物种属、文化分期及取样部位

等信息见表 1。

### 2.2 骨胶原制备

样品制备依据 Jay 和 Richards<sup>[26]</sup>的骨胶原提取方法,并进行适当改进。机械去除骨样内、外表面污染物,超声清洗并干燥。选取约 2g 骨样,加入 0.5M HCl 于 5℃ 下浸泡,每隔三、四天换新鲜酸液,直至骨样酥软、无气泡。去离子水清洗至中性,加入 0.125M NaOH 室温下浸泡 20 小时,再洗至中性。加入 0.001M HCl 在 70℃ 下明胶化 48 小时,浓缩并热滤,冷冻干燥得骨胶原。

### 2.3 H、O 稳定同位素测试及数据统计分析

如前所示,骨胶原中只有不可交换 H 同位素对环境 and 饮食具有指示意义,因此,在同位素测试中首先需要排除可交换 H 的影响。第一种方法是将骨胶原样品长时间暴露于已知  $\delta D$  值的蒸汽环境中,待骨胶原中可交换的氢同位素完全被已知  $\delta D$  值的氢替换后,进行测量,计算不可交换部分的  $\delta D$  值<sup>[27,28]</sup>;第二种方法是通过将测试样品与标准样品在相同大气环境中暴露平衡,约 48 小时骨胶原中可交换的氢即可同环境达到平衡<sup>[29]</sup>。需要说明的是,这种方法得到的  $\delta D$  值并非样品中不可交换氢的绝对数值,而是绝对数值加上实验环境的基底效应。由于基底效应的一致性,样品间  $\delta D$  值的相对关系仍然准确,不影响测试样品间同位素的对比分析。然而如果要根据  $\delta D$  值大小进行古气候(温度和湿度)复原重建,那么这种方法得到的数据就不可用。本文的研究目的是通过 H、O 稳定同位素对比分析动物的饮食结构差异,仅需样品  $\delta D$  值的相对关系,因此我们的样品测试采用了第二种方法。

骨骼胶原蛋白中 H、O 稳定同位素比值的测定,在中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所测试中心进行,H、O 稳定同位素采用高温裂解的方法,使用 elemental PyroCube 连接到 ISOPRIME-100 同位素比质谱仪进行同位素分析。在分析过程中,采用国际上通用的平衡时间,分别以国际标样 IAEA-601 和 IAEA-CH7 为标准,分析精度分别为 1.5‰ 和 0.3‰。样品的 H、O 同位素分析结果分别以相对 SMOW 的  $\delta D$  和  $\delta^{18}O$  表示,结果见表 1。

数据统计和分析采用 SPSS13.0 和 Origin 8.0。

## 3 结果与讨论

### 3.1 骨骼的污染

骨骼在埋藏环境中,由于受到周围环境的 pH

表1 样品考古背景及其骨胶原中C、N元素含量和 $\delta D$ 、 $\delta^{18}O$ 值\*Table 1 Sample archaeological contexts, as well as C, N contents and  $\delta D$ ,  $\delta^{18}O$  values of bone collagen

编号	分期	物种	部位	骨胶原产率/%	C/%	N/%	C/N	$\delta D$ /‰	$\delta^{18}O$ /‰
a12	IV	绵羊 ( <i>Ovis sp.</i> )	下颌(左)	1.3	39.9	14.3	3.2	-61.3	9.0
a14	ELG	绵羊 ( <i>Ovis sp.</i> )	下颌(右)	6.1	38.3	13.6	3.3	-65.2	10.6
a24	II	绵羊 ( <i>Ovis sp.</i> )	下颌(左)	4.6	40.8	14.8	3.2	-65.3	11.6
b1	IV	绵羊 ( <i>Ovis sp.</i> )	桡骨(左)	5.2	48.2	16.9	3.3	-66.2	11.0
b2	III	绵羊 ( <i>Ovis sp.</i> )	桡骨(左)	8.9	48.6	17.1	3.3	-70.2	10.6
b36	ELG	绵羊 ( <i>Ovis sp.</i> )	桡骨(左)	6.1	49.2	17.5	3.3	-64.0	11.8
b25	II	猪 ( <i>Sus scrofa domesticus</i> )	桡骨(左)	5.0	47.1	16.6	3.3	-69.9	8.0
b50	ELG	猪 ( <i>Sus scrofa domesticus</i> )	桡骨(左)	2.7	48.0	17.1	3.3	-63.4	7.4
a34	IV	猪 ( <i>Sus scrofa domesticus</i> )	下颌(左)	3.1	37.6	13.8	3.2	-61.7	7.4
a33	III	猪 ( <i>Sus scrofa domesticus</i> )	下颌(左)	7.5	40.5	14.7	3.2	-59.3	7.1
a35	III	猪 ( <i>Sus scrofa domesticus</i> )	下颌(左)	3.3	40.8	14.7	3.2	-66.2	7.2
b14	III	猪 ( <i>Sus scrofa domesticus</i> )	桡骨(左)	6.1	32.2	11.3	3.3	-68.2	7.1
a43	ELG	猪 ( <i>Sus scrofa domesticus</i> )	下颌(左)	3.2	32.7	12.8	3.3	-61.7	7.6
a39	II	猪 ( <i>Sus scrofa domesticus</i> )	下颌(左)	6.7	41.6	15.1	3.2	-58.8	6.8
b21	III	猪 ( <i>Sus scrofa domesticus</i> )	桡骨(左)	2.2	46.5	16.5	3.3	-74.9	7.3
a47	ELG	猪 ( <i>Sus scrofa domesticus</i> )	下颌(左)	5.5	42.2	15.2	3.2	-68.6	7.3
b51	IV	猪 ( <i>Sus scrofa domesticus</i> )	桡骨(左)	5.8	43.6	15.5	3.3	-69.7	6.9
a42	ELG	猪 ( <i>Sus scrofa domesticus</i> )	下颌(左)	3.9	41.3	14.7	3.3	-56.9	8.6
a41	ELG	猪 ( <i>Sus scrofa domesticus</i> )	下颌(左)	1.9	39.0	13.9	3.2	-47.9	7.3
b18	II	鹿 ( <i>Cervus nippon</i> )	肱骨(右)	5.1	28.6	10.1	3.3	-65.2	9.4
b38	III	鹿 ( <i>Cervus nippon</i> )	肩胛骨(右)	1.7	46.4	16.3	3.3	-75.3	8.7
a52	II	鹿 ( <i>Cervus nippon</i> )	下颌(左)	1.0	41.5	14.8	3.3	-70.1	8.4
b5	II	鹿 ( <i>Cervus nippon</i> )	肱骨(右)	1.7	47.1	16.6	3.3	-70.4	10.1
a48	IV	鹿 ( <i>Cervus nippon</i> )	下颌(左)	5.5	42.2	15.2	3.2	-74.2	9.0
b29	II	鹿 ( <i>Cervus nippon</i> )	肱骨(右)	8.7	46.8	16.5	3.3	-63.9	11.2
a3	?	黄牛 ( <i>Bos sp.</i> )	下颌(左)	4.9	38.2	14.2	3.1	-86.1	9.0
a4	II	黄牛 ( <i>Bos sp.</i> )	下颌(左)	9.7	41.3	15.0	3.2	-78.1	9.9
a7	III	黄牛 ( <i>Bos sp.</i> )	下颌(左)	3.6	41.1	14.7	3.3	-64.6	10.4
a5	II	黄牛 ( <i>Bos sp.</i> )	下颌(左)	7.4	40.6	14.6	3.2	-76.0	11.1
b4	IV	黄牛 ( <i>Bos sp.</i> )	跖骨(左)	5.7	47.7	16.7	3.3	-72.3	10.4
b41	II	黄牛 ( <i>Bos sp.</i> )	桡骨(左)	2.1	45.4	16.0	3.3	-72.1	10.4

