

胡圆峰, 周斌, 庞洋, 等. 古人类用火研究及其进展[J]. 第四纪研究, 2019, 39(1): 240–257.

Hu Yuanfeng, Zhou Bin, Pang Yang, et al. A review of study methods and progress on hominid use of fire[J]. Quaternary Sciences, 2019, 39(1): 240–257.

doi:10.11928/j.issn.1001-7410.2019.01.22

文章编号: 1001-7410(2019)01-240-18

古人类用火研究及其进展^{*}

胡圆峰, 周斌, 庞洋, 徐向春

(表生地球化学教育部重点实验室, 南京大学地球科学与工程学院, 江苏南京 210023)

摘要: 火的使用在人类进化过程中发挥了非常重要的作用。学术界对于人类使用火的历史与过程做了大量的研究, 检验古人类遗址区域是否发生过燃烧事件的技术手段也在不断地进步。通过对南非开普敦 Wonderwerk 洞穴、以色列 Qesem 洞穴、北京周口店猿人洞以及湖北黄龙洞等地古人类用火相关文献的系统调研和归纳总结, 认为探讨一个遗址是否存在古人类主动用火时, 首先要获取该遗址的文化考古和地层资料, 确定是否曾发生过燃烧事件, 然后分析是何物质发生燃烧, 以及与人类活动的联系。分析表明, 目前还没有任何单一的方法可以确定更新世早期的古人类用火信息, 多种方法的结合才可能得到比较准确的结论。选择宏观形态分析初步判断有火活动的区域, 利用傅立叶红外光谱(FTIR)、元素碳含量分析等地球化学手段确定火事件发生的证据, 再利用微观形态及微地层分析对完整沉积物进行系统研究以揭示其就地用火的可能性, 从而形成古人类用火的完整证据链。由于碳稳定同位素在植被、气候与人类活动相互联系方面的广泛应用, 在古人类用火研究引入这一技术手段, 可为该领域提供新的研究方法和思路。

关键词: 古人类用火; 旧石器时代; 地球化学证据; 炭屑; 元素碳/黑碳; 碳同位素

中图分类号: K854, K871.13

文献标识码: A

0 前言

火是一种发光发热的化学反应, 是能量剧烈释放的一种方式。自然火的发生需要有可燃物、氧气、点火源(亦称温度达到着火点)这3个条件。人类使用火最初是无意识的, 火山爆发、雷电轰击、草木自燃等火事件使古人类认识到了火的威力与作用, 捡拾动物熟肉也开启了人类饮食习惯重大变革的新篇章。之后, 我们聪明的祖先开始保留火种, 钻木取火, 火石生火; 利用火制造工具, 烹饪佳肴, 照亮黑暗和保暖驱寒才使得人类在进化中逐渐形成优势^[1~7]。由此可见, 火在人类演化上的重要性不言而喻, 控制性用火对于古人类的生存和发展发挥重要作用^[8~10]。但学术界对人类最早是何时开始用火, 以及人类用火的动机和规律一直存在争论^[11]。James 等^[12]认为距今不超过 25 万年的尼安德特人出现后, 人类才掌握用火的技能, 而早于更新

世如早于 100 万年的古人类用火证据都是间接的, 不能排除是自然火造成的结果, 甚至提出早于 15 万年的古人类用火证据都具有不确定性; 而近年来也有一些学者认为, 早在距今 150 万年左右的旧石器时代, 人类就开始控制性用火^[9~10]。由此可见, 古人类何时开始用火还没有一个定论, 因此, 怎样获得确凿的证据去证实遗址区域火事件的发生与人类直接相关是十分必要的。

古人类用火的研究包括获取燃烧的证据, 以及对古人类控制性用火行为的确认^[13~15]。以往对古人类用火的一些研究重点在获取燃烧证据, 如建立各种方法检验遗存物是否经过燃烧^[16~18]; 还有一些研究则侧重论证或寻找人类控制性用火的证据, 如通过遗址人类活动的各种证据、地层、化石埋藏等方面的研究与分析来论证遗址区发现的燃烧事件是否为人类控制性用火导致^[19~24]; 近期的研究对上述两方面内容均较重视且通常同时开展工作^[13, 25~26]。然而, 由

2018-09-29 收稿, 2018-11-18 收修改稿

* 国家重大科学研究计划全球变化研究项目(批准号: 2015CB953804)、青岛海洋科学与技术国家实验室开放基金资助项目(批准号: MGQNL-MKF201704)、江苏省基础研究计划自然科学基金面上项目(批准号: BK20171340 和 BK20150065)共同资助

第一作者简介: 胡圆峰, 女, 25岁, 硕士研究生, 地球化学专业, E-mail: mg1729049@mail.nju.edu.cn

通讯作者: 周斌, E-mail: zhoubinok@163.com

于遗址信息保存不全、检验方法有限等因素的制约, 学术界对古人类遗址区域发现的各类可疑燃烧及古人类控制性用火证据的认定上一直存在争议, 近年一些更为精确、可靠的技术方法被开发利用, 为全面系统研究古人类用火问题提供支持^[13]。本论文试图重点对晚更新世早期以前的古人类用火证据及研究方法进行综述, 选择世界范围内一些典型的被认为存在过用火的遗址作为研究实例, 对旧石器时代古人类用火研究及其进展进行论述。

1 世界范围内旧石器早中期古人类用火研究

在旧石器早期, 一些古人类用火证据主要出现在非洲和东亚地区。东非肯尼亚 Koobi Fora 和 Chesowanja 地区有疑似燃烧过的地层, 在埃塞俄比亚 Gadeb 地区发现疑似烧石, 以及南非 Swartkrans 南方

古猿化石地点的洞穴中也发现了疑似烧骨等^[27~28]。但是, 学术界对这些在非洲发现的早于 100 万年前的人类用火证据持怀疑态度^[9~10]。最近, 研究学者通过对南非北部开普敦的 Wonderwerk 洞穴进行了完整微观地层形态学分析和 FTIR 红外光谱分析, 结果证实该地确有与直立人相关的原位燃烧的火活动, 至此, 具有古人类主动用火的可信证据被推至直立人时代, 约 100 万年前^[26,29]。有关学者对以色列北部距今 79 万年前的 Gesher Benot Ya'aqvo 阿舍利石器地点发现的可疑人类用火证据, 包括似经过燃烧的种子、木头、燧石石器等进行的分析显示, 这些样品经历过高温燃烧; 此外, 燃烧过的燧石呈聚集状散落分布在遗址各处, 表明可能是火灶的遗迹^[30~32]。但该地点的研究结果并不能完全排除野火的可能, 发生的火事件尚不能与人类建立确定的联系。图 1 展示世界范围内旧石器时代部分疑似古人类用火地点的分布。

