

许家窑 - 侯家窑遗址年代学研究进展

张 帆^{1,2}, 贺茂勇^{1*}, 李 斌², 罗家馨¹

1. 中国科学院地球环境研究所 黄土与第四纪地质国家重点实验室, 西安 710061

2. 太原理工大学 矿业工程学院, 太原 030024

摘 要: 人类的起源与演化一直是考古学及其他学科研究的重点。泥河湾盆地, 是我国古人类文化的重要组成部分, 在泥河湾盆地的许家窑 - 侯家窑遗址, 正处于现代人起源、扩散的关键时期, 为解决我国甚至东亚的现代人起源问题具有举足轻重的作用。前人对遗址进行过多次系统挖掘, 开展了一系列不同方法的年代学工作, 然而其文化层年代却有较强的争议。本文对许家窑 - 侯家窑遗址文化层的年代进行系统总结, 通过对前人用不同测年方法获得年代进行综合对比。结果表明: 不同方法测定的许家窑 - 侯家窑遗址文化层的年代差距过大, 难以确定文化层的年代。许家窑 - 侯家窑遗址文化层的年代的不确定, 严重影响了众多学者对于我国现代人起源的进一步研究。年代测量方法虽然众多, 但是不同测年方法, 有着不同的测年区间, 因此后期需要根据许家窑 - 侯家窑遗址的年代区间来选择适合的测量方法, 并使用不同材料来进行对比分析获得最为准确的年代。

关键词: 许家窑 - 侯家窑遗址; 泥河湾盆地; 古人类起源; 年代学进展

Research progress on age of Xujiayao-Houjiayao Site

ZHANG Fan^{1,2}, HE Maoyong^{1*}, LI Bin², LUO Jiaxin¹

1. State Key Laboratory of Loess and Quaternary Geology, Institute of Earth Environment, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710061, China

2. College of Mining Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China

Abstract: Background, aim, and scope The origin and evolution of human beings have always been the focus of archeological research. The legacy of Xujiayao man found in Nihewan Basin formed a critical period for the emergence and spread modern people. Nevertheless, there remains ongoing debate regarding the age of the Xujiayao-Houjiayao Site. This article aims to examine the chronology of the Xujiayao-Houjiayao Site, with a particular emphasis on addressing notable concerns raised in prior research. **Materials and methods** This study mainly summarizes the principle and measurement results of dating the cultural layers with different methods of the Xujiayao-Houjiayao Site. **Results** At present, the main methods for measuring the age of the cultural layer

收稿日期: 2020-04-02; 录用日期: 2022-04-23; 网络出版: 2022-11-13

Received Date: 2022-04-02; Accepted Date: 2022-04-23; Online first: 2022-11-13

基金项目: 国家自然科学基金重大项目(41991252); 陕西省杰出青年科学基金(2022JC); 中国科学院战略性先导科技专项(B类)(XDB40000000)

Foundation Item: Major Program of National Natural Science Foundation of China (41991252); Shaanxi Provincial Natural Science Foundation for Distinguished Young Scholars (2022JC); Strategic Priority Research Program of Chinese Academy of Sciences (XDB40000000)

通信作者: 贺茂勇, E-mail: hemy@ieecas.cn

Corresponding Author: HE Maoyong, E-mail: hemy@ieecas.cn

引用格式: 张 帆, 贺茂勇, 李 斌, 等. 2023. 许家窑 - 侯家窑遗址年代学研究进展 [J]. 地球环境学报, 14(3): 272-283.

Citation: Zhang F, He M Y, Li B, et al. 2023. Research progress on age of Xujiayao-Houjiayao Site [J]. *Journal of Earth Environment*, 14(3): 272-283.

of the Xujiayao-Houjiayao Site are paleomagnetic dating and electron spin resonance. The main methods for determining the age of the cultural layer of the Xujiayao-Houjiayao Site include paleomagnetic dating, electron spin-resonance spectroscopy, ^{14}C , optically stimulated luminescence, Uranium-series disequilibrium dating and $^{26}\text{Al}/^{10}\text{Be}$. However, the conclusions drawn by the different methods are very different, with the largest difference of 500 ka BP. The Xujiayao-Houjiayao Site is 500 ka BP with paleomagnetic methods and K/Ar dating, while the youngest site is 16 ka BP using the rhino bone fossil measured by ^{14}C . **Discussion** This paper summarizes and analyzes various hypotheses about the origin and dispersal of modern humans at home and abroad. Currently, some scholars believe that modern humans may have a single origin in Africa, while others believe that modern humans evolved from *Homo sapiens* in different regions. However, after entering the 21st century, both hypotheses have undergone subtle changes, and both tend to be African. Modern humans provide most genes for human beings around the world. The Xujiayao man, discovered in Nihewan Basin in China, is about 100 ka BP old and lies in the key period of the merge and spread of modern Chinese people, so it is great significance. However, the age of the Xujiayao site has long been a matter of great controversy, and the conclusions drawn from physical dating methods are quite different. The reason may be that the paleoenvironmental evolution of Nihewan Basin is not combined with dating methods, and there is a lack of constraints on age determination. **Conclusions** At present, the age of Xujiayao-Houjiayao Site is difficult to unify, so it is necessary to improve the working methods and do more research. **Recommendations and perspectives** To determine the age of the Xujiayao-Houjiayao Site, it is important to link the ancient human activities in the cultural layer of the site with the changes of the ancient environment at that time, especially the extinction of ancient lake water and volcanoes. The extinction of ancient lake water may provide a lower age limit for the cultural layer of the site; by determining the active period of the Datong volcano and combining it with the stratigraphic age, the cultural age of the site can be better understood.

Key words: Xujiayao-Houjiayao Site; Nihewan Basin; the origin of ancient humans; chronology progress

人类的起源和发展是世界生命科学的三大谜团所在,也是目前学术界广泛研究的重要问题之一(高星,2021)。“非洲起源说”和“连续进化附带杂交说”是国际上关于现代人的起源的两种主流假说,非洲起源说认为在 0.20 Ma BP 人类的祖先起源非洲,然后迁徙至世界各地,取代当地的原有人类,逐步进化为现在的人类,并于 0.05 Ma BP 来到中国,取代了中国原有的直立人,并发展成为了现在的华夏物种(Hawks,2001)。

进入 21 世纪后,随着中国出土越来越多更新世的考古遗址和人类头骨,部分学者对“非洲起源说”持反对态度,支持“连续进化附带杂交说”,核心观点为世界各地的早期人类不断进行着基因交流,且分布于亚洲和欧洲地区的现代人是由各个地区的直立人种进化而来的(Cann et al.,1987)。近年来随着对于古人类研究的不断深入,越来越多的学者认为古人类的生存环境影响着现代人的起源与行为的演化。

中国的泥河湾盆地,位于河北省西北部和山

西省北部桑干河流域,包括河北省的阳原盆地和山西省的大同盆地,面积约 9000 km²,海拔 1000 m 左右,北侧有北山和熊耳山,西侧为口泉山,东侧为凤凰山,南侧为恒山发育走向呈北北东向,地势特点为西南高、东北低,盆地狭长,呈现两山夹一川的地貌形态,盆地内发育有河湖相沉积地层,有丰富的更新世中晚期的哺乳动物化石和古人类遗址(李曼玥,2016),泥河湾盆地古人类遗址分布位置见图 1。