\*? 表示没有文化分期的信息; I, II, III, IV 和 ELG 分别代表二里头文化一期至二里岗文化时期

值、湿度、温度以及微生物等因素的影响,其原有的化学成分和组织结构会发生改变,产生污染。因此,鉴别骨骼污染程度、剔除污染严重的样品是古食谱分析的前提条件<sup>[30]</sup>。目前对 H 和 O 同位素污染的判断尚无固定指标,仅能以骨胶原的保持状况加以判断<sup>[10]</sup>。

由表 2 可知,31 例样品的骨胶原提取率在 1.0%~9.7% 之间,均值为  $4.7 \pm 2.3\%$  ( $n=31$ ), 与现代样品(约含 20% 骨胶原<sup>[31]</sup>) 差距较大,表明骨胶原在埋藏过程中已发生不同程度的降解。然而,判断骨胶原是否污染的最重要指标,当属骨胶原的 C 和 N 含量以及 C/N 摩尔比值<sup>[32]</sup>。样品的 C 和 N 含量分别在 28.6%~49.2% (均值 =  $42.1 \pm 5.0\%$ ,  $n=31$ ) 和 10.1%~17.5% (均值 =  $15.1 \pm 1.7\%$ ,  $n=31$ ) 之间,

表 2 样品 C 和 N 含量、C/N 摩尔比以及骨胶原含量统计表

Table 2 Statistics of C and N contents, C/N and collagen contents of samples

	样品数量	最小值	最大值	平均值	标准偏差
骨胶原含量(%)	31	1.0	9.7	4.7	2.3
C(%)	31	28.6	49.2	42.1	5.0
N(%)	31	10.1	17.5	15.1	1.7
C/N	31	3.1	3.3	3.3	0.1

接近于现代样品(C、N 分别约为 41% 和 15%)<sup>[31]</sup>。样品的 C/N 摩尔比值在 3.1~3.3 之间(平均值 =  $3.3 \pm 0.1$ ,  $n=31$ ), 也落于未受污染样品的范围内(2.9~3.6)<sup>[32]</sup>。因此,31 例样品均可用作稳定同位素分析。

### 3.2 动物骨胶原的 H、O 稳定同位素分布

图 1 为二里头遗址动物的  $\delta D$  和  $\delta^{18}O$  值散点图。

由图 1 可以看出,在所有动物中,猪的  $\delta D$  值较高,其平均值为  $-63.6 \pm 7.1\text{‰}$  ( $n = 13$ ),大于其他动物(绵羊  $-65.4 \pm 2.9\text{‰}$ ,  $n = 6$ ; 鹿  $-69.9 \pm 4.6\text{‰}$ ,  $n = 6$ ; 黄牛  $-74.9 \pm 7.2\text{‰}$ ,  $n = 6$ ),这可能与猪为杂食动物具有较高的营养级相关。然而,若仔细观察图 1 和表 1,可以看出,除猪(a41)具有最高的  $\delta D$  值( $-47.9\text{‰}$ )外,其余猪的  $\delta D$  值(平均值为  $-64.9 \pm 5.5\text{‰}$ ,  $n = 12$ ),与其他食草动物(绵羊、鹿、黄牛)近似,表明  $\delta D$  值沿营养级富集的趋势并不明显。

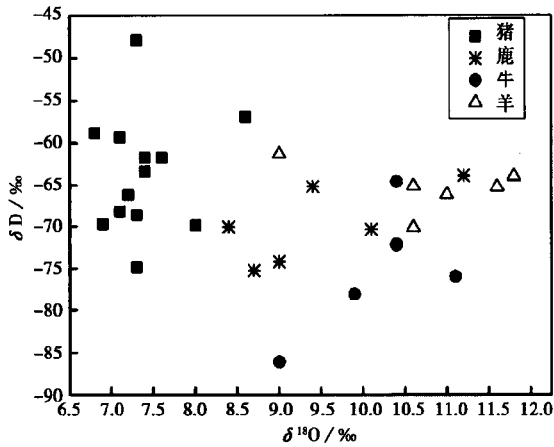


图 1 二里头遗址动物的  $\delta D$  和  $\delta^{18}O$  散点图  
Fig. 1 Scatter plot of  $\delta D$  and  $\delta^{18}O$  values of animal bone collagen from Erlitou site

与  $\delta D$  值不同,不同动物在  $\delta^{18}O$  值的分布却差异明显。猪的数据位于图 1 的最左侧,具有最低的  $\delta^{18}O$  值,介于  $6.8\text{‰} \sim 8.6\text{‰}$ ,平均值为  $7.4 \pm 0.5\text{‰}$  ( $n = 13$ )。鹿的数据分布于图 1 的中间区域, $\delta^{18}O$  值介于  $8.4\text{‰} \sim 11.2\text{‰}$ ,平均值为  $9.5 \pm 1.0\text{‰}$  ( $n = 6$ )。除个别样品外,黄牛和绵羊的数据分布于鹿数据的右侧。黄牛的  $\delta^{18}O$  值分散于  $9.0\text{‰} \sim 11.1\text{‰}$ ,平均值为  $10.2 \pm 0.7\text{‰}$  ( $n = 6$ )。绵羊具有最高的  $\delta^{18}O$  值,介于  $9.0\text{‰} \sim 11.8\text{‰}$ ,平均值为  $10.8 \pm 1.0\text{‰}$  ( $n = 6$ )。