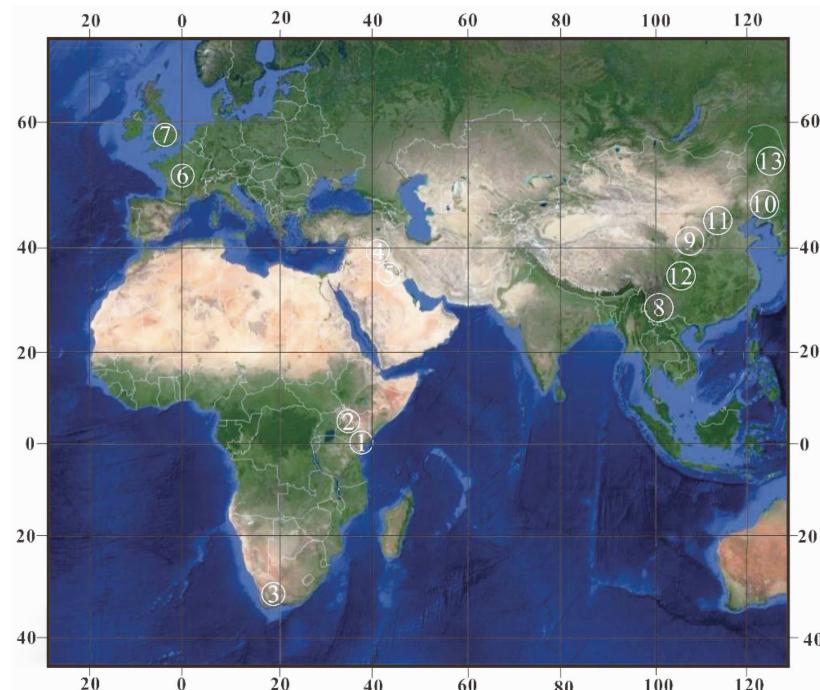


图 1 世界范围内旧石器时代疑似古人类用火地点分布图

①肯尼亚 Koobi Fora 地区, 距今约 160 万年^[27,33]; ②肯尼亚 Chesowanja 地区, 距今 149~135 万年^[27,33]; ③南非开普敦 Wonderwerk 洞, 距今约 100 万年^[26]; ④以色列 Qesem 洞, 距今约 40 万年^[34]; ⑤以色列 Jardon 山谷 GBY 地区, 距今约 80~70 万年^[30]; ⑥法国 L'Escale 地区发现有距今约 70 万年的疑似火炉^[35]; ⑦Beeches Pit 遗址位于英国, 距今 40 万年^[36]; ⑧云南元谋, 旧石器时代早期^[37]; ⑨山西芮城, 蓝田西侯度遗址, 旧石器时代早期^[38~39]; ⑩辽宁金牛山遗址, 距今约 23 万年^[40]; ⑪北京周口店距今约 77 万年^[17~18,41~43]; ⑫湖北郧西黄龙洞, 距今约 10 万年^[13,44~45]

Fig. 1 Distribution of areas where ancient human may use fire in the Paleolithic age all over the world. ① Koobi Fora, Kenya, 1.60 Ma^[27,33]; ② Chesowanja, Kenya, 1.49 ~ 1.35 Ma^[27,33]; ③ Wonderwerk cave, Northern Cape Province, South Africa, about 1 Ma^[26]; ④ The Qesem caves in Israel, about 400 ka^[34]; ⑤ Gesher Benot Ya'aqov (GBY) on the banks of the Jordan River, Israel, about 700~800 ka^[30]; ⑥ Roc de Marsal in the Dordogne region of France, found the hearths at about 700 ka^[35]; ⑦ Beeches Pit, England, about 400 ka^[36]; ⑧ Yuanmou in Yunnan Province, in the Old Stone Age^[37]; ⑨ Xihoudi site, Lantian in Shanxi Province, the early Paleolithic Age^[38~39]; ⑩ Jinniu Mountain in Liaoning Province, 230 ka^[40]; ⑪ Zhoukoudian in China, 770 ka^[17~18,41~43]; ⑫ Huanglong cave, Hubei Province, 100 ka^[13,44~45]

在中国地区,旧石器时代考古目前已经发现了70余处古人类化石地点以及1000多处旧石器时代文化遗址^[14,46]。发现有人类用火或疑似人工用火遗迹的地点,初步统计约有48处,其中晚更新世之前的有37处,包括距今约180万年的早更新世时期的山西西侯度遗址^[37~38]、元谋人遗址^[37]和蓝田人遗址^[39,47]等,及中更新世时期的周口店遗址^[17~18,41~43]和金牛山遗址^[40]。表1统计了旧石器时代晚更新世早期以前用火及疑似用火地点。在早期的遗址地层中,发现的古人类用火证据都比较零散,如颜色深的地层、可疑的烧骨、零星的炭屑灰

烬等,由于没有确实可信的实验室检测,未能得到学术界的广泛承认。在周口店遗址,尽管洞穴中保存有灰烬层、烧土、烧石、动物骨骼及木炭等与火直接相关的遗存^[37],但也遭受过一些学者^[42,48~50]从不同角度对北京人用火遗迹的质疑。近年来,在对周口店地区更深入的研究取得了重要进展,综合用火遗迹、遗存的分布、原始发掘的描述,揭示出该地点第4层存在烧骨、石灰化的灰岩块、结构较完整的火塘等原地用火产生的遗存与遗迹^[51]。各种新的研究手段的应用也获得了正面证据,这些都进一步证实了周口店地区用火证据的准确可靠性。例

表1 晚更新世早期以前古人类用火及疑似用火统计

Table 1 The summary of researches on confirmed or unconfirmed evidence for human use of fire before the early Late Pleistocene

时代	年代	遗址地点	经纬度	发现	研究技术手段	参考文献
早更新世	180万年	西侯度遗址	34°71'N, 110°68'E	烧骨	宏观原地证据	[37~38]
	150万年	公王岭遗址	43°5'N, 124°82'E	炭屑	微观形态分析	[39,47]
	149~135万年	肯尼亚 Koobi Fora 与 Chesowanja	1°41'S, 38°78'E	烧骨	宏观原地证据	[27,33]
	100万年	Wonderwerk	37°89'S, 1°52'W	烧骨、烧石	宏观原地证据、微观形态分析、FTIR 红外光谱分析	[26]
	79万年	GBY 地区	38°74'N, 42°64'E	烧骨	宏观原地证据	[30]
中更新世	中更新世早期	周口店第1地点	39°41'N, 115°41'E	灰烬层、木炭、烧骨、烧石	宏观原地证据、碳含量分析、碳元素分析	[17~18, 41~43]
	76万年	白龙洞遗址	30°71'N, 103°95'E	灰烬、烧骨	宏观原地证据	[52~53]
	70万年	法国 L'Escale	45°72'N, 1°02'W	火炉	宏观原地证据	[35]
	中更新世早期	匼河遗址	34°71'N, 110°68'E	烧骨	宏观原地证据	[54]
	69万年	周口店13地点	39°41'N, 115°41'E	灰烬层	微观形态分析	[41]
	50万年	锡水洞	34°05'N, 109°25'E	灰烬层、木炭屑、烧骨、烧石、烧土	宏观原地证据和微观形态分析	[55]
	40万年	庙后山遗址	41°14'49"N, 124°07'50"E,	薄层灰烬、零星炭屑及烧骨	宏观原地证据和微观形态分析	[56]
	40万年	Qesem 洞穴	32°05'N, 34°77'E	火炉、烧骨	宏观原地证据、微观形态分析、FTIR	[34]
	40万年	Beeches Pit 遗址	57°05'N, 2°3'W	火炉、烧骨	宏观原地证据	[36]
	28万年左右	金牛山遗址A地点	40°34'40"N, 122°26'30"E	两处灰烬层、烧石、烧骨	宏观原地证据、碳含量分析	[40]
中更新世晚期	18万年	岩灰洞	28°16'N, 106°08'E	烧骨	宏观原地证据、碳含量分析	[57]
	龙牙洞遗址	34°08'N, 110°13'E	灰烬层、烧石、烧骨	宏观原地证据	[58]	
	15万年	周口店第4地点	39°41'N, 115°41'E	灰烬层、烧骨	宏观原地证据和微观形态分析	[41]
	10万年	黄龙洞遗址	34°40'N, 111°47'E	灰烬堆、烧骨	宏观原地证据、微观形态分析、碳元素分析、地层高温检验	[13, 44~45]
晚更新世	晚更新世早期	伴峡小洞	30°42'N, 111°17'E	烧土面、灰烬层、烧骨	宏观原地证据和微观形态分析	[59]
	8万年左右	周口店15地点	39°41'N, 115°41'E	灰烬层、烧土、烧骨	宏观原地证据和微观形态分析	[41]
	晚更新世早期	伴峡榨洞	30°42'N, 111°17'E	灰烬、炭屑、烧骨	宏观原地证据和微观形态分析	[59]
	晚更新世早期	鲢鲤鱼山遗址	30°42'N, 111°17'E	灰烬、烧土、烧骨	宏观原地证据和微观形态分析	[59]
	8万年左右	鸽子洞遗址	41°15'N, 124°50'E	灰堆、炭屑、烧骨、烧土	宏观原地证据和微观形态分析	[60]

