

锶同位素分析技术追踪古人类迁移活动的研究

赵春燕

(关键词) 锶同位素 古代 人类迁移 考古学

(内容提要) 利用锶同位素分析技术追溯古代人类迁移活动已经成为当今国际考古学界必用的方法。考古学本身就是通过研究特定时空范围内人类活动进而探索社会发展规律的一门学科,有关人类的行为方式自然成为研究的焦点问题之一。用传统的考古类型学研究方法推测可能存在的人群迁徙行为只是一种间接证据,而采用锶同位素分析技术可以获得古代人类在不同地质背景区域间迁徙的直接证据。以陶寺遗址、二里头遗址和喇家遗址为例,说明该方法的原理及其在考古学研究中的应用,对中国社会科学院考古研究所近年来利用锶同位素分析技术追踪古人类迁移活动的研究进行了阶段性总结和思考。

(中图分类号) K854 (文献标识码) A (文章编号) 1001-0483(2019)03-0043-07

DOI:10.16422/j.cnki.1001-0483.2019.03.007

从 20 世纪 80 年代中期开始,锶同位素分析技术已经用于追踪古代人和动物的迁移行为,至今已然成为国际考古学界探索古代人类迁移活动的主要方法^①。这一方法的原理比较简单,因为锶在自然界有四种天然稳定的同位素,分别是⁸⁸Sr,⁸⁷Sr,⁸⁶Sr 和⁸⁴Sr。其中⁸⁷Sr 是放射性同位素⁸⁷Rb 的衰变产物,所以,在不同类型的岩石和矿物中因母岩的铷锶含量比差异及成岩或成矿的年代不同,造成其中的锶同位素组成也是不同的^②。通常情况下,以⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 比值作为表征特定地质区域锶同位素组成的指标。当不同锶同位素组成的岩石在风化作用下形成土壤,锶也随之进入土壤和地表的沉积物中,进而渗入地下水中,如此构成具有不同锶同位素组成特征的地质区域。植物从土壤和地下水中吸收锶,人或动物吃植物的同时也将锶吸收在体内^③。因此,生活在不同锶同位素组成地质背景环境中的人,其体内锶同位素组成就有可能存在不同或差异。这种不同或差异就成为追溯人类生存地的依据^④。

考古学本身就是通过研究特定时空范围内的人类活动进而探索社会发展规律的一门学科,

关于人的行为方式自然成为焦点之一。人类的迁移不仅意味着社会的发展和变化,同时也可能隐含着自然环境的变迁,所以,人类的迁移不仅受考古学者的关注,同时,也是环境学者及社会学者关注的焦点;用传统的考古类型学研究方法来推测可能存在的人群的迁徙只是间接证据^⑤,而锶同位素分析方法可以获得古代人群迁移的直接证据。所以,锶同位素分析方法从一开始出现就受到众多考古学家的重视,在世界各地古代人类迁移研究中取得的成功案例不胜枚举^⑥。仅以国际考古学期刊《Journal of Archaeological Science》所发表的论文统计,从 1990 年至 2016 年期间,已发表的相关论文达到 200 余篇,特别是 2010 年至 2016 年,发表的论文数量迅猛增加,达到 115 篇;研究区域也从开始的欧洲、美洲,扩展到非洲和亚洲地区;锶同位素分析方法已经被考古学者普遍接受,由此可见一斑。中国社会科学院考古研究所国家自然科学基金和院知识创新工程的资助下,也利用锶同位素分析方法对中国古代不同地区不同时代的人类迁移活动进行了研究,本文主要对近期工作成果进行简要回顾与总结。

(作者简介) 赵春燕,女,1963 年生,中国社会科学院考古研究所研究员,邮编 100710。

一、应用锶同位素分析方法的三个前提

任何科学研究的方法在具体应用过程中,都是有其适用的前提和条件的。即使是著名的物理学中的牛顿三大定律也不例外。应用锶同位素分析方法追溯人类来源地同样需要满足以下前提:首先,不同地区有各自的锶同位素比值特征;其次,人体内的锶同位素组成是其饮食的锶同位素组成的反映;最后,埋藏环境中的锶元素没有污染人类遗骸或污染可以被去除^⑦。