此外,由图 1 可以看出,每种动物中都存在严重偏离同类个体平均值的异常值。猪 a41 和 a42 分别具有所有猪个体中最高的  $\delta D$  值( $-47.9\text{‰}$ )和  $\delta^{18}O$  值( $8.6\text{‰}$ ),鹿 b29 具有所有鹿中最高的  $\delta^{18}O$  值( $11.2\text{‰}$ ),黄牛 a3 具有所有黄牛中最低的  $\delta D$  值( $-86.1\text{‰}$ )和  $\delta^{18}O$  值( $9.0\text{‰}$ ),绵羊 a12 具有所有绵羊中最低的  $\delta^{18}O$  值( $9.0\text{‰}$ )。这些异常值,将在下文进行讨论。

### 3.3 先民对动物繁殖、宰杀的控制

为准确反映动物种内及种间的 H、O 同位素平

均状况及差异,在标准误差图的统计中,排除了所有可能的非代表性个体(a41, a42, b29, a3 和 a12),得到不同物种的  $\delta D$  和  $\delta^{18}O$  标准误差图,如图 2 所示。

同一地区,降雨的 O 同位素值存在季节变化、年变化<sup>[33]</sup>,这种变化会传递至植物,随食物链传递并记录在动物骨胶原组织中<sup>[11,29]</sup>。因此,在同种动物不同个体间,如果 O 同位素值的分布非常集中,偏差较小,基本可以反映这种动物的来源较为单一<sup>[16,34]</sup>,而且繁殖季节和死亡季节相似,骨胶原组织中积累了相似的季节周期的 O 同位素效应<sup>[9]</sup>。反之,则说明这种动物的生存周期相差较大,有的个体可能只经历了夏季就死亡,而有的个体可能只经历了冬季,当然也不排除来源环境不同的原因。因此,通过动物骨胶原 O 同位素值的偏差大小,可望对动物宰杀模式进行一定程度的探讨。

如图 2 所示,在 4 种家畜中,猪的  $\delta^{18}O$  平均值的标准偏差最小( $0.3\text{‰}$ ),表明先民对猪的繁殖季节和宰杀年龄控制严格。这与通过骨骼鉴定统计得到的结论“二里头猪为家畜,且死亡年龄基本都在 2 岁左右”<sup>[35]</sup> 相符合。反观其他动物  $\delta^{18}O$  平均值的标准偏差,如鹿( $0.7\text{‰}$ )、黄牛( $0.4\text{‰}$ )和绵羊( $0.6\text{‰}$ ),则相对较大,表明先民对其宰杀年龄的控制相对较为宽松。动物考古研究表明,二里头遗址的鹿,主要为野生动物<sup>[35]</sup>,故而捕猎行为获得的鹿,其年龄也就可能参差不齐。而对于黄牛和绵羊而言,先民对黄牛与绵羊的利用,除获取肉食以外,还可能用以获取其役力、羊毛、乳制品<sup>[35]</sup>。由此,先民对两类动物(食草类和杂食类)使用方式的多元化,导致了宰杀

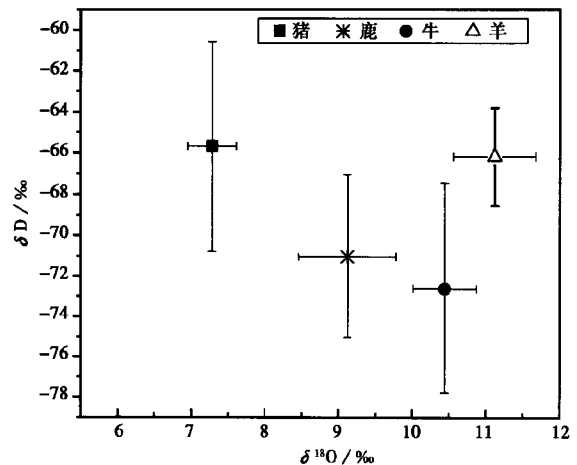


图 2 二里头遗址动物  $\delta D$  和  $\delta^{18}O$  值的标准误差图  
Fig. 2 Standard deviation plot of  $\delta D$  and  $\delta^{18}O$  values of animal bone collagen from Erlitou site

年龄的差异,表现为个体间  $\delta^{18}\text{O}$  值的偏差相对较大。

### 3.4 物种间代谢方式、饮食结构差异

研究表明,同一地区同一气候条件下,不同植物、甚至同一植物的不同部分, $\delta^{18}\text{O}$  值都存在差异。 $\text{C}_4$  植物组织中的  $\delta^{18}\text{O}$  值高于  $\text{C}_3$  植物,在干旱环境下, $\text{C}_3$  与  $\text{C}_4$  植物纤维素中  $\delta^{18}\text{O}$  值的差异,甚至能达到 10‰<sup>[36,37]</sup>。即使对于同一植物而言,纤维素的  $\delta^{18}\text{O}$  值也高于叶子的  $\delta^{18}\text{O}$  值<sup>[38]</sup>。动物身体组织的  $\delta\text{D}$  和  $\delta^{18}\text{O}$  值主要由食物、饮水的同位素特征决定,但身体代谢方式、代谢速率也会影响不同动物之间同位素值<sup>[39,40]</sup>。因此,通过不同动物之间  $\delta\text{D}$  和  $\delta^{18}\text{O}$  值的比较,可望揭示动物物种间饮食结构和代谢差异。

如图 2 所示,4 种动物的  $\delta^{18}\text{O}$  值差异较大。从左到右,猪 ( $7.3 \pm 0.3\text{‰}$ ,  $n = 11$ )、鹿 ( $9.1 \pm 0.7\text{‰}$ ,  $n = 5$ )、黄牛 ( $10.4 \pm 0.4\text{‰}$ ,  $n = 5$ ) 和绵羊 ( $11.1 \pm 0.6\text{‰}$ ,  $n = 5$ ) 的  $\delta^{18}\text{O}$  值依次增加,而尤以非反刍动物(猪)与反刍动物(鹿、黄牛和绵羊)之间的差异最为明显。众所周知,反刍动物具有多胃,胃中存在多种大量的微生物与其互利共生,其食物消化吸收模式不同于单胃动物<sup>[41]</sup>。反刍动物每天会呼出大量的甲烷和二氧化碳,都会带来体内同位素的分馏<sup>[42,43]</sup>。另外,反刍动物(鹿、黄牛和绵羊)均为草食动物,而猪为杂食性动物。因此,我们推测饮食结构差异带来同位素基底效应的不同,而迥异的代谢方式造成了同位素富集、贫化途径和程度的差异,两种因素共同导致反刍动物与非反刍动物间骨胶原  $\delta^{18}\text{O}$  值的差异。