1963 年,泥河湾盆地自发现了峙峪遗址以来,便受到了越来越多学者的关注(贾兰坡等,1972),相继出土了旧石器时代早期早段黑土沟遗址、马圈沟遗址、小长梁、山神庙咀、东谷坨、飞梁、麻地沟、岑家湾、许家坡、霍家地、马梁等遗址;旧石器时代早期晚段的后沟、东坡、摩天岭、三棵树等遗址;旧石器时代中期许家窑-侯家窑、板井子等遗址;旧石器时代晚期的的神泉寺、西白马营、油房、二道梁、籍箕滩等遗址(刘扬,2012;谢飞,2018)。泥河湾部分遗址

年代见表 1。泥河湾盆地出土了各种各样的动物化石以及石器，记录了从旧石器时代至新石器时代发展演变的全部过程，因此也被誉为“东方人类的故乡”，且泥河湾盆地在更新世期间所经历的

古湖—古湖湖退—峡谷开通古湖消亡—侵蚀—冲积和风积过程，与非洲东部著名的奥杜威峡谷（Olduvai Gorge）的环境变迁过程非常相似，因此也吸引了众多国际和国内学者进行研究。

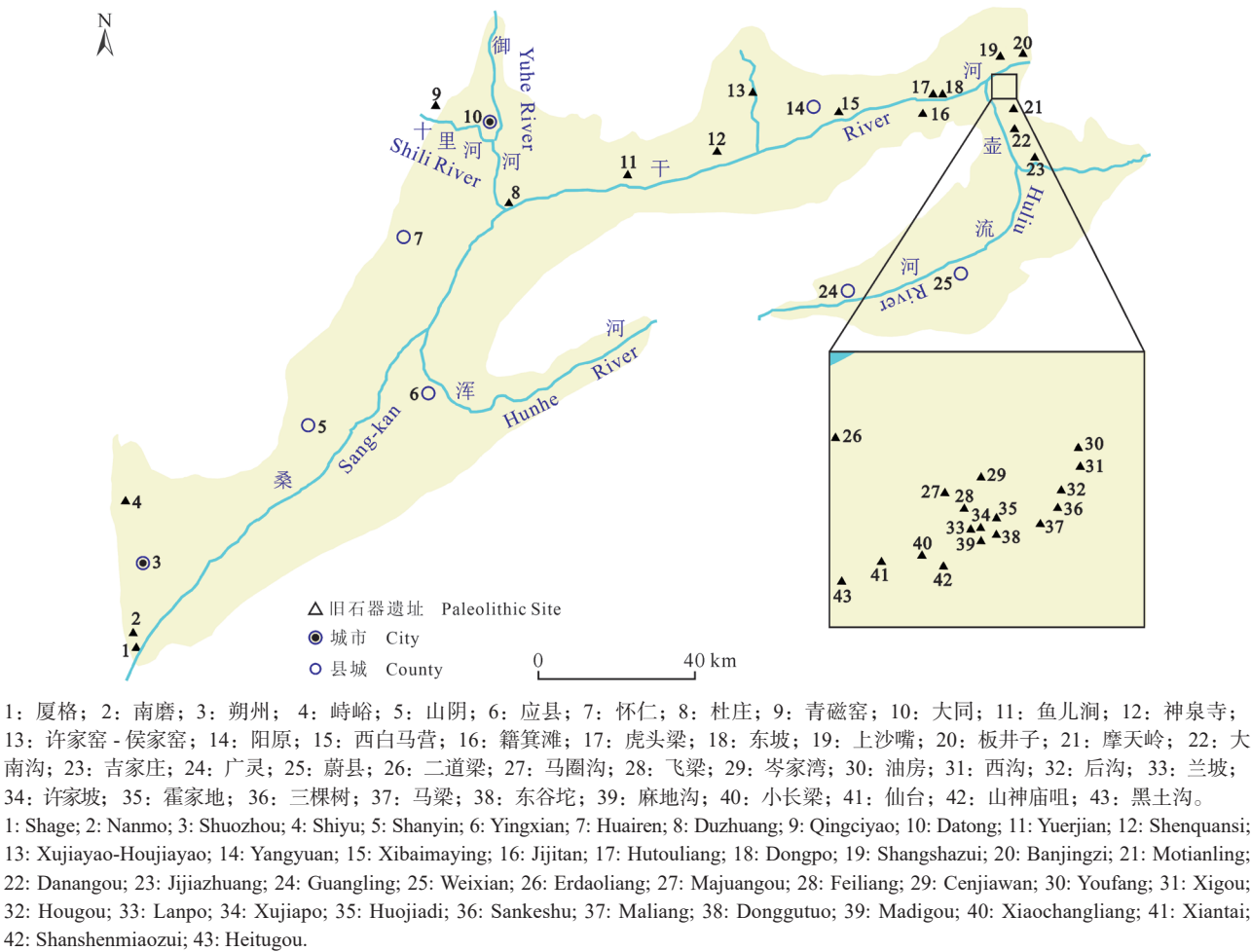


图 1 泥河湾盆地遗址分布图
Fig. 1 Site distribution map of Nihewan Basin

表 1 泥河湾盆地部分遗址年代表			
Tab. 1 The age of some sites in the Nihewan Basin			
遗址 Site	年代 Age/Ma	测年方法 Dating method	
马圈沟遗址 Majuangou Site	1.76	$^{26}\text{Al}/^{10}\text{Be}$ 、古地磁 $^{26}\text{Al}/^{10}\text{Be}$, paleomagnetism	
小长梁遗址 Xiaochangliang Site	1.36	古地磁、地层学 Paleomagnetism, stratigraphy	
东谷坨遗址 Donggutuo Site	1.10	古地磁、电子自旋共振 Paleomagnetism, ESR	
马梁遗址 Maliang Site	0.78	古地磁 Paleomagnetism	
后沟遗址 Hougou Site	0.39	古地磁 Paleomagnetism	
许家窑-侯家窑遗址 Xujiayao-Houjiayao Site	0.10	—	
板井子遗址 Banjingzi Site	0.078	铀系法、光释光 Uranium series method, OSL	
西白马营遗址 Xibaimaying Site	0.04	铀系法等 Uranium series method	
马鞍山遗址 Ma'anshan Site	0.012	^{14}C 测年 ^{14}C dating	
于家沟遗址 Yujiagou Site	0.011	热释光等 Thermoluminescence dating techniques	

处于泥河湾盆地的许家窑-侯家窑遗址因其拥有丰富的人类化石、石制品和大量的哺乳动物化石,且遗址文化层上下存在多次火山活动和湖退湖侵作用,对于研究古人类生活环境及其活动有着重要的科学价值,逐渐成为泥河湾盆地重要的遗址之一。许家窑-侯家窑遗址由73113地点(山西省阳高县许家窑村)和74093地点(河北省阳原县侯家窑村)构成。目前在区域内发现的哺乳动物化石有普通狼、披毛犀、诺氏古菱齿象、野马、野驴、河套大角鹿、赤鹿、普氏羚羊和原始野牛等,基本都是更新世晚期的动物种属(贾兰坡和卫奇,1976);发现古人类化石共20件,从头骨特征上看,与北京人具有相似的落后特征,但也与尼安德特人有着相似的进步特征,可能是北京人和尼安德特人之间的过渡类型(贾兰坡和卫奇,1976)。许家窑人正处于现代人起源、扩散的关键时期,尤其对于探究我国现代人的起源有着举足轻重的意义(李曼玥,2016)。遗址的年代学研究是所有研究的基础,但不同的学者对遗址测年得出的结果差异较大,早至距今0.5 Ma,晚至距今0.016 Ma,严重影响了该遗址年代的判断。因此本文对目前该遗址的年代学研究进展进行总结,并对年代学研究存在问题和未来发展进行分析和展望。