如, 周口店地区的地层元素碳含量测量显示发掘获取的烧土样品的元素碳浓度较大气沉降天然火元素碳浓度高出数倍^[17]; 磁化率和红度分析结果表明, 被疑为用火部位沉积物的相关参数显著异常^[18]; 植硅体提取与燃烧实验分析发现很多富含植硅体的颗粒团和二氧化硅、元素钾等成分^[43]。

2 古人类用火研究技术手段

早在 2000 年, Weiner 等^[42]提出了一个评判用火证据的层级标准(表 2), 但该标准仅侧重于宏观形态研究, 因此具有一定的局限性。目前, 随着古人类用火研究逐渐受到关注, 越来越多的方法如微观形态、物理学方法、地球化学方法均有所应用。然而, 关于研究古人类用火的手段没有特别统一的标准, 哪一种方法的准确度最高, 哪一种普遍适用于遗址古人类用火研究等问题也没有很好的解决。我们对目前较常用的方法进行逐一分析对比以期获得更确切的认识。

2.1 宏观分析原地证据

宏观分析原地证据主要包括在遗址发现有烧石、烧骨和火塘。烧石是指经过燃烧的石头, 烧骨是指燃烧过后的骨头, 火塘是指一切被人类有目的

表 2 评判原地用火的标准与可信度^[42]

Table 2 The standard and credibility for the judgments of *in situ* fire^[42]

物证与关联性	可信度
经过构建的火塘(比如凹坑, 围石结构), 最好与烧骨、烧石等共生。	明确无误、意图明确的人类用火证据
清楚的关联性, 例如, 在不会生长树木的洞穴出现原地理藏的木头灰烬。	人类用火证据
不确定的关联性, 例如, 在一个地层单元或层位出现烧骨与石制品共生的现象。	人类用火的指向性证据
被烧过的材料散布在沉积物中, 缺乏与人类遗物直接的共生关系。	遗址存在烧火的证据, 但无法证明人类有意识的用火

地使用、维护并存在燃烧过程的可控制的火堆^[15]。

在很多古人类用火遗址中都会有这些宏观原地证据, 如 Koobi Fora 和 Chesowanja 地区、Gadeb 地区、GBY 地区、Wonderwerk 洞穴等遗址都发现有疑似燃烧过的地层、烧石和烧骨^[26~27,30,33]。在北京周口店遗址第 4 层发掘多件内外皆呈黑或灰褐色、明确被烧过的动物骨骼^[61](图 2)。周口店的烧骨与石制品、火塘等文化遗存出现在同一层面上相距很近的位置, 具有清晰的共生关系^[61]。

在中国地区, 晚更新世早期之前包含火塘遗存的遗址分布如图 3 所示, 其中有 9 处中更新世遗址, 而周口店第 1 地点是目前发现中国地区最早的

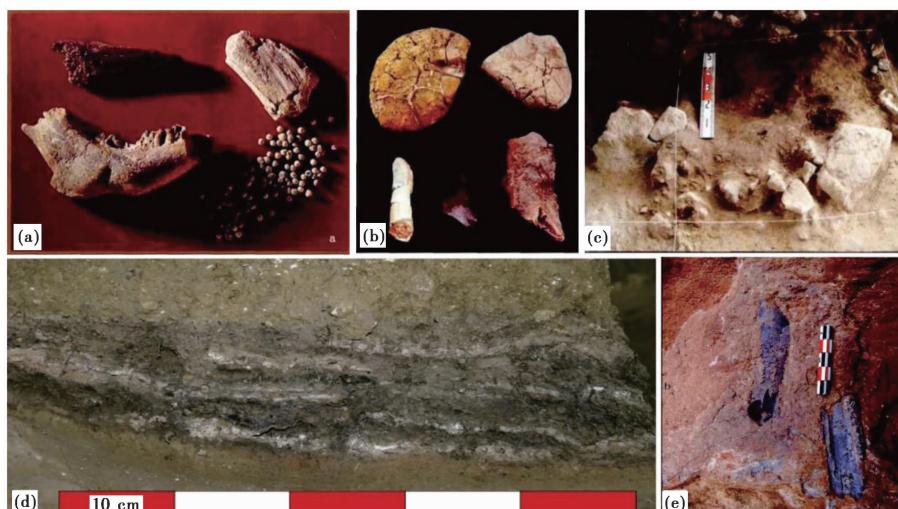


图 2 烧骨、烧石与火炉火塘

(a) 早期发现的周口店第一地点 4~5 层烧骨与炭化的朴树籽; (b) 周口店遗址第 4 层烧石; (c) 周口店第一地点第 4 层火炉,

是集中用火部位, 有残存围石圈筑结构; (d) 法国 Roc de Marsal 序列底部的 9 层炉膛剖面图; (e) 周口店第 4 层烧石

(a)、(b)、(c) 及 (e) 修改自高星等^[61]; (d) 修改自 Goldberg 等^[62]

Fig. 2 Burned bones, burned stones and hearth. (a) Burned bones and tree seeds collected in early stage of scientific investigation at Zhoukoudian Locality 1 from Layer 4 to 5; (b) Burned stones from Layer 4 at Zhoukoudian; (c) Hearth and boned bones and limestone rocks unearthed recently from Layer 4; (d) Section view of series of stacked hearths in Layer 9 at the base of the sequence at Roc de Marsal; (e) Burned stones from Layer 4 at Zhoukoudian. Pictures of (a), (b), (c) and (e) are revised from Gao et al.^[61], and picture of (d) is revised from Goldberg et al.^[62]

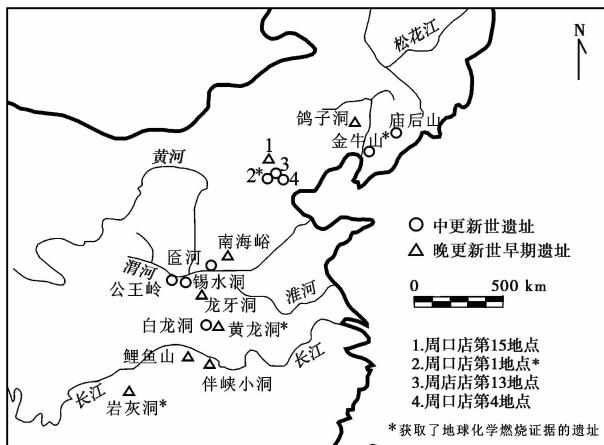


图3 中国区域晚更新世早期以前古人类用火遗存的遗址分布图(修改自周振宇等^[15])