C 和 N 稳定同位素分析表明,二里头遗址猪 ( $\delta^{13}\text{C} = -9.7 \pm 1.7\text{‰}$ ,  $\delta^{15}\text{N} = 7.5 \pm 1.4\text{‰}$ ,  $n = 27$ ) 和黄牛 ( $\delta^{13}\text{C} = -9.2 \pm 1.4\text{‰}$ ,  $\delta^{15}\text{N} = 6.7 \pm 1.0\text{‰}$ ,  $n = 16$ ) (未发表数据)的食物中,均存在大量  $\text{C}_4$  类粟作产品(包括粟类作物的秸秆、种子甚至人类的残羹冷炙)。然而,猪和黄牛的  $\delta^{18}\text{O}$  值差异却非常显著,这表明两种动物新陈代谢方式的不同,尤其是对饮用水的吸收与排泄,可能是导致两者骨胶原  $\delta^{18}\text{O}$  值差异的主要原因。猪对水的获取主要来自低  $\delta^{18}\text{O}$  值的大气降水(包括江水、河水、井水等),而对于食草类动物——黄牛而言,其水分的获取很大部分来自植物组织(高  $\delta^{18}\text{O}$  值)。由此,通过 O 同位素的分析,为深入探索动物饮食来源提供了新的研究证据。

在反刍动物之间,鹿、黄牛和绵羊有着相似的消化系统,与鹿相比,黄牛和绵羊的  $\delta^{18}\text{O}$  值偏正,说明其食物和水源的  $\delta^{18}\text{O}$  值存在差异。一方面,由于鹿的栖息环境多为森林,相对于牛羊生活的开阔地区

蒸腾作用要弱一些,这就造成森林地区植物 O 同位素相对较低;另一方面,野生鹿主要以  $\text{C}_3$  类灌木、小树的嫩枝叶为食<sup>[44]</sup>,而中国北方家养黄牛和绵羊食物中包含较多  $\text{C}_4$  类粟黍产品<sup>[45,46]</sup>,二里头遗址黄牛和绵羊的  $\delta^{13}\text{C}$  均值分别为  $-9.2 \pm 1.4\text{‰}$  ( $n = 16$ ) 和  $-15.5 \pm 1.5\text{‰}$  ( $n = 28$ ) (未发表数据),表明黄牛的食物主要为  $\text{C}_4$  植物,而绵羊的食物中也包含一定量的  $\text{C}_4$  植物。除此之外,冬季先民多以提前储备的干草、植物秸秆等喂养黄牛、绵羊,而野生的鹿则以常绿灌木和苔藓为食<sup>[44]</sup>,造成家养黄牛和绵羊比野生的鹿获取了更多的植物纤维素。如前所述, $\text{C}_4$  植物的  $\delta^{18}\text{O}$  值高于  $\text{C}_3$  植物,植物纤维素也较植物叶子更富集  $\delta^{18}\text{O}$  值,因此,生活区域不同以及食用较多  $\text{C}_4$  类植物和纤维素,当为黄牛和绵羊的  $\delta^{18}\text{O}$  值均高于鹿的主要原因<sup>[47]</sup>。此外,二里头遗址黄牛和绵羊的  $\delta^{13}\text{C}$  值,显示黄牛比绵羊摄食的  $\text{C}_4$  类植物更多,但黄牛的  $\delta^{18}\text{O}$  均值 ( $10.4 \pm 0.4\text{‰}$ ,  $n = 5$ ) 却低于绵羊 ( $11.1 \pm 0.6\text{‰}$ ,  $n = 5$ ),显然,这与两者的水源差异密切相关。与黄牛相比,绵羊更倾向于通过草料摄取水分,而黄牛则需要饮用更多的大气降水,导致黄牛具有较低的  $\delta^{18}\text{O}$  值。

### 3.5 二里头遗址动物的来源

前言所述,H 和 O 稳定同位素在研究人(动物)的迁徙和溯源方面具有重大的意义和优势。尽管本文所研究的动物样品总数量尚不够大,部分样品数量甚至未达两位数,但根据 H 和 O 稳定同位素分析原理,同样一窥二里头遗址动物的可能来源。

前文对动物的  $\delta\text{D}$  和  $\delta^{18}\text{O}$  值分析讨论时,排除了 5 例异常个体(a41, a42, b29, a3 和 a12)。除猪 a41 以外,其余 4 例个体(猪、鹿、牛和羊各一例)的  $\delta\text{D}$  值或  $\delta^{18}\text{O}$  值均显著偏离同类个体,表明这 4 例个体的生存环境与其各种群迥异,很可能来源于异地。这一推论也符合二里头遗址的王都性质,这些动物很可能来自王邑范围内多地区间的贸易交流,或者为进贡品。动物 Sr 同位素分析能确定其来源的不同<sup>[48,49]</sup>,赵春燕<sup>[49]</sup>通过动物牙齿中 Sr 同位素分析,认为二里头遗址的部分黄牛和绵羊也存在异地来源。由此可以看出,H、O 稳定同位素分析,为探索动物的生存环境及迁徙提供了另一条行之有效的研究途径。对于样品猪 a41,其  $\delta^{18}\text{O}$  值与同类个体均值相近,但  $\delta\text{D}$  值却明显高于同类个体。众所周知,猪为杂食类动物,其食物中动物蛋白的多寡,可能会

影响其营养级的判定。由于  $\delta D$  值与生物的营养级存在一定的关系,因此,仅从  $\delta D$  值上无法对样品 a41 的来源及可能的迁徙做出准确判断。

## 4 结论

二里头遗址动物骨胶原的 H、O 稳定同位素分析表明:

(1) 先民养猪主要为获取肉食资源,因此对其繁殖时间、宰杀年龄控制最为严格。而先民饲养黄牛、绵羊目的多元化,致使对其宰杀年龄的多元化。

(2) 非反刍动物(猪)与反刍动物(鹿、黄牛和绵羊)之间,饮食结构差异会带来 H、O 稳定同位素基底效应的不同,然而,不同的代谢方式也是骨胶原 O 同位素差异的主要原因之一。

(3) 同为反刍动物的黄牛、绵羊和鹿,前两者  $\delta^{18}O$  值均高于鹿的主要原因为其栖息环境相对更为开阔,且饮食中包含较多  $C_4$  作物和植物纤维素。黄牛和绵羊  $\delta^{18}O$  值差异的原因,可能为其获取水分的主要途径不同。