因为自然界中的锶同位素之间的相对质量差别很小,而且质量数又比较大,在进入植物—动物—人等构成的食物链后,一般不会发生显著分馏^⑧,所以,这一前提成立。用人类骨骼或牙釉质中 Ca/P 比值判断骨骼或牙釉质是否受到环境污染是最基本的验证第三前提成立的一种方法。因为正常人体骨骼的 Ca/P 比值为 2.15,一般而言,所分析的骨骼样品的 Ca/P 比值越接近 2.15,表明人体骨骼受到的污染越轻^⑨。另外,根据我们的前期实验结果并参考国外学者的研究,人类牙釉质相对于骨骼在埋藏过程中受到污染的程度非常低,因而首选牙釉质作为研究的标本以提高样品检测的成功率^⑩。此外,在进行样品的预处理过程中,也要时刻注意有可能存在的环境污染问题。为此,中国社会科学院考古研究所建立了国内第一家专门用于出土样品检测的超净实验室,保证了样品预处理及检测过程中严格的洁净度要求,排除了来自样品预处理及检测过程中外部环境污染的可能性。

通过以上的论述可以看出,在一个具体的考古遗址应用锶同位素分析方法进行研究,上述三个前提中的第二和第三个前提不难满足,因此,第一个前提是应用锶同位素分析方法成败与否的关键所在。

要在考古学研究中应用锶同位素分析方法,首先要解决的问题是如何确定某一地区的

锶同位素比值特征。研究表明,虽然在一个特定地区植物的锶同位素比值的区间小于土壤;但动物吃了当地植物后,经过消化吸收使体内锶同位素组成进一步平均化,特别是一些小型哺乳动物体内的锶同位素比值的区间最小^⑪,我们对陶寺遗址周围土壤、植物及动物的锶同位素比值的测定结果也证实了上述研究结论,因此,可以用当地哺乳动物遗骸的锶同位素比值的平均值加或减二倍的标准偏差作为区分当地和外来人口的生物可利用锶同位素比值的置信区间,由此建立一个评估古代人口迁移情况的相对客观的标准^⑫。

中国历史悠久,国土辽阔,不同时代不同遗址所处各地区地质背景情况复杂。在国外取得成功的锶同位素分析方法是否适合中国考古必须进行实验验证,所以首先选择了山西陶寺遗址和河南二里头遗址进行考察。从地质背景上看,陶寺遗址与二里头遗址均属于我国的黄土高原地带^⑬。从地理位置上来讲,陶寺遗址位于山西省襄汾县以东临汾盆地中南部塔儿山西北麓的黄土台塬上,属于黄土高原东南缘(图一)^⑭,二里头遗址坐落在黄土高原东南边缘的伊河和洛河冲积平原,地处高原第二阶梯向第三阶的过渡地带^⑮。陶寺遗址距二里头遗址的直线距离大约为 177 公里^⑯。根据考古学区系类型理论,陶寺遗址和二里头遗址均属于中原地区^⑰。这个选择包含两个问题:其一是



图一 中国的黄土高原示意图(图片来源:中国数字科技馆)

同处于黄土高原的陶寺遗址和二里头遗址是否存在可区分的锶同位素比值特征,也就是说,陶寺遗址和二里头遗址的地区生物可利用锶同位素比值范围是不是相同;其二是用何种动物建立这两个遗址的生物可利用锶同位素比值范围。

根据动物考古学研究结果,陶寺遗址和二里头遗址所在的中原地区早在距今约8500年的贾湖遗址出土的猪就已是人为饲养的家猪,表明猪在中原地区是最早进行饲养的家畜之一^⑮。无论在陶寺遗址,还是在二里头遗址,依据猪牙齿的测量数据和死亡年龄及猪遗骸出土时的考古学背景推定这些遗址出土的猪均为家猪^⑯。另有陶寺遗址和二里头遗址出土人及猪骨骼的碳氮稳定同位素分析数据也表明,人和猪的主食结构基本相同,均以C4类植物为主,推测猪人工饲养的可能性比较大^⑰;再根据两个遗址出土猪的数量是全部出土动物中比例最高的,而猪牙釉质的锶同位素比值的标准偏差在所有被检测的动物中是最小的,可以推断猪是当地动物的可能性也是最大的^⑱。基于以上理由,选择猪作为当地动物来确定每个遗址当地的生物可利用锶同位素比值范围。