Fig. 3 Distribution of the evidence for human fire in China before the early Late Pleistocene, revised from Zhou et al.^[15]

火塘^[15]。北京周口店遗址第4层发掘揭露出3处集中用火的部位或火塘,遗迹内的沉积物呈现异常的红色,其间夹杂着灰黑色疑似灰烬的物质;有一处残存围石圈筑结构(图2c)^[61]。旧石器时代火塘由于距今年代久远,保存状况差,埋藏过程中很多信息就会遗失。与此同时,国内外学者对旧石器火塘的研究大多只是停留在简单的描述或对其进行测年,少数学者会进行细致深入的研究,如利用火塘中植物残留重建古环境等^[13,42],在人类生存方式、人地关系等重要科学问题上作较深入地探讨的却很少^[15]。

2.2 微观形态分析

微观形态分析是使用光学显微镜及扫描电子显微镜对疑似燃烧证据的样品进行观察分析,确定沉积物形态特征,或者试图寻找植物遗存,观察其解剖结构,判定是否含有植物纤维成分。对沉积序列进行完整的微观形态观察,除了可以对疑似燃烧样品进行鉴别外,对该地区的沉积环境也会有更好的解读,如判断是否为就地沉积^[63~68]。开普敦的Wonderwerk洞穴,以色列Qesem洞以及黄龙洞都进行过微观形态学研究^[13,26,34,69~70]。

在研究Wonderwerk洞遗址时^[26,71],使用沉积相微形态和微地层微观形态分析的方法对该洞北部的1号挖掘坑进行研究(图4),结果表明该坑的岩性序列是以一种原始的无菌地下水沉积开始的。图4A为Wonderwerk洞穴北部1号挖掘坑的东壁考古地层12~9层位照片,考古层第12层是低能量的水沉积砂和细

砾组成,可能是源自片流沉积(图4B)。从第12地层的顶部,沉积过程涉及到风成物质的堆积,形成了一种由粉质粘土组成的圆形聚集体(图4D),以及细砂(图4E)。白云岩或者流纹岩连续成岩作用形成的灰白色磷化层(图4C),最初被错误地解释为燃烧特征的残骸。该坑的第10地层是由cm尺度的微地层单元(即微相)组成的一个复杂岩性序列(图4A)。微观形态学分析表明,基底微相1与微相2之间的接触面显示出大量微小的骨碎片。第10地层序列包含大量的就地沉积沉积物,如草木灰以及燃烧过的小骨头碎片等,记录了发生燃烧的证据。此外,骨头碎片的棱角和草木灰特殊的保存状态表明这两种成分都不是通过风和水远距离搬运进入洞穴,而是原地堆积和燃烧。

以色列Qesem洞也进行过微观形态分析^[34,69~70],结果显示在灰色沉积物中有石灰石碎片和烧焦的骨骼(图5)。灰化植物组织的水平定向细长假晶结构,烧焦的木材组织具有亚平行黑色线条(图5c),均表明发生原位火。该地区动力作用较小,沉积后没有明显的其他因素扰动。该遗址地层整体微观结构紧凑,表明原位而不是异地搬运而来沉积物,这也为该地区古人类用火的使用提供了证据。

周口店第一地点也做过微观形态分析(图6),其中第10层考古层的显微照片,如图6b所示,上部存在大量浅色至深棕色细粒沉积物,局部有小的石灰石碎片;下部显示细粒成层的黑色有机物质(淤泥);中间亮的橙色部分是磷酸盐,可能是碳酸化的磷灰石。但是因为该论文作者调查时没有发现炭屑,从而认为周口店用火存在一定疑问^[42]。

炭屑提取观察实验也是微观调查的一种方式,炭屑是植物组织不完全燃烧(或高温分解)所产生的黑色含碳化合物,其形成的温度在280~500℃之间^[72]。炭屑作为火与植被作用的直接产物,是重建古森林火历史与古植被的首要证据^[73]。且沉积物中的炭屑是火的替代指标,通过炭屑的定量统计和形态分析等,可以恢复地质历史时期火发生的频率、强度及其变化^[72,74~76]。在遗址与古人类活动研究上,一般认为文化层对应人类活动增加,用火增多,含量增加^[77~80]。此外,也可以利用炭屑的形态判断发生燃烧的物质种类,以此来推断古人类的生活习惯等^[73,75]。

在黄龙洞遗址,刘武等^[13]从发现人类化石的相同层位采集了一些黑色物质,并使用电子显微镜进行观察,结果清楚地表明黑色物质是植物燃烧后留下的炭屑,这为黄龙洞有火事件发生提供了有力

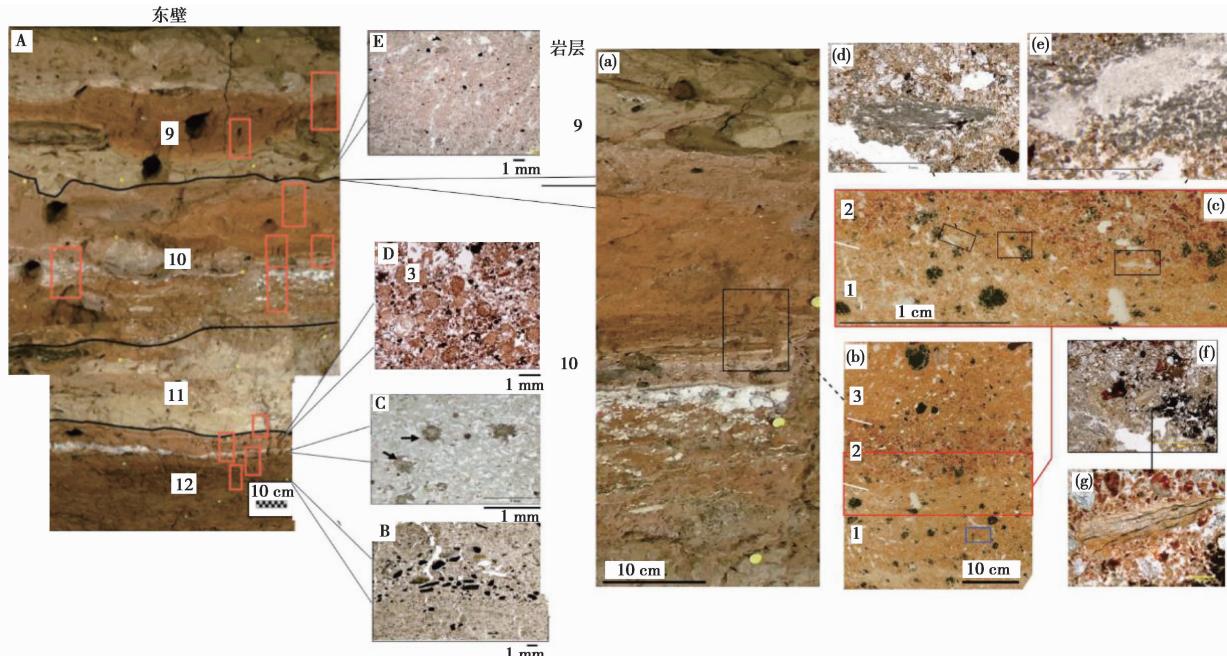


图 4 Wonderwerk 洞穴北部 1 号挖掘坑的东壁考古地层 12~9 层位之间的照片及放大后显微照片(引用自 Berna 和 Chazan^[26])
(A) Wonderwerk 洞穴北部 1 号挖掘坑的东壁考古地层 12~9 层位照片, 红色方框显示进行微观地层分析的完整采样块的位置(比例尺: 10 cm); (B) 第 12 层低能量、含水泥砂、砂粒和 0.5 cm 厚砾石(比例尺: 1 mm); (C) 接近第 12 层顶部的白层, 由成岩的白云岩、流纹岩的沉积微相组成, 有磷铝镁钙石的结节; (D) 红棕色、风成粉质粘土的显微图; (E) 在 11、10、9 号地层风积, 粉质粘土与 mm 级的骨头碎片混合组成的棕褐色成岩单元的代表性显微照片(比例尺: 1 mm)