(4) 二里头遗址的猪、鹿、牛、羊均存在外来个体的可能。

最后,需要着重指出的是,相对于 C、N 稳定同位素而言,H、O 稳定同位素的影响因素更为复杂,自食物和饮用水至动物骨胶原的过程中,H、O 同位素的分馏机理,尚不是很明朗,这很可能会影响对 H、O 稳定同位素的深入解读。此外,在探讨二里头遗址动物可能来源时,未考虑不同文化期出现的环境变迁对动物 H、O 同位素值可能产生的影响,也会进一步妨碍对动物来源的判断。显然,欲全面、深入开展骨胶原的 H、O 稳定同位素分析,仍需要进行大量的基础研究和应用研究。

## 参考文献 (References)

- Hu Yaowu, Shang Hong, Tong Haowen *et al.* Stable isotope dietary analysis of the Tianyuan 1 early modern human. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2009, **106**(27): 10971~10974
- Webb E, White C, Longstaffe F. Dietary shifting in the Nasca region as inferred from the carbon and nitrogen isotope compositions of archaeological hair and bone. *Journal of Archaeological Science*, 2013, **40**(1): 129~139
- Fernández-López de Pablo J, Salazar-García D C, Subirà-Galdacano M E *et al.* Late Mesolithic burials at Casa Corona (Villena, Spain): Direct radiocarbon and palaeodietary evidence of the last Forager populations in Eastern Iberia. *Journal of Archaeological Science*, 2013, **40**(1): 671~680
- Liu Xinyi, Jones M K, Zhao Zhijun *et al.* The earliest evidence of millet as a staple crop: New light on Neolithic foodways in North China. *American Journal of Physical Anthropology*, 2012, **149**(2): 283~290
- 胡耀武,何德亮,董 豫等. 山东滕州西公桥遗址人骨的稳定同位素分析. 第四纪研究, 2005, **25**(5): 561~567  
Hu Yaowu, He Deliang, Dong Yu *et al.* Stable isotopic analysis on human bones from the Xigongqiao site, Tengzhou, Shandong. *Quaternary Sciences*, 2005, **25**(5): 561~567
- 崔亚平,胡耀武,陈洪海等. 宗日遗址人骨的稳定同位素分析. 第四纪研究, 2006, **26**(4): 604~611  
Cui Yaping, Hu Yaowu, Chen Honghai *et al.* Stable isotopic analysis on human bones from Zongri site. *Quaternary Sciences*, 2006, **26**(4): 604~611
- 管 理,胡耀武,胡松梅等. 陕北靖边五庄果梁动物骨的 C 和 N 稳定同位素分析. 第四纪研究, 2008, **28**(6): 1160~1165  
Guan Li, Hu Yaowu, Hu Songmei *et al.* Stable isotopic analysis on animal bones from the Wuzhuang Guoliang site, Jingbian, Northwest Shaanxi. *Quaternary Sciences*, 2008, **28**(6): 1160~1165
- 凌 雪,陈 靓,薛新明等. 山西芮城清凉寺墓地出土人骨的稳定同位素分析. 第四纪研究, 2010, **30**(2): 415~421  
Ling Xue, Cheng Liang, Xue Xinming *et al.* Stable isotopic analysis of human bones from the Qiangliang Temple Graveyard, Ruicheng County, Shanxi Province. *Quaternary Sciences*, 2010, **30**(2): 415~421
- Kirsanow K, Makarewicz C, Tuross N. Stable oxygen ( $\delta^{18}O$ ) and hydrogen ( $\delta D$ ) isotopes in ovicaprid dentinal collagen record seasonal variation. *Journal of Archaeological Science*, 2008, **35**(12): 3159~3167
- Leyden J J, Wassenaar L I, Hobson K A *et al.* Stable hydrogen isotopes of bison bone collagen as a proxy for Holocene climate on the Northern Great Plains. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2006, **239**(1~2): 87~99
- Reynard L M, Hedges R E M. Stable hydrogen isotopes of bone collagen in palaeodietary and palaeoenvironmental reconstruction. *Journal of Archaeological Science*, 2008, **35**(7): 1934~1942
- 赵墨田. 稳定同位素分析法. 北京: 科学出版社, 1985. 3~12  
Zhao Motian. *Stable Isotope Ratio Analysis*. Beijing: Science Press, 1985. 3~12
- 王永森,陈建生,汪集旻等. 降水过程中氢氧稳定同位素理论关系研究. 水科学进展, 2009, **20**(2): 204~208  
Wang Yongsan, Chen Jiansheng, Wang Jiyang *et al.* Theoretical research on the relationship between deuterium and oxygen 18 in precipitation. *Advances in Water Science*, 2009, **20**(2): 204~208
- Sjögren K G, Price T D. A complex Neolithic economy: Isotope evidence for the circulation of cattle and sheep in the TRB of Western Sweden. *Journal of Archaeological Science*, 2013, **40**(1): 690~704
- Ehleringer J R, Bowen G J, Chesson L A *et al.* Hydrogen and oxygen isotope ratios in human hair are related to geography. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2008, **105**(8): 2788~2793
- Bowen G J. Isoscapes: Spatial pattern in isotopic biogeochemistry. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 2010, **38**(1): 161~187
- Schimmelmann A. Determination of the concentration and stable isotopic composition of nonexchangeable hydrogen in organic matter. *Analytical Chemistry*, 1991, **63**(21): 2456~2459
- Birchall J, O'Connell T C, Heaton T H *et al.* Hydrogen isotope ratios in animal body protein reflect trophic level. *Journal of Animal Ecology*, 2005, **74**(5): 877~881