为了实验结果具有可比性,第一批样品在采集时每个遗址分别随机选取5份猪牙釉质样品作为检测对象。其后又根据各个遗址出土动物遗骸的具体情况,增加猪牙釉质样品的数量到30个以上。根据陶寺遗址和二里头遗址出土猪牙釉质的锶同位素比值测定结果,经过计算得到遗址当地的锶同位素比值范围如下:

遗址名称	年代	锶同位素比值范围
陶寺	公元前2500—前1900年	0.711044 ~ 0.711314
二里头	公元前1800—前1500年	0.711900 ~ 0.712256

从表格数据可知,陶寺遗址、二里头遗址的地区生物可利用锶同位素比值范围是不同的,也就是说,据初步研究结果,上文第一前提“每个地区有特征的锶同位素比值”是成立的,这为接下来的进一步研究奠定了基础。

二、应用锶同位素分析方法的三个实例

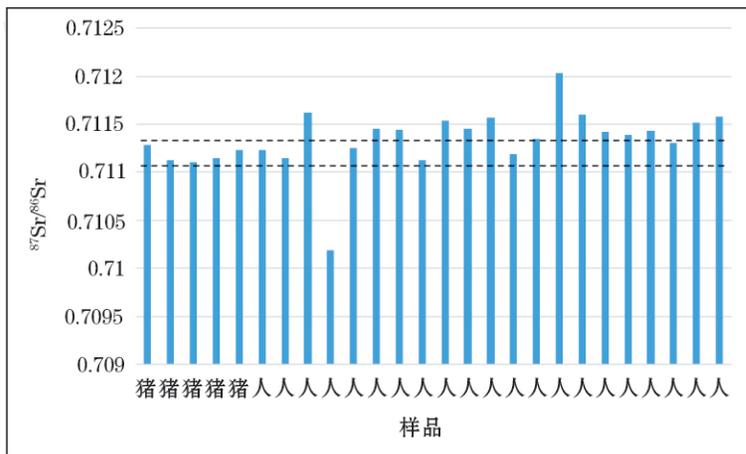
1. 陶寺遗址古人类的迁移情况

陶寺遗址位于山西省襄汾县陶寺镇,遗址

年代大约距今4300—3900年。经过数次规模较大的科学发掘,发现了规模很大的城址、与之相匹配的王墓、世界最早的观象台、气势恢宏的宫殿、独立的手工业区等。遗址范围东西约2000、南北约1500米,面积约280万平方米,是当时中原地区显现文明化程度较高的史前聚落遗址之一。在陶寺遗址几百座墓葬里反映出来极度奢华的少数大墓、豪华中型墓与绝大多数几乎一无所有的小墓之间存在着一种典型的金字塔形的社会结构。出土于贵族大墓的一系列具有外来文化风格的礼器类器物与其上的纹饰引起众多学者的关注。有学者依据陶寺中晚期发生贵族墓葬和宫殿被毁坏及多人被砍头弃尸的社会暴力现象推测早中期的统治者可能是外来的族群^⑳。陶寺遗址古代人群的来源地就成为学界研究的热点问题之一,而目前解决这个问题当首推锶同位素比值分析。

基于以上考虑,选择陶寺遗址出土的21份古人类标本,采用热电离质谱技术对其进行了锶同位素比值分析。根据考古学研究结果,本次所分析的21份古人类标本全部来自陶寺文化中晚期的墓葬和灰坑中。为方便比较和判断,将陶寺遗址出土的5个猪和21个人类牙釉质样品的锶同位素比值测定结果做了柱状图(图二)。横坐标表示陶寺遗址出土猪与人类遗骸样品,纵坐标表示锶同位素比值,两条虚线之间的部分就代表陶寺遗址当地的锶同位素比值范围。