1 许家窑-侯家窑遗址研究区简介

许家窑-侯家窑遗址位于阳高县1 km的梨益沟西岸的断崖上,高程在1000 m左右,地理坐标为113°59'E,40°06'N。遗址地处山西省和河北省的边界上,分属两省管辖。

该遗址所在地区属于大陆性季风气候,四季分明,昼夜温差大,年平均气温7.1℃,极端最高气温38.1℃,极端最低气温-31.8℃;年平均降水量411.3 mm(浑凌云,2012;吉云平,2016)。农作物一年一熟,主要气象灾害有干旱、大风沙尘、霜冻、洪涝、冰雹等。山前及河川谷地为广阔的农业耕作区,自然植被较少;山地主要以森林植被景观为主。人工种植植被以小麦、玉米、杏等为主,散生树类以杨树、柳树、榆树为主,灌木以荆条、白羊草、马棘等为主(马子清,2001;吉云平,2016)。

1973年至今,研究人员已经在许家窑-侯家窑遗址进行了5次大规模系统发掘:

(1) 贾兰坡和卫琦(1976)在1973—1974

年发现了73113地点,之后发现74093地点并进行了2 m²的试掘。

(2) 贾兰坡等(1979)在1976年对74093地点进行了第二次发掘,获得了9件古人类化石、大量的动物化石和石制品。

(3) 吴茂霖(1980)在1977年对74093地点进行了第三次发掘,获得了8件古人类化石、大量石器及哺乳动物化石。

(4) 吴茂霖(1986)对74093地点进行了第四次发掘,得到了3件古人类化石。

(5) 王法岗(2015)在2007—2012年对74093地点进行了第五次发掘,出土了少量骨制品和石器。

许家窑-侯家窑遗址剖面74093地点高程1000 m左右,大约15 m,分布如下:

第一层:0—0.2 m为表土层;

第二层:0.2—2.2 m为黄色细砂与亚黏土互层,水平层理;

第三层:2.2—2.47 m为砂砾石层;

第四层:2.47—2.93 m为灰色细砂层;

第五层:2.93—3.18 m为黄色粉砂质黏土;

第六层:3.18—4.49 m为粗砂砾石层,水平层理;

第七层:4.49—4.54 m为胶结砂层;

第八层:4.54—7.21 m为灰白色—浅灰色粉砂质黏土,弱水平层理;

第九层:7.21—7.94 m为棕褐色砂质黏土,为古土壤层;

第十层:7.94—8.24 m为蓝灰色砂质黏土;

第十一层:8.24—9.59 m为棕色砂质黏土;

第十二层:9.59—10.29 m为黄褐色—灰绿砂质黏土;

第十三层:10.29—12.69 m为黑色砂质黏土,为泥炭层;

第十四层:12.69—12.94 m为黑色—黄褐色砂质黏土;

第十五层:12.94—14.29 m为蓝灰色—浅蓝色黏土;

第十六层:14.29—15.00 m为灰黄色—蓝灰色黏土,为泥河湾层。

其中7.21—14.29 m为许家窑-侯家窑遗址文化层,其中以10.29 m为界分为上下文化层,古人类化石主要出土在上文化层(李曼玥,2016)。

许家窑 - 侯家窑遗址剖面图见图 2。



图 2 许家窑 - 侯家窑遗址剖面图 (张鹏, 2019)

Fig. 2 Profile of Xujiayao-Houjiayao Site
(Zhang P, 2019)

在早年许家窑 - 侯家窑遗址的报告中将遗址命名为许家窑旧石器时代文化遗址, 1976 年, 阳高县政府在遗址处树立了许家窑遗址的石碑, 后因遗址命名争端, 许家窑遗址的石碑被人为毁坏。目前仅仅遗留侯家窑遗址的石碑 (卫奇, 2012)。遗憾的是, 许家窑遗址的石碑未有重新建立, 笔者认为, 许家窑 - 侯家窑遗址名称充分考虑了当时的时代背景, 且已由国家定名, 建议遗址处石碑及时更换为刻有“许家窑 - 侯家窑遗址”的石碑。

2 许家窑 - 侯家窑遗址年代测量历史

年代学工作是遗址研究的最为基础工作, 其准确性影响其他工作。遗址的年代学常采用的方法是化石及地层方法、光释光测年、古地磁年代法、 ^{14}C 测年、铀系法测年、电子自旋共振法测年和 $^{26}\text{Al}/^{10}\text{Be}$ 埋藏测年法等, 下面对这些方法测试原理和许家窑 - 侯家窑遗址测试年代进行简单汇总。

2.1 化石及地层

1976 年贾兰坡和卫奇 (1976) 根据在许家窑遗址 - 侯家窑遗址发掘出的等“周口店第 1 地点——峙峪系”的石器中, 发现了北京人文化所没有的原始棱柱石核、短身圆头刮削器等一些尖

状的石器, 且相比峙峪文化缺少斧形小石刀、楔形小石核等一些进步类型, 因此将其定为置于北京人文化和峙峪文化之间的类型, 并推断与屹塔峰文化同期, 距今 60—30 ka; 严富华等 (1979) 发现许家窑遗址的土样孢粉中云杉花粉比例较多, 指出遗址沉积时期气候寒冷, 植被类型为草原, 并结合古动物群对比得出当时地质年代应该为晚更新世偏晚期, 距今 30 ka 以前; 尤玉柱和徐钦琦 (1981) 通过对许家窑 - 侯家窑遗址的动物化石组合的分析, 得出当时的植被条件为森林灌丛和草原相混, 气候寒冷, 为大理冰期的第一高峰期, 距今约 60 ka。吴茂霖 (1983) 通过古人类化石与北京猿人和山顶洞人进行对比, 得出许家窑人具有北京猿人的一些特征, 但又比北京猿人有着更进步的特征, 与山顶洞人相比, 却有更多原始的性状, 并通过对许家窑动物群与丁村动物群、山西峙峪动物群、萨拉乌苏动物群相比, 许家窑动物群和丁村动物群比较类似, 大致与丁村同期, 所以推断许家窑遗址应为 60 ka 以上但不超过 100 ka; 李蕾等 (2016) 在许家窑 - 侯家窑遗址根据古人类文化遗址埋藏的层位判断距今 224—161 ka; 王法岗 (2016) 结合当时已有数据, 通过对时石器制品, 人类化石特征和动物群种类分析得出遗址时代应该约为 170 ka。根据古人类学家对于化石特征和地层的认识, 可以通过与其他遗址相比较而得出大概年龄, 对于其他物理测年方法具有很深的借鉴意义, 但同时, 此方法给出的年龄也需要结合物理测年方法来确定准确的年代。