- 19 Daniel Bryant J, Froelich P N. A model of oxygen isotope fractionation in body water of large mammals. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1995, **59**(21):4523~4537
- 20 White C D, Spence M W, Longstaffe F J *et al.* Geographic identities of the sacrificial victims from the Feathered Serpent Pyramid, Teotihuacan: Implications for the nature of state power. *Latin American Antiquity*, 2002, **13**(2):217~236
- 21 Hobson K A, Wassenaar L I. Linking breeding and wintering grounds of neotropical migrant songbirds using stable hydrogen isotopic analysis of feathers. *Oecologia*, 1996, **109**(1):142~148
- 22 杜金鹏. 中国早期青铜文化——二里头文化专题研究. 北京: 科学出版社, 2008. 124~125
- Du Jinpeng. Early Chinese Bronze Culture—Special Studies on Erlitou Culture. Beijing: Science Press, 2008. 124~125
- 23 许宏, 刘莉. 关于二里头遗址的省思. 文物, 2008, (1):43~52
- Xu Hong, Liu Li. Reflection of Erlitou site. *Cultural Relics*, 2008, (1):43~52
- 24 夏商周断代工程专家组. 夏商周断代工程 1996~2000 年阶段成果报告(简本). 北京: 世界图书出版公司北京公司, 2000. 76~77
- The Xia-Shang-Zhou Chronology Project Expert Panel. The 1996~2000 Phase Achievement Report on the Research about the Division of History into the Xia, Shang and Zhou Dynasty (brief copy). Beijing: World Publishing Corporation, 2000. 76~77
- 25 许宏. 最早的中国. 北京: 科学出版社, 2009. 8~200
- Xu Hong. Earliest China. Beijing: Science Press, 2009. 8~200
- 26 Jay M, Richards M P. Diet in the iron age cemetery population at Wetwang Slack, East Yorkshire, UK: Carbon and nitrogen stable isotope evidence. *Journal of Archaeological Science*, 2006, **33**(5):653~662
- 27 Cormie A B, Schwarcz H P, Gray J. Determination of the hydrogen isotopic composition of bone collagen and correction for hydrogen exchange. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1994, **58**(1):365~375
- 28 李小飞, 张明军, 马潜等. 我国东北地区大气降水稳定同位素特征及其水汽来源. 环境科学, 2012, **33**(9):2924~2931
- Li Xiaofei, Zhang Mingjun, Ma Qian *et al.* Characteristics of stable isotopes in precipitation over Northeast China and its water vapor sources. *Environmental Science*, 2012, **33**(9):2924~2931
- 29 Cormie A B, Schwarcz H P, Gray J. Relation between hydrogen isotopic ratios of bone collagen and rain. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1994, **58**(1):377~391
- 30 Hedges R E M. Bone diagenesis: An overview of processes. *Archaeometry*, 2002, **44**(3):319~328
- 31 Ambrose S H. Preparation and characterization of bone and tooth collagen for isotopic analysis. *Journal of Archaeological Science*, 1990, **17**(4):431~451
- 32 Deniro M J. Post-mortem preservation and alteration of in vivo bone collagen isotope ratios in relation to palaeodietary reconstruction. *Nature*, 1985, **317**:806~809
- 33 刘进达, 赵迎昌. 中国大气降水稳定同位素时-空分布规律探讨. 勘察科学技术, 1997, (3):34~39
- Liu Jinda, Zhao Yingchang. Discussion on the stable isotope time-space distribution law of China atmospheric precipitation. *Site Investigation Science and Technology*, 1997, (3):34~39
- 34 Hobson K A, Wassenaar L I, Taylor O R. Stable isotopes ( $\delta D$  and  $\delta^{13}C$ ) are geographic indicators of natal origins of monarch butterflies in eastern North America. *Oecologia*, 1999, **120**(3):397~404
- 35 杨杰. 河南偃师二里头遗址的动物考古学研究. 北京: 中国社会科学院研究生院博士学位论文, 2006. 23~36
- Yang Jie. Zooarchaeological Study on Erlitou Site at Yanshi in Henan. Beijing: The Ph.D Thesis of Graduate School of Chinese Academy of Social Sciences, 2006. 23~36
- 36 Sternberg L O, Deniro M J, Johnson H B. Isotope ratios of cellulose from plants having different photosynthetic pathways. *Plant Physiology*, 1984, **74**(3):557~561
- 37 Sternberg L S L. Oxygen and hydrogen isotope ratios in plant cellulose: Mechanisms and applications. In: Rundel P W, Ehleringer J R, Nagy K A eds. Stable Isotopes in Ecological Research. New York: Springer-Verlag, 1989. 124~141
- 38 Sternberg L, Deniro M J. Isotopic composition of cellulose from  $C_3$ ,  $C_4$ , and CAM plants growing near one another. *Science*, 1983, **220**:947~949
- 39 Podlesak D W, Torregrossa A, Ehleringer J R *et al.* Turnover of oxygen and hydrogen isotopes in the body water,  $CO_2$ , hair, and enamel of a small mammal. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2008, **72**(1):19~35
- 40 Luz B, Cormie A B, Schwarcz H P. Oxygen isotope variations in phosphate of deer bones. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1990, **54**(6):1723~1728
- 41 冯仰廉. 反刍动物营养学. 北京: 科学出版社, 2004. 31~82
- Feng Yanglian. Ruminant Nutriology. Beijing: Science Press, 2004. 31~82
- 42 Schulze E, Lohmeyer S, Giese W. Determination of  $^{13}C/^{12}C$ -ratios in rumen produced methane and  $CO_2$  of cows, sheep and camels. *Isotopes in Environmental and Health Studies*, 1998, **34**(1~2):75~79
- 43 Burke R A. Possible influence of hydrogen concentration on microbial methane stable hydrogen isotopic composition. *Chemosphere*, 1993, **26**(1~4):55~67
- 44 寿振黄. 中国经济动物志·兽类. 北京: 科学出版社, 1962. 439~481
- Shou Zhenhuang. Chinese Economic Zoography·Beasts. Beijing: Science Press, 1962. 439~481
- 45 陈相龙, 袁靖, 胡耀武等. 陶寺遗址家畜饲养策略初探: 来自碳、氮稳定同位素的证据. 考古, 2012, (9):75~82
- Chen Xianglong, Yuan Jing, Hu Yaowu *et al.* A preliminary exploration to the domestic animal raising strategy: The evidences from carbon and nitrogen isotope analyses. *Archaeology*, 2012, (9):75~82
- 46 Hou Liangliang, Hu Yaowu, Zhao Xinpeng *et al.* Human subsistence strategy at Liuzhuang site, Henan, China during the proto-Shang culture (~2000~1600 BC) by stable isotopic analysis. *Journal of Archaeological Science*, 2013, **40**(5):2344~2351
- 47 Bocherens H, Koch P L, Mariotti A *et al.* Isotopic biogeochemistry ( $^{13}C$ ,  $^{18}O$ ) of mammalian enamel from African Pleistocene hominid sites. *Palaeos*, 1996, **11**(4):306~318
- 48 赵春燕, 袁靖, 何努. 山西省襄汾县陶寺遗址出土动物牙釉质的锶同位素比值分析. 第四纪研究, 2011, **31**(1):22~28
- Zhao Chunyan, Yuan Jing, He Nu. Strontium isotope analysis of archaeological fauna from the Taosi site, Xiangfen County, Shanxi Province. *Quaternary Sciences*, 2011, **31**(1):22~28
- 49 赵春燕, 李志鹏, 袁靖等. 二里头遗址出土动物来源初探——根据牙釉质的锶同位素比值分析. 考古, 2011, (7):68~75
- Zhao Chunyan, Li Zhipeng, Yuan Jing *et al.* Preliminary explorations on the resources of the cattle, sheep and goat in Erlitou site—Based on the strontium isotope analyses to their tooth enamels. *Archaeology*, 2011, (7):68~75