如图二所示,由本次检测的21个个体的牙釉质锶同位素比值可以明显看出,仅有6个个体可能是本地人,其他15个个体可能是外来移民,外来者约占总数的70%以上。再将锶同位素比值数据结合考古背景仔细分析,21个个体中来自墓葬的仅有5个,分别属于M14和M22两座墓。其中,2座墓主牙釉质的锶同位素比值说明他们可能为本地出生。M22抗坑中的3个个体,其中有1个个体可能是本地出生的,而另外2个个体可能出生在不同地区。来自灰坑的样品数量比较多,有16个个体。其中仅有3个个体牙釉质的锶同位素比值说明其可能是本地人,其余13个个体可能为外来者。灰坑的样品中外来人大约占比为81.3%。总体而言,本次检测结果表明,在陶寺遗址中晚期的先民



图二 陶寺遗址出土人与猪牙釉质锶同位素比值柱状图

中,存在很高比例的外来移民²³。

2. 二里头遗址古人类的迁移情况

二里头遗址位于河南省洛阳盆地东部,遗址年代距今约3800—3500年。自20世纪50年代开始,经过几十年考古发掘,发现二里头遗址沿古伊洛河北岸呈西北—东南向分布,东西最长约2400、南北最宽约1900米,现存面积约300万平方米²⁴。遗址内已发现随葬大量青铜器和玉器的墓葬几百座,出土成组青铜容器和兵器及精致的陶礼器等现象表明二里头文化时期社会已发展到等级分明的阶段,墓葬分为不同等级。考古学研究还发现,二里头文化的分布范围相当广泛,在东西200多公里,南北300多公里的范围内发现的二里头文化遗址数以百计²⁵。二里头文化在丰富自身文化内涵的同时也吸收了若干周边地区文化因素,出现以镶嵌绿松石的铜牌饰、彩绘漆器为代表的许多带有其他文化风格的器物类型。在各种文化交流的过程中,自然少不了人类的身影。

为了探讨二里头遗址这种大型都邑是否存在外来移民及移民的规模,选择了二里头遗址出土的21个个体人类遗骸样品作为研究对象,这些样品分别来自二里头文化二期、二里头文化三期、二里头文化四期、二里岗上层文化时期。将10个猪和32个人类的牙釉质和骨密质样品的锶同位素比值测定数据做成柱状图,如图三所示。其中骨骼样品均经过微量元素检测并将受

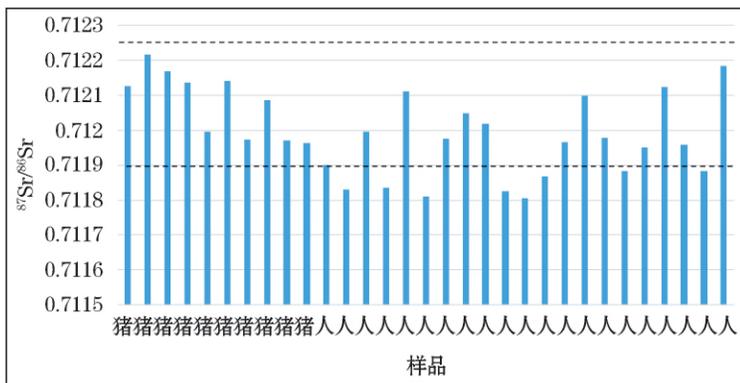
到污染的样品剔除。图中横坐标和纵坐标所代表的内容如上节图二所述。

从图三所示本次检测的21个个体中,可能为本地人的有14个,约占居民总数的60%以上;余下7个个体可能为非本地出生,推测移民占居民总数的30%左右。因为二里头遗址出土人类遗骸样品分别来自二里头文化二期至四期及二里岗文化时期,所以,还可以将样品划分为二里头文化时期和二里岗文化时期两个大的时段来讨论。从图三

所示不难看出,二里头文化时期的13个中,可能是本地出生的个体为10个,其余3个个体为移民,迁移比例为23%左右;而二里岗文化时期出土的7个个体中,3个个体可能是本地人,还有4个可能是外来人员,迁移比例为57%左右。据此推测二里头遗址的古代居民在不同时期迁移比例有可能是不同的²⁶。总体来讲,根据本次检测的结果推论,二里头遗址作为当时东亚地区最大的都邑遗址,存在较高比例的外来人口。