2.2 光释光测年

光释光测年由 Huntley et al. (1985) 提出, 并由卢演传 (1990) 引入国内, 国家地震局地质研究所建立了国内首个光释光测年实验室 (张克旗等, 2015)。光释光测年技术是在矿物对光敏感和热释光的基础上发展起来的一种绝对测年技术 (卢演传等, 1996)。经过 30 余年的发展, 光释光技术已经较为完善。晶体矿物埋藏前受到高温或者日光照射作用, 释光信号会归零, 而矿物埋藏后会再次接受周围的电离辐射, 释光信号会重新积累, 其强度与受到电离辐射的时间和强度成正比 (Huntley et al., 1985; Marin et al., 2021)。许家窑 - 侯家窑地区的黄土满足了光释光测年的基本要求, 黄土为风成沉积, 在沉积过程中太阳光照充足, 释光信号明确归零、黄土 - 古土壤序列中

放射性 U、Th 和 K 元素的浓度相对均一且该地区雨量较少,周围的电离辐射分布稳定、黄土中石英和长石这两种测年矿物含量较高且释光信号较高,完全满足实验室的要求、测年范围可有数百年至百万年(康树刚等,2016)。

長友恒人等(2009)对许家窑-侯家窑遗址 74093 号地点的文化层上层和文化层各采取一个光释光土样共计两个样品进行检测。高立家(2021)完成对许家窑-侯家窑遗址的光释光测试,共采集 4 个样品,其中两个来自于文化层下紧邻的湖相砂黏土,另外两个采自文化层之上的水平层理的细沙层。河北师范大学考古研究院和北京大学周力平教授 2016 年公布的对 74093 号剖面的光释

光数据,数据所用样品分别为 2012 年 11 月河北师范大学考古研究院协同北京大学地理系采集了的距离剖面顶部 7.35 m, 8.2 m, 8.85 m, 9.35 m 和 9.75 m 的 5 个土样、2013 年 7 月河北师范大学考古研究院采集的距离剖面顶部 0.3 m、1.0 m 和 3.0 m 的地层的土样以及 2014 年 8 月河北师范大学考古研究院采集的距离剖面顶部 12.83 m、13.85 m 和 14.25 m 的土样,共计样品数量 11 个,光释光样品通过 Risø TL/OSL-DA-20C/D 全自动释光仪测试,其中 9.75 m 和 14.25 m 的数据为无效数据,共得到 9 个有效数据(李曼玥,2016)。至今许家窑-侯家窑遗址光释光数据目前共 17 个,详见表 2。

表 2 许家窑-侯家窑遗址光释光年龄数据汇总
Tab. 2 Summary of luminescence age data from Xujiayao-Houjiayao Site

深度 Depth/m	对应层位 Corresponding stratum	光释光年龄 OSL age/ka	参考文献 Reference
0.3	第二层 Second floor	84.8±6.3	李曼玥, 2016 Li M Y, 2016
1.00	第二层 Second floor	99.2±4.1	
3.00	第三层 Third floor	101.9±4.4	
7.35	第九层 Ninth floor	161±13	
8.20	第十一层 Eleventh floor	175±13	
8.85	第十一层 Eleventh floor	177±19	
9.35	第十一层 Eleventh floor	188±23	
9.75	第十二层 Twelfth floor	224±22	
12.83	第十三层 Thirteenth floor	198±15	
13.85	第十四层 Fourteenth floor	212±16	
14.25	第十五层 Fifteenth floor	188±10	
埋藏位置 Burial location	对应层位 Corresponding stratum	光释光年龄 OSL age/ka	参考文献 Reference
文化层上层 Upper cultural stratum	第八层 Eighth floor	60±8	長友恒人等, 2009
文化层中部 Middle cultural layer	第十层 Tenth floor	69±8	Tsuneto Nagatomo et al., 2009
文化层下部 Subcultural layer	第十六层 Sixteenth floor	138.1±12.7	高立家, 2021 Gao L J, 2021
文化层下部 Subcultural layer	第十六层 Sixteenth floor	124.5±14.6	
文化层上部 Upper cultural stratum	第八层 Eighth floor	138.7±17.6	
文化层上部 Upper cultural stratum	第八层 Eighth floor	111.0±11.1	

2.3 古地磁年代法

在地球磁场历史中,地球磁场南极和北极发生了多次倒转,称为极性倒转(陈旭,2015)。与现在极性方向相同的时期称为正向极性期,反之则称为反向极性期。古地磁仅仅能测定相对年代,故往往需要辅助以其他测年手段。任一地区地层的年代可通过与古地磁年代表对比来进行确定,古地磁年代表的绝对年龄是用 K-Ar 同位素法来协助完成(朱岗崑,2005)。整个地球历史时期都具有磁性,因此古地磁年代法不受时间的限制,但是却受到其他很多条件的制约:不能存

在沉积间断、地层剖面要厚、沉积物粒度要细,且需要其他测年方法进行辅助。2007 年之后对于梨益沟调查中发现了不整合接触面的存在,之前的古地磁年代法认为地层剖面是整合的,因此对于此前古地磁年代法给出的结果仍需商榷。

Liu et al. (1992) 在许家窑-侯家窑遗址进行古地磁测定,证实文化层下 4 m 处存在布莱克负向极性亚时带,这也是说明泥河湾层一直延续到晚更新世的一个有力证明, Liu et al. (1992) 推断许家窑遗址的年代约为 123—118 ka; 但苏朴等(2000)再次通过古地磁实验纠正之前发现的

布莱克负向极性带为松林反极性带,属于早更新世晚期至中更新世中期,与传统泥河湾组时代相当,并对与文化层层位相当的湖泊中的火山灰进行 K-Ar 同位素测定,得出年限为 450—380 ka。陈硕(2017)对许家窑-侯家窑遗址进行古地磁分

析,发现均为正值,并未到达 B/M 界限,且发现遗址处于大同火山活跃期的第四、第五阶段之间,因此确定年龄为 190—90 ka。与苏朴等(2000)在 2000 年所做古地磁极性地层学的工作存在较大的冲突。古地磁数据汇总见表 3。

表 3 许家窑-侯家窑遗址古地磁年龄数据汇总
Tab. 3 Summary of ancient geomagnetic age data from Xujiayao-Houjiayao Site

文化层下 4 m 极性带 4 m polarity zone below the cultural layer	辅助测年方法 Auxiliary dating method	遗址文化层年龄 Cultural layer age of the site/ka	参考文献 Reference
布莱克负向极性亚时带 Black negative polarity subtime zone	—	123—118	Liu et al., 1992
松山反极性带 Matsuyama reverse polarity zone	K-Ar 同位素 The K-Ar isotope	450—380	苏朴等, 2000 Su P et al., 2000
未发现 B/M 界限 No B/M limit was found	根据火山活跃期 According to the volcanic activity period	190—90	陈硕, 2017 Chen S, 2017