(a) 显示了地层 10 的细节景观, 其中黑色方框显示出取薄片的大约位置; (b) 显示 3 个微地层单元(微相): 1. 底部砂质粉土和粘土混合草木灰、分散的木灰和骨头碎片; 2. 粘土集合体; 3. 砂质粉土的圆形集合体, 大的红色矩形显示微相 1 和 2 边界的位置; 另外的小蓝框显示木灰片分散在粉砂质泥沙的位置; (c) 薄片中微相 1 和 2 的接触面的放大图, 显示出侵蚀特征和连续稳定的表面, 有草木灰和骨头碎片; (d) 草木灰碎片显微图(比例尺: 1 mm); (e) 在微相 1 和 2 之间的接触处, 钙质木灰块与典型的灰分的显微图(比例尺: 500 μm); (f) 微相之间的接触面显微照片, 展示粘土集块和在微相 1 表面上的骨头碎片(比例尺: 1 mm); (g) 骨碎块显微图(比例尺: 100 μm)

Fig. 4 Photograph and micrograph of the east section in excavation 1 with boundaries between archaeological strata 12~9, Fig.4 is revised from Berna and Chazan^[26]. (A) Photograph of the east section in excavation 1 with boundaries between archaeological strata 12~9, and the red boxes indicate location of intact block sampled for microstratigraphic analysis(scale bar:10 cm); (B) The low-energy, water-bedded silt, sand, and 0.5-cm-thick gravel (lag) from stratum 12 (scale bar:1 mm); (C) Micrograph of microfacies from white layer close to top of stratum 12 composed of diagenetically altered dolostone and flowstone, with nodules of montgomeryite (arrows); (D) Micrograph of reddish-brown, wind-blown silty clay; (E) Representative micrograph of wind-blown, fine sand mixed with millimeter-sized bone fragments from tan lithological units in strata 11, 10, and 9 (scale bar:1 mm); (a) Photograph shows a detailed view of stratum 10, with black box indicating approximate location of thin section; (b) Exhibiting three microstratigraphic units(microfacies): 1. bottom sandy silt and clay mixed with ashed plant material, dispersed wood ash, and bone fragments; 2. clay aggregates and fragments; 3. rounded aggregates of sandy silt. Large red rectangular box indicates the location of boundary between microfacies 1 and 2. Small blue box indicates subsurface location with wood ash pieces dispersed in silty sediment; (c) An enlarged photo of contact area between microfacies 1 and 2 in thin section shows characteristic of erosion and successive stabilized surface with ashed plant material and bone fragments; (d) Micrograph of fragments of ashed plant material(PPL) (scale bars:1 mm); (e) Micrographs of lump of calcitic wood ash with typical ash rhombs(oxalate pseudomorphs) and prisms at the contact between microfacies 1 and 2 (PPL) (scale bar:500 μm); (f) Micrograph of contact area showing clay aggregates and organometallic area and bone fragments resting on the surface of microfacies 1 (scale bar:1 mm); (g) Micrograph of bone fragment (scale bar:100 μm)

佐证。根据炭屑形态特征可推断燃烧植物属于被子植物阔叶林(图 7),但由于炭屑易碎,切出横切面和径切面用来揭示植物细胞的排列方式会很困难,判断物种则需要进一步的研究^[13]。

2.3 红外光谱技术

傅立叶变换红外光谱(Fourier Transform infrared spectroscopy, 简称 FTIR)是一种快速可靠敏感的波

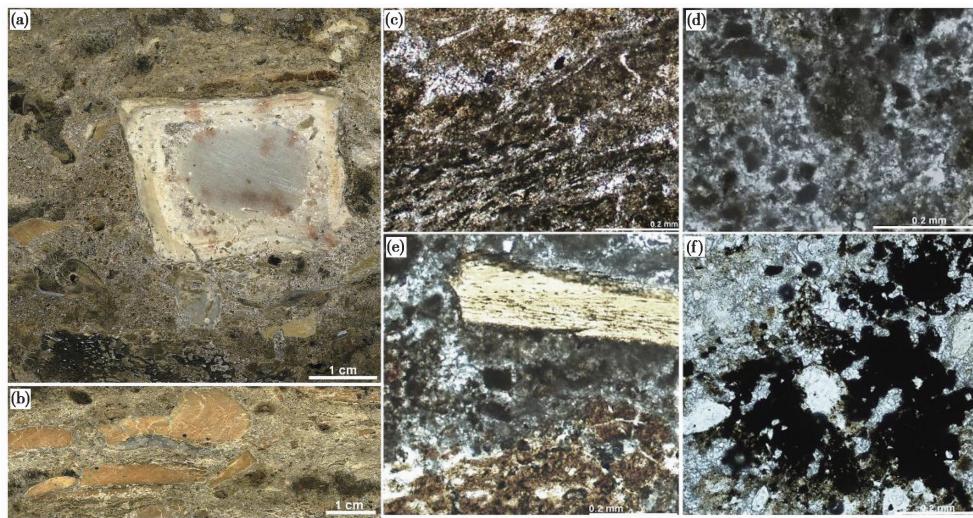


图 5 Qesem 洞穴微观燃烧证据的扫描图片(修改自 Shahack-Gross 等^[69])

(a) 埋藏在特征灰色沉积物中的烧焦的骨骼和石灰石碎片；(b) 特征白色层内烧骨的微观特征；(c) 显微照片显示原位烧焦的木材组织，其具有明显的亚平行黑色弦线；(d) 显微照片显示粗糙的泥晶方解石和数个分布在次级方解石中的灰分假晶；(e) 嵌入在再沉积木灰中的烧骨显微照片；(f) 显示与次生粒状方解石有关的氧化锰树枝状晶体的显微照片。所有的显微照片都是平面偏振光下拍摄

Fig. 5 Scan of a micromorphology block of the evidence for burning, which are revised from Shahack-Gross et al.^[69] (a) Burnt bones and a limestone fragment embedded in the feature's gray sediments; (b) Microstratified bones within the feature; (c) Microphotograph showing sub-parallel black strings evident for in situ charred wood tissue; (d) Microphotograph showing dirty micritic calcite with several ash pseudomorphs interspersed within secondary sparitic calcite; (e) Microphotograph of a bone embedded within partially reprecipitated wood ash; (f) Photomicrograph showing dendrites of manganese oxide associated with secondary granular calcite.