3. 喇家遗址古人类的迁移情况

喇家遗址位于青海省民和县官亭镇,处在黄土高原与青藏高原交会处,具有典型的黄土地形地貌²⁷。考古研究表明,喇家遗址由众多的房屋遗址、大型祭坛、多重环壕、中心广场等组成,种种遗迹现象表明,喇家遗址明显具有中心聚落的一些特征。出土有玉璧、石刀、陶器等级别很高的文物,保留了地震、大洪水以及山洪袭击的令人震惊的多重灾难遗迹,因



图三 二里头遗址出土人与猪遗骸锶同位素比值柱状图

2. 关于区域锶同位素比值特征的建立

锶同位素分析方法是在考古学研究趋于深入的需求下应运而生的,最终目的也还是要解决考古学研究中的问题。通过一系列遗址出土人类遗骸的锶同位素分析和研究,对这一方法在应用过程中所应注意的问题有了比较深刻的认识。任何方法的应用都有其优势和局限性,锶同位素分析方法也不例外。相比较传统考古学的文化因素及器物类型分析而作出的推测,锶同位素分析提供了一个可以更直接地推断出古代人类迁移行为的方法,但这一方法的应用是有其前提条件的。首要前提就是如何确定某一地区的锶同位素比值特征。正如前面所讨论的,很明显当地动物可以为建立生物可利用锶同位素的比值范围提供一个较为可靠的评估基准。先决条件是确认何种动物更适合作为当地动物。因为不同种类的动物有各自不同的活动范围。大型食草动物比小型动物的活动范围大,可以吃更多种类的植物而吸收更广泛的锶到体内。人的食物中包含许多植物和动物,作为家养动物的猪和狗基本上吃的是人类的食物残余,从理论上讲,史前时期的人和家养动物体内的锶同位素比值应该是一致的^③,所以,目前的研究认为,在确认猪和狗是家畜的前提下,可以用考古出土猪和狗的牙釉质样品建立当地生物利用锶同位素的比值范围。

当然,在一个特定遗址确定所在地的生物可利用的锶同位素比值范围,还是应该根据遗址的具体情况加以分析判断,不能一概而论。因为考古遗址所在地的生物可利用锶同位素比值范围的微小变化都可能引起对数据结果解释的不同,所以一般情况下,人类遗骸、地质资料、动物群等的同位素比值范围应保持一致,彼此构成一条证据链,这是获得所在地生物可利用锶同位素比值范围的比较理想的结果,但是在实际考古学研究中,往往不能同时具备以上全部条件,甚至检测的样品种类及数量的选

择也要依据田野发掘工作的内容和进程而定。比如,有些个体仅存遗骨,缺失牙齿,所以有时不能获得充分的样品量,所得出的检测结果可能会存在偏差。建议研究者在开展古代人类迁移研究时,必须对遗址的各方面情况进行仔细考察,谨慎选择。

四、展 望

考古学发展到今天,已经逐渐成为一门以人文社会科学研究为目的、广泛采用自然科学等相关学科的研究方法和技术的学科。回顾考古学的发展历程不难发现,其从始至终都在借鉴和采用自然科学的方法。从最初的地层学和类型学,到现在的年代学等等,无一例外地都是根据考古学研究的需要,借鉴其他自然科学的方法,然后运用或者在实践中不断地加以改进后运用于考古学的研究中,最终成为常规的考古学研究方法和手段。锶同位素分析方法在研究古代人类迁移行为的实践中,尽管不乏成功的实例,却也还在不断摸索,逐渐完善之中。

由于我国国土幅员辽阔,地质状况复杂多变。单独采用锶同位素分析可能很难区分地质环境上相近地区,从而给古代人类迁移研究带来困难,所以随着研究的不断深入及检测技术水平的提高,同时检测人体遗骸中包含的其他种类同位素(铅、碳、氧等)也逐渐成为研究者探寻的方向。总而言之,任何分析测试技术的应用都是要在考古学文化的框架内解决考古学研究中出现的问题,只有如此,才能凸显出其应有的价值。

基金项目: 本研究由国家自然科学基金项目(批准号: 21271186)、国家社会科学基金项目(批准号: 12BKG019)、中国社会科学院哲学社会科学创新工程(批准号: 2019KGYJ044)共同资助。

注 释:

①⑦ Ericson J E. 1985. Strontium isotope characterization in the study of prehistoric human ecology [J]. *Journal of Human Evolution*. 14: 503 - 514.
② G. 福尔 《同位素地质学原理》,科学出版社1983年,第86~109页; Kennedy B P, Folt C L, Blum J D, et al. 1997. Natural isotope markers in salmon [J]. *Nature*, 387: 766

- 767.