2.4 ^{14}C 测年

^{14}C 测年又称为放射性碳测定法, ^{14}C 测年由利比创立, 首先应用于西方考古学界 (Arnold and Libby, 1949, 1951), 由夏鼐(1955)引进国内。而 ^{14}C 测年方法的使用需要满足三个条件: 大气中的 ^{14}C 含量不会随着时间发生变化; 有机物中的 ^{14}C 含量没有受到污染, 各个地区的 ^{14}C 含量相差不多。而在 ^{14}C 测年方法应用过程中, 这些假设基本不能满足, 需要对结果进行校正, 这也增加了 ^{14}C 测年方法的复杂性, 使得越来越多的学者开始探索 ^{14}C 测年方法的误差因素和校正手段 (李壮, 2020)。目前由于碳十四年代学中依然存在样品中的碳和碳库等非定量误差因素, 精度仍未达到考古学定年的需求, 因此 ^{14}C 测年法更适合作为一种辅助手段, 却不能承担得起重任 (李壮, 2020), 且 ^{14}C 测年结果范围大致在 0.055 Ma, 也不适合用来确定许家窑-侯家窑遗址的年代。

碳十四年代测定报告(六)(陈铁梅等, 1984)公布了 74093 地点剖面的 ^{14}C 结果, 样品采用淤泥, 采自剖面文化层中部; 根据中国社会科学院考古研究所(1991)公布的 ^{14}C 测年结果, 样品选自 74093 地点剖面 8—12 m 处的两个犀牛骨化石。王法岗和李峰(2020)提到 2011—2013 年日本株式会社加速器分析研究所完成了对许家窑-侯家窑遗址的 ^{14}C 测年, 并且使用精准度更高的 AMS- ^{14}C 方法。样品采自于 74093 下文化层 3

件动物骨骼和土壤中残存的植物残骸。 ^{14}C 数据汇总见表 4。

2.5 铀系测年法

铀系法测年需要使用到 U 和 Th 两种元素, 主要通过铀系衰变子体与母体的比值计算样品年龄 (Ivanovich and Harmon, 1992; Soliyev and Muzafarov, 2021)。铀系法测定的时间范围在 0.50 Ma 内。但学术界对于牙齿和骨化石样品是否可用于铀系测年一直备受争议。原因在于骨化石在埋藏过程中铀的迁移普遍存在, 并不构成封闭体系, 因此骨化石并不是理想的铀系测年对象 (韩非等, 2011)。

1982 年, 北京大学历史系考古专业年代测定实验室的陈铁梅等(1982)对许家窑-侯家窑遗址 74093 剖面出土的 6 个动物化石进行铀子系法测年, 分别采集自文化层上部的马牙本质和犀牛牙珐琅, 文化层下层上部的两个马牙本质, 文化层下层的马牙本质和马牙珐琅。具体数据及铀子系法年龄见表 5。

2.6 电子自旋共振法测年

电子自旋共振 (ESR) 于 ^{14}C 、铀系测年法一样都是基于放射性同位素射线衰变的测年方法, 但是其他放射性元素测年方法是基于放射性同位素母体和衰变产生的子体的比值, 从而求出矿物年龄, 测年范围可由 ka 测到 Ma (Grün, 1989), 但主要还是测定几百 ka 以内的样品。ESR 测年法测年范围广、测年矿物种类多, 因此大量应用于

在第四纪年代学,但 ESR 信号回零的驱动机制是 ESR 测年结果准确与否的关键,是否准确判断回

零与回零残留剂量等,这些都会对测年结果造成很大影响。

表4 许家窑-侯家窑遗址 ^{14}C 年龄数据汇总
Tab. 4 Summary of ^{14}C age data from Xujiayao-Houjiayao Site

埋藏位置 Burial location	对应层位 Corresponding stratum	测试材料 Test material	年龄 Age/ka	是否超出测试年限 Whether the test period is exceeded	参考文献 Reference
文化层中部 Middle cultural layer	第十一—十三层 11 th —13 th floor	淤泥 Muck	>40	超出 Out of bounds	陈铁梅等, 1984 Chen T M et al., 1984
文化层 8—12 m Cultural strata 8—12 m	第十一—十三层 11 th —13 th floor	犀牛骨化石 Fossilized rhino bone	16.92±2	未超出 Within bounds	中国社会科学院 考古研究所, 1992 The Institute of Archaeology, Chinese Academy of Social Sciences, 1992
文化层 8—12 m Cultural strata 8—12 m	第十一—十三层 11 th —13 th floor	犀牛骨化石 Fossilized rhino bone	16.94±2	未超出 Within bounds	
下文化层 Lower cultural layer	第十三—十五层 13 th —15 th floor	动物化石 Animal fossil	>54.064	超出 Out of bounds	
下文化层 Lower cultural layer	第十三—十五层 13 th —15 th floor	动物化石 Animal fossil	>54.038	超出 Out of bounds	
下文化层 Lower cultural layer	第十三—十五层 13 th —15 th floor	动物化石 Animal fossil	42.795±0.292	未超出 Within bounds	王法岗和李峰, 2020 Wang F G and Li F, 2020
下文化层 Lower cultural layer	第十三—十五层 13 th —15 th floor	植物残骸 Plant remains	24.714±0.088	未超出 Within bounds	
下文化层 Lower cultural layer	第十三—十五层 13 th —15 th floor	植物残骸 Plant remains	25.046±0.091	未超出 Within bounds	

表5 许家窑-侯家窑遗址铀子系法数据及年龄汇总表
Tab. 5 Summary table of uranium sub-method data and age at the Xujiayao-Houjiayao Site

埋藏位置 Burial location	对应层位 Corresponding stratum	测试材料 Test material	年龄 Age/ka	参考文献 Reference
文化层上层 Upper cultural stratum	第九—十二层 9 th —12 th floor	马牙本质 Horse dentin	88±5	
文化层上层 Upper cultural stratum	第九—十二层 9 th —12 th floor	犀牛牙珐琅 Rhino tooth enamel	91±9	陈铁梅等, 1982
文化层下层 Subcultural stratum	第九—十二层 9 th —12 th floor	马牙本质 Horse dentin	99±6	Chen T M
文化层下层 Subcultural stratum	第九—十二层 9 th —12 th floor	马牙本质 Horse dentin	102±17	et al., 1982
文化层下层 Subcultural stratum	第十三—十五层 13 th —15 th floor	马牙本质 Horse dentin	114±17	
文化层下层 Subcultural stratum	第十三—十五层 13 th —15 th floor	马牙珐琅 Horse dentin enamel	94±7	

2017年, Ao et al. (2017) 通过对许家窑-侯家窑遗址 74093 地点进行电子自旋共振法测年, 样品采取距离地表 8—12 m 的石英矿物, 对应文中第十一层、第十二层、第十三层, 得出年代数据范围为 376—232 ka BP。

2.7 $^{26}\text{Al}/^{10}\text{Be}$ 埋藏测年法

^{26}Al 和 ^{10}Be 埋藏方法是 Lal and Anold (1985) 提出的新方法。 $^{26}\text{Al}/^{10}\text{Be}$ 埋藏测年法一般采用石英矿物测年, 这是因为石英易于与 ^{26}Al 和 ^{10}Be 结合, 并且石英本身 ^{27}Al 和 ^9Be 的含量非常低, 有利于检测 ^{26}Al 和 ^{10}Be 的含量, 且石英在大自然中