## HYDROGEN AND OXYGEN STABLE ISOTOPIC ANALYSIS OF ANIMAL BONE COLLAGEN FROM ERLITOU SITE, YANSHI, HENAN PROVINCE

Si Yi<sup>①②③</sup> Li Zhipeng<sup>④</sup> Hu Yaowu<sup>①②</sup> Yuan Jing<sup>④</sup> Wang Changsui<sup>①②</sup>

(<sup>①</sup>Key Laboratory of Vertebrate Evolution and Human Origins of Chinese Academy of Sciences, Institute of Vertebrate Paleontology and Paleoanthropology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100044; <sup>②</sup>Department of Scientific History and Archaeometry, School of the Humanities, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049; <sup>③</sup>School of History and Culture, Henan University, Kaifeng 475001; <sup>④</sup>Institute of Archaeology, Chinese Academy of Social Sciences, Beijing 100710)

### Abstract

Currently, hydrogen and oxygen stable isotopic analysis of bone collagen of humans or animals from archaeological sites has been increasingly used in palaeodietary reconstruction in international bioarchaeological fields. Basically, the hydrogen and oxygen in bone collagen are from the foods and drinking water consumed by humans or animals, which is derived from the living ecosystem directly. Therefore, differentiation of hydrogen and oxygen isotope values can provide valuable information on the diets, drinking water, palaeoclimate and palaeoenvironment as well as potential organism movement. Although this technique is blooming, there has been no any similar study reported in China.

Erlitou site, believed to be an exceptionally large urban center of Erlitou culture, is located in Erlitou Village of Zhaizhen Town, Henan Province, China, dating to 1880 ~ 1521 BC according to the chronological studies from the Xia-Shang-Zhou chronology project. According to the marvelous archaeological features, this site is generally regarded as the capital of Xia Dynasty. To understand animal feeding strategies and possible migrations, bone samples of 31 animals from the Erlitou site were chosen for hydrogen and oxygen stable isotope analysis of bulk bone collagen. Samples were comprised of 6 cattle (*Bos* sp.), 6 sheep (*Ovis* sp.), 13 pigs (*Sus scrofa domestica*), and 6 deer (*Cervus nippon*).

There is no exact criteria to reveal the bone diagenesis of hydrogen and oxygen specifically. Therefore, the integrity of bone collagen is used as the only standard to reveal the possible contamination. The indexes, such as the collagen yields, carbon and nitrogen contents and atomic C/N ratios of bone collagen from all samples, are all located with the well-preserved range, indicating that the collagen extracted can be used for isotopic analysis.

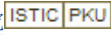
Hydrogen isotope analysis suggests that the pigs as omnivore had higher mean  $\delta D$  value ( $-63.6 \pm 7.1\text{‰}$ ,  $n=13$ ) than other animals (deer, cattle and sheep) as herbivore, which relates to the isotopic enrichment along the trophic level. However, this trend is not significant if one outlier of pig is omitted. The standard deviation of  $\delta^{18}O$  values of pigs is the lowest (0.3‰) among the four kinds of animals, which possibly relate with the strict control on breeding time and slaughter age for pigs by humans. Compared with the wild animal (deer with the mean value of  $9.1 \pm 0.7\text{‰}$ ,  $n=5$ ), higher mean  $\delta^{18}O$  values for domestic cattle ( $10.4 \pm 0.4\text{‰}$ ,  $n=5$ ) and sheep ( $11.1 \pm 0.6\text{‰}$ ,  $n=5$ ) are observed, due to more open habitat and the consumption of more  $C_4$  plants (millets by-products) and plant fiber fed by humans. Furthermore, the mean  $\delta^{18}O$  value of sheep is higher than that of cattle, due to the fact that sheep relied more on plant stems or leaves to gain the drinking water. It is interesting to note that ruminant animals (deer, cattle, and sheep) had higher  $\delta^{18}O$  values than non-ruminant animals (pigs), which can be interpreted as the differences of metabolism and resources of food and drinking water. At last, some individuals with unusual  $\delta D$  or  $\delta^{18}O$  values within each animal species might be caused by the tribute or cultural exchange from other places to the Erlitou site.

**Key words** H and O stable isotopes, Erlitou site, management strategy, metabolic type, palaeodiet



作者: 司艺, 李志鹏, 胡耀武, 袁靖, 王昌燧, Si Yi, Li Zhipeng, Hu Yaowu, Yuan Jing, Wang Changsui

作者单位: 司艺, Si Yi(中国科学院古脊椎动物与古人类研究所, 中国科学院脊椎动物演化与人类起源重点实验室, 北京100044; 中国科学院大学人文学院科技史与科技考古系, 北京100049; 河南大学历史文化学院, 开封475001), 李志鹏, 袁靖, Li Zhipeng, Yuan Jing(中国社会科学院考古研究所, 北京, 100710), 胡耀武, 王昌燧, Hu Yaowu, Wang Changsui(中国科学院古脊椎动物与古人类研究所, 中国科学院脊椎动物演化与人类起源重点实验室, 北京100044; 中国科学院大学人文学院科技史与科技考古系, 北京100049)

刊名: 第四纪研究 

英文刊名: Quaternary Sciences

年, 卷(期): 2014, 34(1)