③⑩ Bentley R A. 2006. Strontium isotopes from the earth to the archaeological skeleton: a review. *Journal of Archaeological Method and Theory* [J], 13: 135 - 187.

④ Price, T. D., Manzanilla, L., Middleton, W. D., Immigration and the ancient city of Teotihuacan in Mexico: a study using

- strontium isotope ratios in human bone and teeth. *Journal of Archaeological Science*, 2000, 27: 903-913; Price T D, Johnson C M, Ezzo J A, et al. 1994. Residential mobility in the prehistoric Southwest United States: a preliminary study using strontium isotope analysis [J]. *Journal of Archaeological Science*, 21: 315-330; Knudson K J, Tung T A, Nystrum K C et al. 2005. The origin of the Juch' uypampa cave mummies: Strontium isotope analysis of Archaeological human remains from Bolivia [J]. *Journal of Archaeological Science*, 32: 903-913.
- ⑤ 方辉 《研究人口迁移的新方法——锶同位素分析技术》，《中国文物报》2004年11月5日第3版。
 - ⑥ Hemer K A, Evans J A, Chenery C A, et al. Evidence of early medieval trade and migration between Wales and the Mediterranean Sea region [J]. *Journal of Archaeological Science*, 2013, 40: 2352-2359; Waterman A J, Peate D W, Silva A M, et al. In search of homelands: using strontium isotopes to identify biological markers of mobility in late prehistoric Portugal [J]. *Journal of Archaeological Science*, 2014, 42: 119-127; c. Bäckström I, Price T D. Social identity and mobility at a pre-industrial mining complex, Sweden [J]. *Journal of Archaeological Science*, 2016, 66: 154-168.
 - ⑧ Price T D, Connor M, Parsen J D.: Bone chemistry and the reconstruction of diet: strontium discrimination in white-tailed deer [J]. *Journal of Archaeological Science*, 1985, 12: 419-442; Burton J H, Price T D: The ratio of barium to strontium as a paleodietary indicator of consumption of marine resources [J]. *Journal of Archeological Science*, 1990, 17: 547-557; Blum J D, Taliaferro E H, Weisse M T and Holmes R T: Changes in Sr/Ca, Ba/Ca and 87 Sr/86 Sr ratios between two forest ecosystems in the northeastern USA, *Biogeochemistry*, 2000, 49, 87-101.
 - ⑨ Price T D, Blitz J, Burton J H: Diagenesis in prehistoric bone: problems and solutions [J]. *Journal of Archaeological Science*, 1992, 19: 513-530; Price T D, Burton J H, Bentley R A: The characterization of biologically available strontium isotope ratios for the study of prehistoric migration [J]. *Archaeometry*, 2002, 44: 117-136; Aberg G.: The use of natural strontium isotopes as tracers in environmental studies. *Water, Air and Soil Pollution*, 1995, 79, (1-4): 309-322.