分布广泛, 易于采集, 因此使用石英作为该方法的测年材料是非常有利的。 $^{26}\text{Al}/^{10}\text{Be}$ 埋藏测年法分为简单测年法和等时线埋藏法, 测定年限为 0.3—5 Ma。简单埋藏法需要假设样品在生成后仅暴露过一次地表, 随后被埋藏, 且埋藏够深。但是大多数样品不满足这样的条件。而等时线埋藏法无需这样的假设, 可规避因埋藏过浅或者多次暴露-埋藏造成对核素的影响, 计算出古土壤的埋藏年龄。 $^{26}\text{Al}/^{10}\text{Be}$ 埋藏测年法测出的是矿物埋藏之后的年龄, 并非生成至今的年龄, 因此得出的结果如何转化为生成年龄仍需讨论。

李海旭 (2013) 使用 $^{26}\text{Al}/^{10}\text{Be}$ 埋藏测年法对 74093 地点距地表 12.5 m (对应文中第十三层) 处的石英砂和砾石进行测定得出两个样品的加权平均年龄为 $0.22 \pm 0.03 \text{ Ma}$; Tu et al. (2015) 采用 $^{26}\text{Al}/^{10}\text{Be}$ 埋藏测年法, 测试了遗址 74093 剖面地表下 12.1—12.3 m (对应文中第十三层) 处的石英砂与石英砾石样品各一个, 获得该层加权平均年龄为 $240 \pm 50 \text{ ka}$ 。

$^{26}\text{Al}/^{10}\text{Be}$ 的有效测量年限为 0.3—5 Ma, 处于许家窑-侯家窑遗址可信年龄的边界处, 因此此方法对于该遗址可能有较大的误差。

3 许家窑-侯家窑遗址年代学研究存在问题与展望

3.1 许家窑-侯家窑遗址年代学研究存在问题

光释光方法中对于该遗址文化层年代测定大约为 230—150 ka, 而古地磁方法得出的文化层年代分别为 123—118 ka 和 450—380 ka, ^{14}C 测年方法分别得出上文化层年龄大约为 16 ka, 下文化层年龄大约为 44—24 ka, 铀系法测年得出上文化层年龄大约 130—83 ka, 电子自旋共振法测年得出文化层中部年龄在 376—232 ka, $^{26}\text{Al}/^{10}\text{Be}$ 埋藏测年法得出文化层中部的年龄大约为 30—20 ka。由此可见, 不同的方法测量出的遗址年龄相差甚大。

遗址年代的准确确定对于我国第四纪人类活动以及现代人起源的深入研究具有非常重要的意义, 因此后期需要系统综合该遗址的可能年代, 采用适合该遗址年代的测定方法, 确定该遗址准确的年代。

而之所以会得到不同的测年结果, 可能是由多种因素导致: 不同的测年材料、不同的测年方法、以及在这个环境中测年材料是否适用于此测年方法, 测年结果是否可靠等, 而这些问题都需在今后工作中解决。

3.2 许家窑-侯家窑遗址年代学研究展望

3.2.1 选择适合许家窑-侯家窑遗址年代学方法

年代测量方法虽然众多, 但是不同测年方法, 却有着不同的测年区间, 因此需要根据遗址的年代区间来选择适合许家窑-侯家窑遗址的测量方法, 还要根据合适测年方法来使用不同材料来进行对比分析何种材料精准度更高。各个测年方法的测年区间如图 3 所示。

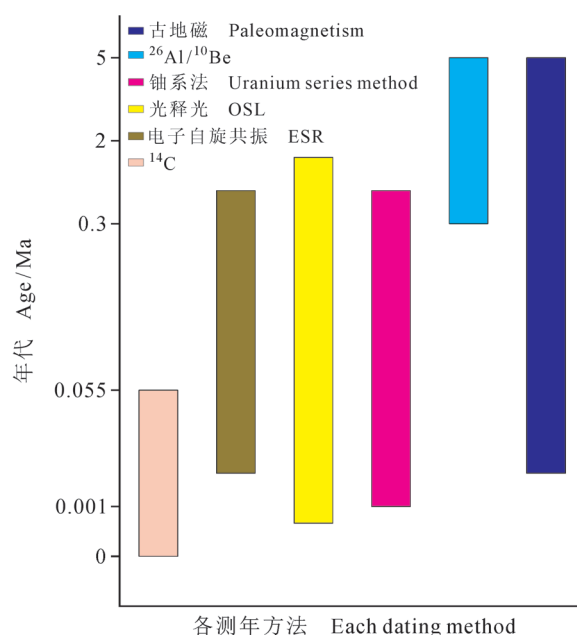


图 3 不同测年方法的测量区间图
Fig. 3 Measurement interval diagram of different dating methods

而目前研究基本确定许家窑-侯家窑遗址处于 200—100 ka BP, 因此不适合选用 ^{14}C 和 $^{26}\text{Al}/^{10}\text{Be}$, 建议使用光释光测年、古地磁测年、ESR、铀系法测年等多种方法交叉测年。

3.2.2 许家窑-侯家窑遗址区域沉积和火山活动对年代学的应用

泥河湾盆地古湖水在历史上发生多次湖退—湖侵机制和五次火山活动。可根据湖退—湖侵涉及的地点与年代, 找出文化层与湖退—湖侵活动以及火山灰之间的地层关系。借由湖退—湖侵活动以及火山活动的年代来确定遗址年代的置信区间。五次火山活动对应年代见表 6。

表 6 大同火山活跃期对应年龄 Tab. 6 Corresponding age of Datong volcano active period		
火山活跃期 A period of volcanic activity		距今年龄 Present age / Ma
第一活跃期	The first active phase	0.90
第二活跃期	The second active phase	0.51
第三活跃期	The third active phase	0.32
第四活跃期	The fourth active phase	0.19
第五活跃期	The fifth active phase	0.09

张鹏 (2019) 证实文化层层位与黄绿色沉积层上层相对应, 位于流水侵蚀面之下, 说明许家窑人生活在古湖濒临消失时期的湖岸附近, 且处

于冲洪积物堆积时期。陈硕(2017)认为遗址文化层处于火山活动第四和第五活跃期之间,置信区间为90—190 ka。

综上所述,许家窑-侯家窑遗址年代学研究目前仍存在很大争议,因此对此区域年代学研究需要结合地层沉积、火山层位等信息,选择合适测年材料及其测年方法,对区域内年代学进行耦合研究。