All microphotographs are in plane polarized light

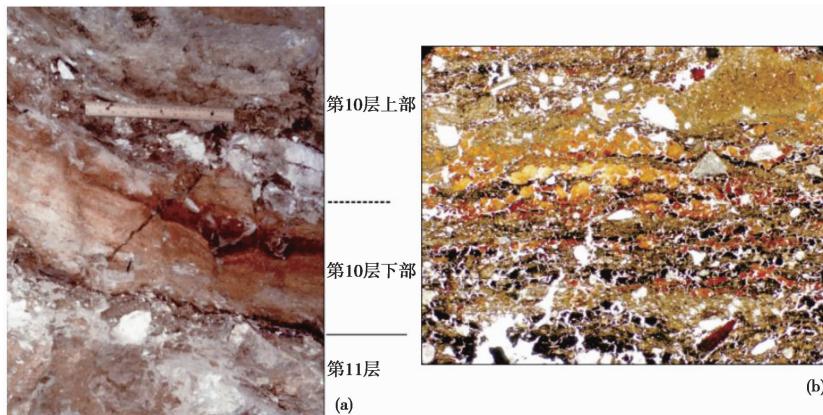


图 6 周口店第一地点第 10 层照片 (a) 及其显微照片 (b)，引自文献 Weiner 等^[42]

Fig. 6 The photograph (a) and photomicrograph (b) of layer 10, Locality 1 at Beijing Zhoukoudian^[42]

谱分析技术，主要原理为分子基团或官能团内部时刻发生着伸缩振动和弯曲振动，这些振动会吸收相应频率(主要集中在红外谱段)的电磁信号^[81]。对样品进行 FTIR 分析，得出特征谱图，并与标准样品谱图进行对照可鉴别分子基团或官能团类型。此外，分子基团或官能团越多，其特征峰吸收强度越大。

FTIR 技术可用于考古材料如骨骼、粘土和碳酸盐中等有机和无机官能团的鉴别与半定量分析，

可以表征这些材料受热情况下的相关变化^[26,82]。例如火事件发生后，产生了一些难以在地表温压条件下生成的矿物，利用 FTIR 技术可鉴别与定量这些矿物，反演当时火活动的类型与强度^[83]。

在考古研究中，次生磷酸盐和硅酸盐矿物可作为判断沉积物埋藏前受热状况的代用指标^[63]。例如，在高温 500 °C 及以上的情况下，骨矿物(碳酸羟基磷灰石)将出现再结晶的特征，利用 FTIR 技术可

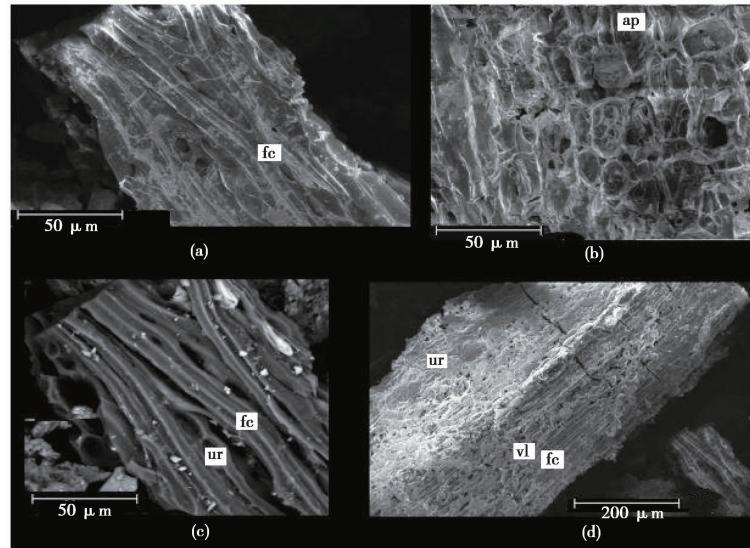


图 7 黄龙洞扫描电子显微镜下炭屑解剖特征^[13]

黑色物质为植物燃烧后的炭屑, 图中 ap: 薄壁细胞; fc: 纤维细胞; ur: 单列射线; vl: 导管

Fig. 7 The anatomic characteristics of charcoal by SEM present that the black materials are charcoal of plants after burning.

ap: parenchyma cell; fc: fibrocyte; ur: uniseriate ray; vl: conduit. All microphotographs are revised from Liu et al.^[13]

发现碳酸羟基磷灰石的 ν_4 ($565 \sim 630 \text{ cm}^{-1}$) 和 ν_3 ($1020 \sim 1100 \text{ cm}^{-1}$) 特征条带锐化, 这是和磷酸根的非对称伸缩振动峰位于 1096 cm^{-1} 和由于高温导致碳酸羟基磷灰石的脱碳酸根反应在 630 cm^{-1} 处出现羟基峰相一致^[84]。又如, 在南非开普敦的 Wonderwerk 洞穴中, 红外波段 1096 cm^{-1} 和 630 cm^{-1} 特征峰的出现指示显著的加热事件^[26](如图 8), 基于标准样品对比推测, 该地区的多数考古碎片被加热的温度达到 $400 \sim 550 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 。Shahack-Gross 等^[69]直接对 Qesem 洞的骨骼薄片进行微区 FTIR 测试分析(图 8a 和 8b), 结合常规微形态学岩相分析获得了关于该区域火事件的信息。研究发现, 白色地层序列的特定白色层内骨骼中, 超过 60% 遭受了高于 $500 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度, 而其余的骨骼可能在低于 $500 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 的温度下被烧焦或者未被加热^[69]。

除此之外, FTIR 也可对粘土(例如高岭石)和碳酸盐矿物等进行鉴别与半定量研究^[34, 83]。Qesem 洞地层中特征灰白层内的红化土壤团聚体 FTIR 代表性谱图显示^[34], 大部分样品在 3620 cm^{-1} 、 3650 cm^{-1} 和 3695 cm^{-1} 处特征的吸收率 FTIR 谱峰, 指示高岭石的存在, 表明这些土壤团聚体的加热温度低于接近或低于 $400 \text{ }^{\circ}\text{C}$ (图 9A); 但白色特征层内确有部分部位的 FTIR 分析表明, 该层位可能存在 $400 \sim 700 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 的加热而导致粘土矿物类型发生变化(图 9B)。Mareike 等^[83]对以色列 Schoningen 地区的考古样品进行了 FTIR 分析, 结果表明该考古

样品中存在高岭石, 而高岭石在 $400 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上不稳定(图 9C)。从炉膛获得的材料上也没有观察到显著热的变化, 如植物组织的炭化, 碎片的颜色变化, 氢氧钙石、赤铁矿、磁铁矿的形成等, 而燃烧事件也与高岭石的存在相矛盾, 综合研究表明该地区没有原地用火的充分证据^[83]。

Weiner 等^[42]在周口店地区也使用了红外光谱技术分析第 10 层黑色骨头是否受热事件的改造。FTIR 谱图显示一些大型动物的黑色骨片酸不溶残留物都是经过燃烧后产生的有机基质(图 9D 中(a)曲线); 而其他大多数骨片, 表面呈现灰黑斑点, 其测试产物为氧化镁等氧化物特征的黑色染色矿物(图 9D 中的(b)曲线)。Weiner 等^[42]认为该遗址虽然有经过燃烧的骨头, 但由于草木灰的缺乏, 表明那时还没有像火塘这样的东西出现, 从而给北京猿人是否主动用火又打上了问号。但后来研究者根据各种记录和野外观察, 发现第 10 层是十分复杂的一个层位, 堆积厚, 年代久远; 经历长时间各种营力作用, 遗迹必定会经受扰动而改变其原貌, 应对这样的地层进行更细致地分层和详细地观察研究^[61]。元素碳分析证明第 10 层存在集中用火的区域且在与之对应的石英层上有集中分布的灰堆^[17], 因而该层位可能存在过古人类用火。