## 参考文献(49条)

1. Hu Yaowu;Shang Hong;Tong Haowen [Stable isotope dietary analysis of the Tianyuan 1 early modern human](#) 2009(27)
2. Webb E;Whitc C;Longstaffe F [Dietary shifting in the Nasca region as inferred from the carbon and nitrogen isotope compositions of archaeological hair and bone](#) 2013(01)
3. Fernández-López de Pablo J;Salazar-García D C;Subirà-Galdacano M E [Late Mesolithic burials at Casa Corona\(Villena, Spain\):Direct radiocarbon and palaeodietary evidence of the last Forager populations in Eastern Iberia](#) 2013(01)
4. Liu Xinyi;Jones M K;Zhao Zhijun [The earliest evidence of millet as a staple crop:New light on Neolithic foodways in North China](#) 2012(02)
5. 胡耀武;何德亮;董豫 [山东滕州西公桥遗址人骨的稳定同位素分析\[期刊论文\]-《H》第四纪研究](#) 2005(05)
6. 崔亚平;胡耀武;陈洪海 [宗日遗址人骨的稳定同位素分析\[期刊论文\]-《H》第四纪研究](#) 2006(04)
7. 管理;胡耀武;胡松梅 [陕北靖边五庄果梁动物骨的C和N稳定同位素分析\[期刊论文\]-《H》第四纪研究](#) 2008(06)
8. 凌雪;陈靓;薛新明 [山西芮城清凉寺墓地出土人骨的稳定同位素分析\[期刊论文\]-《H》第四纪研究](#) 2010(02)
9. Kirsanow K;Makarewicz C;Tuross N [Stable oxygen \( \$\delta^{18}O\$ \) and hydrogen \( \$\delta D\$ \) isotopes in ovicaprid dentinal collagen record seasonal variation](#) 2008(12)
10. Leyden J J;Wassenaar L I;Hobson K A [Stable hydrogen isotopes of bison bone collagen as a proxy for Holocene climate on the Northern Great Plains](#) 2006(1 - 2)
11. Reynard L M;Hedges R E M [Stable hydrogen isotopes of bone collagen in palaeodietary and palaeoenvironmental reconstruction](#) 2008(07)
12. 赵墨田 [稳定同位素分析法](#) 1985
13. 王永森;陈建生;汪集昉 [降水过程中氢氧稳定同位素理论关系研究\[期刊论文\]-《H》水科学进展](#) 2009(02)
14. Sj(ö)gren K G;Price T D [A complex Neolithic economy:Isotope evidence for the circulation of cattle and sheep in the TRB of Western Sweden](#) 2013(01)
15. Ehleringer J R;Bowen G J;Chesson L A [Hydrogen and oxygen isotope ratios in human hair are related to geography \[外文期刊\]](#) 2008(08)
16. Bowen G J [Isoscapes:Spatial pattern in isotopic biogeochemistry](#) 2010(01)
17. Schimmelmann A [Determination of the concentration and stable isotopic composition of nonexchangeable hydrogen in organic matter](#) 1991(21)
18. Birchall J;O'Connell T C;Heaton T H [Hydrogen isotope ratios in animal body protein reflect trophic level](#) 2005(05)
19. Daniel Bryant J;Froelich P N [A modal of oxygen isotope fractionation in body water of large mammals](#) 1995(21)
20. White C D;Spence M W;Longstaffe F J [Geographic identities of the sacrificial victims from the Feathered Serpent Pyramid,Teotihuacan:Implications for the nature of state power](#) 2002(02)
21. Hobson K A;Wassenaar L I [Linking breeding and wintering grounds of neotropical migrant songbirds using stable hydrogen isotopic analysis of feathers](#) 1996(01)

22. [杜金鹏 中国早期青铜文化——二里头文化专题研究](#) 2008
23. [许宏;刘莉 关于二里头遗址的省思\[期刊论文\]-《H》文物](#) 2008(01)
24. [夏商周断代工程专家组 夏商周断代工程1996~2000年阶段成果报告\(简本\)](#) 2000
25. [许宏 最早的中国](#) 2009
26. [Jay M;Richards M P Diet in the iron age cemetery population at Wetwang Slack, East Yorkshire, UK:Carbon and nitrogen stable isotope evidence](#) 2006(05)
27. [Cormie A B;Schwarcz H P;Gray J Determination of the hydrogen isotopic composition of bone collagen and correction for hydrogen exchange](#) 1994(01)
28. [李小飞;张明军;马潜 我国东北地区大气降水稳定同位素特征及其水汽来源\[期刊论文\]-《H》环境科学](#) 2012(09)
29. [Cormie A B;Schwarcz H P;Gray J Relation between hydrogen isotopic ratios of bone collagen and rain](#) 1994(01)
30. [Hedges R E M Bone diagenesis:An overview of processes](#) 2002(03)
31. [Ambrose S H Preparation and characterization of bone and tooth collagen for isotopic analysis](#) 1990(04)
32. [Deniro M J Post-mortem preservation and alteration of in vivo bone collagen isotope ratios in relation to palaeodietary reconstruction](#) 1985
33. [刘进达;赵迎昌 中国大气降水稳定同位素时-空分布规律探讨](#) 1997(03)
34. [Hobson K A;Wassenaar L I;Taylor O R Stable isotopes\( \$\delta D\$  and  \$\delta^{13}C\$ \)are geographic indicators of natal origins of monarch butterflies in eastern North America](#) 1999(03)
35. [杨杰 河南偃师二里头遗址的动物考古学研究](#) 2006
36. [Stenberg L O;Deniro M J;Johnson H B Isotope ratios of cellulose from plants having different photosynthetic pathways](#) 1984(03)
37. [Sternberg L S L Oxygen and hydrogen isotope ratios in plant cellulose:Mechanisms and applications](#) 1989
38. [Sternberg L;Deniro M J Isotopic composition of cellulose from C3, C4, and CAM plants growing near one another](#) 1983
39. [Podlesak D W;Torregrossa A;Ehleringer J R Turnover of oxygen and hydrogen isotopes in the body water, CO<sub>2</sub>, hair, and enamel of a small mammal](#) 2008(01)
40. [Luz B;Cormie A B;Schwarcz H P Oxygen isotope variations in phosphate of deer bones](#) 1990(06)
41. [冯仰廉 反刍动物营养学](#) 2004
42. [Schulze E;Lohmeyer S;Giese W Determination of  \$^{13}C/^{12}C\$ -ratios in rumen produced methane and CO<sub>2</sub> of cows, sheep and camels](#) 1998(1-2)
43. [Burke R A Possible influence of hydrogen concentration on microbial methane stable hydrogen isotopic composition](#) 1993(1-4)
44. [寿振黄 中国经济动物志·兽类](#) 1962
45. [陈相龙;袁靖;胡耀武 陶寺遗址家畜饲养策略初探:来自碳、氮稳定同位素的证据](#) 2012(09)
46. [Hou Liangliang;Hu Yaowu;Zhao Xiping Human subsistence strategy at Liuzhuang site, Henan, China during the proto-Shang culture \(~2000 ~ 1600 BC\) by stable isotopic analysis](#) 2013(05)
47. [Bocherens H;Koch P L;Mariotti A Isotopic biogeochemistry \( \$^{13}C\$ ,  \$^{18}O\$ \) of mammalian enamel from African Pleistocene hominid sites](#) 1996(04)
48. [赵春燕;袁靖;何努 山西省襄汾县陶寺遗址出土动物牙釉质的锶同位素比值分析\[期刊论文\]-《H》第四纪研究](#) 2011(01)
49. [赵春燕;李志鹏;袁靖 二里头遗址出土动物来源初探—根据牙釉质的锶同位素比值分析](#) 2011(07)