参考文献

- 長友恒人,下岡順直,波岡久惠,等. 2009. 泥河湾盆地几处旧石器时代文化遗址光释光测年 [J]. *人类学学报*, 28(3): 276–284. [Tsuneto Nagatomo, Yorinao Shitaoka, Hisae Namioka, et al. 2009. OSL dating of the strata at paleolithic sites in the Nihewan Basin, China [J]. *Acta Anthropologica Sinica*, 28(3): 276–284.]
- 陈硕. 2017. 基于区域火山活动历史的许家窑遗址年代研究 [D]. 上海: 上海师范大学. [Chen S. 2017. Study on the age of Xujiayao Site based on the history of regional volcanic activity [D]. Shanghai: Shanghai Normal University.]
- 陈铁梅,原思训,高世君,等. 1982. 许家窑遗址哺乳动物化石的铀子系法年代测定 [J]. *人类学学报*, 1(1): 91–95. [Chen T M, Yuan S X, Gao S J, et al. 1982. Uranium series dating of Xujiayao (Hsü-Chia-Yao) Site [J]. *Acta Anthropologica Sinica*, 1(1): 91–95.]
- 陈铁梅,原思训,王良训,等. 1984. 碳十四年代测定报告(六) [J]. *文物*, 4: 92–96. [Chen T M, Yuan S X, Wang L X, et al. 1984. Carbon dating report 6 [J]. *Cultural Relics*, 4: 92–96.]
- 陈旭. 2015. 西峰中松山反极性带的高分辨率磁性地层学研究 [D]. 北京: 中国地质大学(北京). [Chen X. 2015. Middle matuyama geomagnetic excursions from high-resolution loess-paleosol recorded in Xifeng [D]. Beijing: China University of Geosciences.]
- 高立家. 2021. 基于区域沉积记录的许家窑遗址年代学及古环境演变研究 [D]. 上海: 上海师范大学. [Gao L J. 2021. Geochronology and paleoenvironmental evolution of Xujiayao Site based on regional sedimentary records [D]. Shanghai: Shanghai Normal University.]
- 高星. 2021. 人之初——人类的起源与早期状态 [J]. *文物天地*, (8): 88–89. [Gao X. 2021. Beginning of life—the origin and early state of human beings [J]. *Cultural Relics World*, (8): 88–89.]
- 韩非,尹功明,刘春茹,等. 2011. ESR-铀系法牙齿化石测年及其在中早更新世考古遗址年代学研究中的应用 [J]. *核技术*, 34(9): 651–657. [Han F, Yin G M, Liu C R, et al. 2011. Tooth fossil dating with combined ESR/U-series methods for studying Middle-Early Pleistocene archaeological sites [J]. *Nuclear Techniques*, 34(9): 651–657.]
- 浑凌云. 2012. 冀西北间山盆地和太行山冀西山地晚更新世古气候和古环境演变 [D]. 石家庄: 河北师范大学. [Hun L Y. 2012. Late Pleistocene paleoclimatic and paleoenvironmental evolution of the basins of northwest Hebei Mountains and landform of western Hebei, Taihang Mountains [D]. Shijiazhuang: Hebei Normal University.]
- 吉云平. 2016. 泥河湾盆地第四纪古湖最终消亡过程研究 [D]. 北京: 中国地质科学院. [Ji Y P. 2016. Final disappearing process of ancient lake during quaternary in Nihewan Basin [D]. Beijing: Chinese Academy of Geological Sciences.]
- 贾兰坡,盖培,尤玉桂. 1972. 山西峙峪旧石器时代遗址发掘报告 [J]. *考古学报*, (1): 39–58, 135–136. [Jia L P, Gai P, You Y G. 1972. Excavation report of the Paleolithic Site in Zhiyu, Shanxi Province [J]. *The Chinese Journal of Archaeology*, (1): 39–58, 135–136.]
- 贾兰坡,卫奇,李超荣. 1979. 许家窑旧石器时代文化遗址1976年发掘报告 [J]. *古脊椎动物与古人类*, 17(4): 277–293, 347–350. [Jia L P, Wei Q, Li C R. 1979. Report on the excavation of Hsuchiayao Man Site in 1976 [J]. *Certebrata Palasiatica*, 17(4): 277–293, 347–350.]
- 贾兰坡,卫奇. 1976. 阳高许家窑旧石器时代文化遗址 [J]. *考古学报*, (2): 97–114, 207. [Jia L P, Wei Q. 1976. A palaeolithic site at Hsü-Chia-Yao in Yangkao County, Shanxi Province [J]. *Acta Archaeologia Sinica*, (2): 97–114, 207.]
- 康树刚,王旭龙,王松娜. 2016. 中国黄土释光测年与应用: 过去、现在与未来 [J]. *地球环境学报*, 7(5): 442–467. [Kang S G, Wang X L, Wang S N. 2016. Luminescence dating of Chinese loess and its applications: past, present and future [J]. *Journal of Earth Environment*, 7(5): 442–467.]
- 李海旭. 2013. $^{26}\text{Al}/^{10}\text{Be}$ 埋藏测年法在许家窑—侯家窑遗址的应用及Al化学分析实验改进 [D]. 南京: 南京师范大学. [Li H X. 2013. The application of $^{26}\text{Al}/^{10}\text{Be}$ burial dating method in Xujiayao—Houjiayao site and the improvement of Al chemical analysis experiment [D].