2.4 磁化率、红度分析

磁学方法被广泛应用于考古材料的研究, 其原

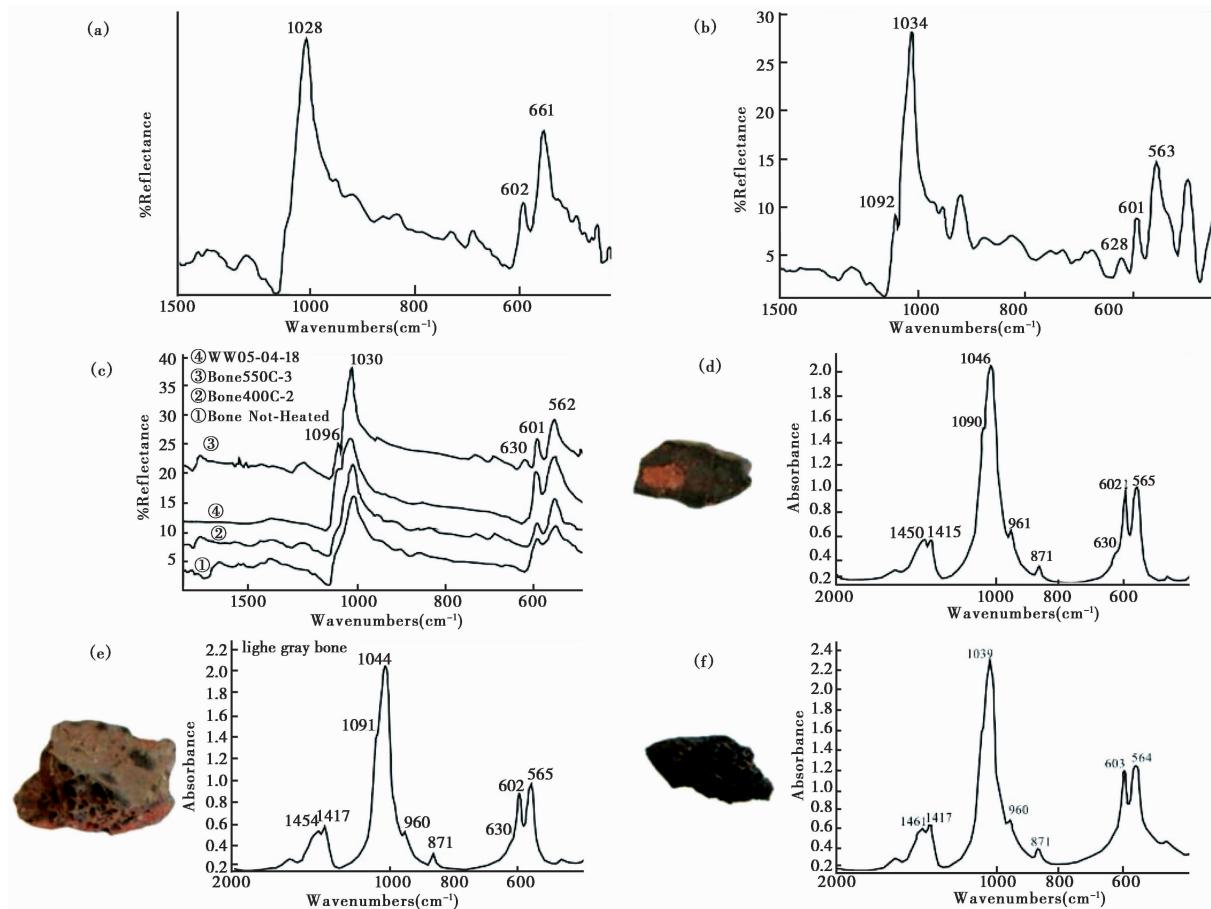


图 8 Qesem 洞与 Wonderwerk 洞穴骨头的 FTIR 图谱

(a) Qesem 洞疑似非燃烧过的骨片在 630 cm^{-1} 和 1090 cm^{-1} 处没有特征反射光谱峰, 表明骨片未被灼烧或加热温度低于 $500\text{ }^{\circ}\text{C}$; (b) Qesem 洞古人类聚集区疑似灼烧骨碎片的 FTIR 谱图显示在 630 cm^{-1} 和 1090 cm^{-1} 处具有特征反射光谱峰, 表明其加热温度为 $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ 及以上; 上述曲线修改自 Shahack-Gross 等^[69]; (c) ④为 Wonderwerk 洞穴骨头碎片 WW-04-18 样品 FTIR 反射光谱曲线, 以及①为骨片实验模拟未加热、②为加热 $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、③为加热 $550\text{ }^{\circ}\text{C}$ 后的 mFTIR 反射光谱曲线; (d)、(e)和(f) Wonderwerk 洞穴灰色和黑色的骨头 FTIR 谱图显示在 1096 cm^{-1} 和 630 cm^{-1} 两波数位置存在红外吸收, 表明考古碎片骨矿物质加热到至少 $400\text{ }^{\circ}\text{C}$, 但低于 $550\text{ }^{\circ}\text{C}$; (c)、(d)、(e)和(f) 曲线图修改自 Berna 和 Chazan^[26]

Fig. 8 The FTIR spectrum of bones in the Wonderwerk cave and the Qesem cave. (a) Representative reflectance FTIR spectrum of charred bone fragment from Qesem cave shows no FTIR bands at 630 cm^{-1} and 1090 cm^{-1} indicating heating temperature below $500\text{ }^{\circ}\text{C}$; (b) Representative reflectance FTIR spectrum of charred bone fragment from Qesem cave shows FTIR bands at 630 cm^{-1} and 1090 cm^{-1} indicating heating temperature of $500\text{ }^{\circ}\text{C}$. Plots of (a) and (b) are revised from Shahack-Gross et al.^[69]; (c) ④representative mFTIR reflectance spectra of samples WW-04-18, the bone fragments from Wonderwerk Cave, and representative mFTIR reflectance spectra of which are deduced from modeling curves for bones under conditions of non-heating ①, $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ burning ② and $550\text{ }^{\circ}\text{C}$ burning ③; (d), (e)and (f) representative mFTIR reflectance spectra of bone fragments from Wonderwerk cave shows infrared bands at 1096 cm^{-1} and 630 cm^{-1} as heating temperature indicators, indicates the archaeological fragment was heated to the temperature more than $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ but less than $550\text{ }^{\circ}\text{C}$, plots of (c), (d), (e)and (f) are revised from Berna and Chazan^[26]

理是燃烧过程产生了磁铁矿和赤铁矿等强磁性矿物可导致土壤及其他沉积物磁性显著增强^[85]。各种燃烧条件实验结果也表明, 磁学方法可用来有效地识别考古遗址中的用火区域, 尤其对年代久远、炉床原始结构保存不完整的遗址更为有效。此外, 古地磁法可以通过部分热剩磁(pTRM)的方向判断样品是否为原位燃烧^[3]。而在红度方面, 沉积物经过烘烤会发生变

化, 褐黄色针铁矿加热至 $250\sim400\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时可脱羟基形成赤铁矿^[86], 而赤铁矿含量增加会导致沉积物变红^[87]。前人针对考古遗址的研究结果也显示, 燃烧产生的赤铁矿颗粒为沉积物红色调的主要原因^[88-89]。因此, 系统的色度测量可进一步指示火事件的发生。Carranco 和 Villalafán^[85] 实验结果显示, 人类控制性用火燃烧后, 沉积物磁化率值最高可达燃