 - ⑩ A. Sillen, G. Hall, R. Armstrong, 1998. 87Sr/86Sr ratio in modern and fossil food-webs in sterckfontein valley: implications for early hominid habitat preference. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 62 (14), 2463-2473.
 - ⑪ R. A. Bentley, T. D. Price, E. Stephan, 2004. Determining the "local" 87Sr/86Sr rang for Archaeological skeletons: a case study from Neolithic Europe. *Journal of Archaeological Science*, 31, 365-375.
 - ⑫ 刘东生 《黄土与环境》，科学出版社 1985 年。
 - ⑬ 李拓宇、莫多闻、胡珂等 《临汾盆地陶寺遗址附近全新世黄土剖面的环境指标分析》，《北京大学学报（自然科学版）》2013 年第 49 卷第 4 期。
 - ⑭ 宋豫秦、郑光、韩玉玲等 《河南偃师二里头遗址的环境信息》，《考古》2002 年第 12 期。
 - ⑮ 根据谷歌地图软件。
 - ⑯ 苏秉琦 《中国文明起源新探》，辽宁人民出版社 2009 年。
 - ⑰ 罗运兵、张居中 《河南舞阳县贾湖遗址出土猪骨的再研究》，《考古》2008 年第 1 期。
 - ⑱ 袁靖、黄蕴平、杨梦菲等 《公元前 2500 年—公元前 1500 年中原地区动物考古学研究》，《科技考古》（第 2 辑），北京科学出版社 2007 年，第 12~34 页。
 - ⑲ 陈相龙、袁靖、胡耀武、何弩、王昌燧 《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 年第 9 期；李志鹏、袁靖 《解读动物密码二里头遗址出土动物的多学科合作研究》，《世界遗产》2015 年第 8 期。
 - ⑳ 赵春燕、袁靖、何弩 《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》2010 年第 1 期；赵春燕、李志鹏、袁靖等 《二里头遗址出土动物的来源初探——根据出土动物牙釉质的锶同位素比值分析》，《考古》2011 年第 7 期。
 - ㉑ 何弩 《陶寺文化谱系研究综述》，解希恭主编 《襄汾陶寺遗址研究》，科学出版社 2007 年，第 408~434 页。
 - ㉒ 赵春燕、何弩 《陶寺遗址中晚期出土部分人类牙釉质的锶同位素比值分析》，《第四纪研究》2014 年第 1 期。
 - ㉓ 许宏、陈国梁、赵海涛 《二里头遗址聚落形态的初步考察》，《考古》2004 年第 11 期。
 - ㉔ 杜金鹏 《华夏文明之根——嵩山地区在华夏文明起源及早期发展中的地位》，《中原文物》2000 年第 2 期。
 - ㉕ 赵春燕 《先秦时期中原地区都城遗址人口迁移的初步研究——以陶寺遗址与二里头遗址为例》，《中华之源与嵩山文明研究》（第 2 辑），中国社会科学院考古研究所郑州中华之源与嵩山文明研究会编，科学出版社 2015 年 6 月。
 - ㉖⑳ 叶茂林 《青藏高原东麓黄河上游与长江上游的文化交流圈——兼论黄河上游喇家遗址的考古发现及重要学术意义和影响》，《中华文化论坛》2005 年第 4 期。
 - ㉗ 任小燕、王国道、蔡林海等 《青海民和县喇家遗址 2000 年发掘简报》，《考古》2002 年第 12 期。
 - ㉘ 赵春燕、吕鹏、袁靖、叶茂林 《青海喇家遗址动物饲养方式初探——以锶同位素比值分析为例》，中国社会科学院考古研究所编 《2015 中国·广河齐家文化与华夏文明国际研讨会论文集》，文物出版社 2016 年 8 月，第 361~367 页。
 - ㉙ 赵春燕、王明辉、叶茂林 《青海喇家遗址人类遗骸的锶同位素比值分析》，《人类学学报》2016 年第 2 期。
 - ㉚ 中国社会科学院考古研究所 《二里头（1999—2006）》，文物出版社 2014 年 10 月。
 - ㉛ 中国社会科学院考古研究所、山西省临汾市文物局编著：《襄汾陶寺——1978—1985 年发掘报告》，文物出版社 2015 年 12 月。
 - ㉜ Knudson K J, Tung T A, Nystrum K C et al. 2005. The origin of the Juch' uypampa cave mummies: Strontium isotope analysis of Archaeological human remains from Bolivia [J]. *Journal of Archaeological Science*, 32: 903-913; Grupe G, Price T D, Schroter P et al. 1997. Mobility of Bell Beaker people revealed by strontium isotope ratios of tooth and bone: A Study of southern Bavarian skeletal remains. *Applied Geochemistry*, 12 (4): 517-525; Kristin M H, B. Brandon Curry, et al. 2009. variation in Strontium isotope ratios of Archaeological fauna in the Midwestern United States: a preliminary study, *Journal of Archaeological Science*, 36, 64-73.

(责任编辑、校对 王孝华)