- Nanjing: Nanjing Normal University.]
- 李 蕾, 黄华芳, 王 健, 等. 2016. 泥河湾侯家窑遗址古河流及环境考古意义 [J]. *沉积学报*, 34(1): 111–119. [Li L, Huang H F, Wang J, et al. 2016. Ancient River in the Houjiayao Site, Nihewan Basin and its archaeological significance [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 34(1): 111–119.]
- 李曼玥. 2016. 侯家窑遗址地层、年代与形成环境 [D]. 石家庄: 河北师范大学. [Li M Y. 2016. The stratum, age and geographical environment of Houjiayao relic site [D]. Shijiazhuang: Hebei Normal University.]
- 李 壮. 2020. 中国考古学碳十四年代学研究——以二里头遗址为例 [D]. 西安: 西北大学. [Li Z. 2020. The study of carbon-14 chronology in Chinese archaeology—taking Erlitou Site as an example [D]. Xi'an: Northwest University.]
- 刘 扬. 2012. 泥河湾盆地更新世人类活动遗迹与石器技术演化 [J]. *第四纪研究*, 32(2): 188–198. [Liu Y. 2012. The Pleistocene paleolithic discoveries and the lithic technology development in the Nihewan Basin, North China [J]. *Quaternary Sciences*, 32(2): 188–198.]
- 卢演涛, 陈 杰, 尹功明, 等. 1996. 红外释光 (IRSL) 测年方法及其在活动构造研究中的应用 [C]// 中国地震学会第六次学术大会论文摘要集. 北京: 地震出版社: 75. [Lu Y C, Chen J, Yin G M. 1996. Infrared luminescence (IRSL) dating method and its application in the study of active structures [C]// Abstracts of the Sixth Academic Conference of China Seismological Society. Beijing: Seismological Press: 75.]
- 卢演涛. 1990. 沉积物的光释光 (OSL) 测年简介 [J]. *地质地球化学*, 18(1): 36–40. [Lu Y C. 1990. Brief introduction of OSL dating of sediments [J]. *Geology-geochemistry*, 18(1): 36–40.]
- 马子清. 2001. 山西植被 [M]. 北京: 中国科学技术出版社. [Ma Z Q. 2001. Shanxi vegetation [M]. Beijing: China Science and Technology Press.]
- 苏 朴, Lovlie Reidar, 樊行昭, 等. 2000. 许家窑泥河湾组高分辨率磁性地层学研究 [J]. *地球物理学报*, 43(2): 223–231. [Su P, Reidar L, Fan X Z, et al. 2000. A high-resolution magnetostratigraphy study on the Nihewan group at Xujiayao [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 43(2): 223–231.]
- 王法岗, 李 锋. 2020. “许家窑人”埋藏地层与时代探讨 [J]. *人类学学报*, 39(2): 161–172. [Wang F G, Li F. 2020. Discussions on stratigraphy and age of the Xujiayao hominin [J]. *Acta Anthropologica Sinica*, 39(2): 161–172.]
- 王法岗. 2015. 侯家窑遗址 2007—2012 发掘地层的新认识 [J]. *文物春秋*, (6): 15–22. [Wang F G. 2015. New understanding of strata excavated in Houjiayao Site from 2007 to 2012 [J]. *Cultural relics spring and autumn*, (6): 15–22.]
- 王法岗. 2016. 侯家窑遗址综合研究 [D]. 石家庄: 河北师范大学. [Wang F G. 2016. Synthetic study of the Houjiayao Site [D]. Shijiazhuang: Hebei Normal University.]
- 卫 奇. 2012. 许家窑 - 侯家窑遗址争议概观 [C]// 第十三届中国古脊椎动物学学术年会论文集. 北京: 海洋出版社: 281–288. [Wei Q. 2012. Overview of the dispute over Xujiayao-Houjiayao Site [C]// Proceedings of the 13th annual meeting of Chinese Society of Vertebrate Paleontology. Beijing: Chinese Ocean Press: 281–288.]
- 吴茂霖. 1980. 许家窑遗址 1977 年出土的人类化石 [J]. *古脊椎动物与古人类*, 18(3): 229–238, 270–271. [Wu M L. 1980. Human fossils discovered at Xujiayao Site in 1977 [J]. *Vertebrata Palasiatica*, 18(3): 229–238, 270–271.]
- 吴茂霖. 1983. 许家窑人生活在什么时代 [J]. *化石*, (3): 18–19. [Wu M L. 1983. In what era did Xujiayao people live? [J]. *Fossils*, (3): 18–19.]
- 吴茂霖. 1986. 许家窑人颞骨研究 [J]. *人类学学报*, 5(3): 220–226, 306. [Wu M L. 1986. Study of temporal bone of Xujiayao man [J]. *Acta Anthropologica Sinica*, 5(3): 220–226, 306.]
- 夏 鼐. 1955. 放射性同位素在考古学上的应用——放射性炭素或炭 14 的测定年代法 [J]. *考古通讯*, (4): 73–78. [Xia N. 1955. Application of radioisotope in archaeology—dating method of radiocarbon or carbon 14 [J]. *Archaeology*, (4): 73–78.]
- 谢 飞. 2018. 泥河湾旧石器时代考古的回顾与展望 [J]. *河北师范大学学报 (哲学社会科学版)*, 41(3): 5–11. [Xie F. 2018. An archaeological study of the Nihewan at the Old Stone Age [J]. *Journal of Hebei Normal University (Philosophy and Social Sciences Edition)*, 41(3): 5–11.]
- 严富华, 叶永英, 麦学舜, 等. 1979. 据花粉分析论许家窑遗址的时代和古环境 [J]. *地震地质*, 1(4): 72–78, 102. [Yan F H, Ye Y Y, Mai X S, et al. 1979. On the environment and geological age of Xujiayao Site from pollen analysis data [J].

- Seismology and Geology*, 1(4): 72–78, 102.]
- 尤玉柱, 徐钦琦. 1981. 中国北方晚更新世哺乳动物群与深海沉积物的对比 [J]. *古脊椎动物与古人类*, 19(1): 77–86. [You Y Z, Xu Q Q. 1981. The Late Pleistocene mammalian faunas of northern China and correlation with deep-sea sediments [J]. *Vertebrata Palasiatica*, 19(1): 77–86.]
- 张克旗, 吴中海, 吕同艳, 等. 2015. 光释光测年法——综述及进展 [J]. *地质通报*, 34(1): 183–203. [Zhang K Q, Wu Z H, Lü T Y, et al. 2015. Review and progress of OSL dating [J]. *Geological Bulletin of China*, 34(1): 183–203.]
- 张鹏. 2019. 许家窑遗址区域沉积演变研究 [D]. 上海: 上海师范大学. [Zhang P. 2019. Sedimentary evolution of the Xujiayao Site [D]. Shanghai: Shanghai Normal University.]
- 中国社会科学院考古研究所. 1992. 中国考古学中碳十四年代数据集 (1965—1991) [M]. 文物出版社: 1–487. [The Institute of Archaeology, Chinese Academy of Social Sciences. 1992. Carbon fourteenth age data set in Chinese archaeology (1965—1991) [M]. Cultural Relics Publishing House: 1–487.]
- 朱岗崑. 2005. 古地磁学: 基础、原理、方法、成果与应用 [M]. 北京: 科学出版社. [Zhu G K. 2005. Paleomagnetism: foundation, principles, methods, achievements and applications [M]. Beijing: Science Press.]
- Ao H, Liu C R, Roberts A P, et al. 2017. An updated age for the Xujiayao hominin from the Nihewan Basin, north China: implications for Middle Pleistocene human evolution in East Asia [J]. *Journal of Human Evolution*, 106: 54–65.
- Arnold J R, Libby W F. 1949. Age determinations by radiocarbon content; checks with samples of known age [J]. *Science*, 110(2869): 678–680.
- Arnold J R, Libby W F. 1951. Radiocarbon dates [J]. *Science*, 113(2927): 111–120.
- Cann R L, Stoneking M, Wilson A C. 1987. Mitochondrial DNA and human evolution [J]. *Nature*, 325(6099): 31–36.
- Grün R. 1989. Electron spin resonance (ESR) dating [J]. *Quaternary International*, 1: 65–109.
- Hawks J. 2001. The Y chromosome and the replacement hypothesis [J]. *Science*, 293(5530): 567. DOI: 10.1126/science.293.5530.567a.
- Huntley D J, Godfrey-Smith D I, Thewalt M L W. 1985. Optical dating of sediments [J]. *Nature*, 313(5998): 105–107.
- Ivanovich M, Harmon R S. 1992. Uranium-series disequilibrium: applications to earth, marine, and environmental sciences (2nd edition) [M]. Oxford: Clarendon Press.
- Lal D, Arnold J R. 1985. Tracing quartz through the environment [J]. *Proceedings of the Indian Academy of Sciences-Earth and Planetary Sciences*, 94(1): 1–5.
- Liu C, Su P, Jin Z X. 1992. Discovery of blake episode in the Xujiayao Paleolithic Site [J]. *Scientia Geologica Sinica*, 1(1): 87–95.
- Marin L C, Forman S L, Todd V T, et al. 2021. Isolation of quartz grains for optically stimulated luminescence (OSL) dating of quaternary sediments for paleoenvironmental research [J]. *Journal of Visualized Experiments: JoVE*, (174): e62706. DOI: 10.3791/62706.
- Soliyev T I, Muzafarov A M. 2021. Investigation of the causes of violations of the radioactive balance between radionuclides of the uranium decay chain [J]. *International Journal of Multicultural and Multireligious Understanding*, 8(7): 95. DOI: 10.18415/ijmmu.v8i7.2882.
- Tu H, Shen G J, Li H X, et al. 2015. $^{26}\text{Al}/^{10}\text{Be}$ burial dating of Xujiayao-Houjiayao Site in Nihewan Basin, Northern China [J]. *PLoS One*, 10(2): e0118315. DOI: 10.1371/journal.pone.0118315.