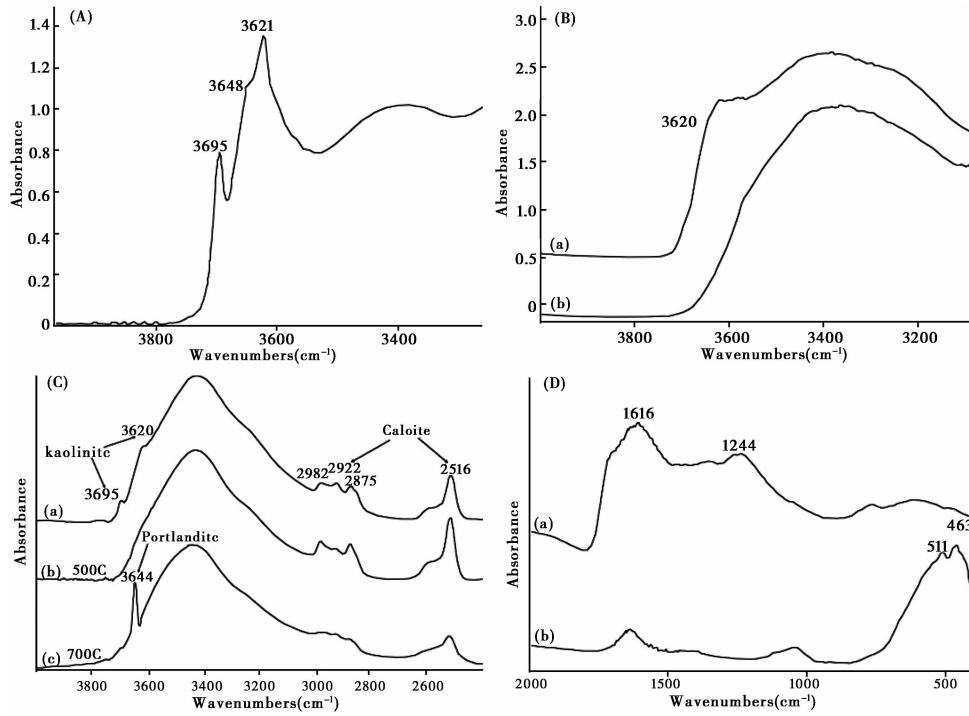


图9 洞穴粘土矿物FTIR图谱

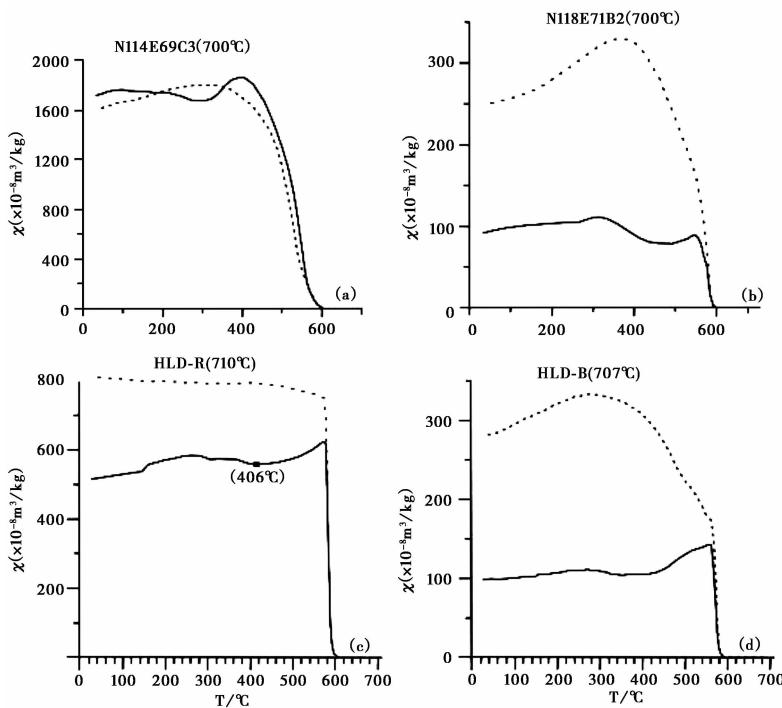
(A) Qesem洞穴地层土壤团聚体透射FTIR谱图, 在 3620 cm^{-1} 、 3650 cm^{-1} 和 3695 cm^{-1} 处特征的吸收光谱峰指示高岭石的稳定存在, 图中曲线修改自Shahack-Gross等^[69]; (B)以色列Qesem洞土壤团聚体的FTIR谱图, 显示仅在 3620 cm^{-1} 处存在特征吸收谱峰, 指示受到持续性加热但伊利石结构仍存在, 温度约高于 $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ 但低于 $700\text{ }^{\circ}\text{C}$, 其中(b)曲线显示在 3620 cm^{-1} 处FTIR特征吸收谱峰消失, 指示没有伊利石结构, 表明温度高于 $700\text{ }^{\circ}\text{C}$; 该图曲线修改自Shahack-Gross等^[69]; (C)以色列Schoningen地区洞穴遗址地层中泥灰岩沉积物的FTIR光谱, 其中(a)曲线表明沉积物未明显受热, (b)曲线显示沉积物加热到 $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ 后仍存在高岭石的特征FTIR光谱图; (c)曲线为加热到 $700\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的局部泥灰岩沉积物出现了氢氧化钙(3644 cm^{-1})的特征FTIR光谱; 修改自Mareike等^[83]; (D)周口店地区第10层沉积物FTIR图谱: (a)曲线燃烧难熔有机质的FTIR特征光谱; (b)曲线中锰和其他可能的氧化物FTIR特征光谱, 改自Weiner等^[42]

Fig. 9 FTIR spectrum of clay minerals from caves. (A) Transmission FTIR spectra of soil aggregates in Qesem cave strata, indicates the stable existence of kaolinite with characteristic absorption peaks at 3620 cm^{-1} , 3650 cm^{-1} and 3695 cm^{-1} (Shahack-Gross et al.^[69]); (B) The FTIR spectra of soil aggregates in Qesem cave, Israel, (a) shows that there are characteristic absorption peaks only at 3620 cm^{-1} , indicating that the illite structure still exists under persistent heating with the temperature above $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ but below $700\text{ }^{\circ}\text{C}$; (b) shows that the characteristic FTIR absorption peaks disappear at 3620 cm^{-1} , implying no illite structure under the heating temperature higher than $700\text{ }^{\circ}\text{C}$ ^[69]; (C) The FTIR spectra of mudstone sediments in the stratum from Schoningen area, in which curve (a) shows that the sediments are not obviously heated, and curve (b) shows the characteristic FTIR spectra of kaolinite, which indicates the sediments have been heated to $500\text{ }^{\circ}\text{C}$, and curve (c) shows that the local mudstone sediments have been heated to $700\text{ }^{\circ}\text{C}$ with a characteristic FTIR spectra peak of portlandite (Ca(OH)_2 , 3644 cm^{-1}); all the curves in this picture are modified from Mareike et al.^[83]; (D) FTIR spectra of insoluble fraction of two black bones from the upper part of Layer 10 in Zhoukoudian area: (a) Spectrum characteristic of burned organic matrix; (b) Spectrum characteristic of manganese and other possible oxides; curves are modified from Weiner et al.^[42]

烧前的50倍, 而自然火(如树桩、草地等起火)则无法使沉积物发生显著磁学性质改变^[90]。

在周口店地区对第4堆积层的发掘平面进行了系统采样, 对样品也进行磁化率、色度测试, 以确定疑似用火区域的分布范围和变化特征^[18]。分析显示, 被认定为用火部位的沉积物的磁化率、红度显著异常, 疑似用火区域磁化率值较其他部位的沉

积物高出22倍, 红度高出近3倍^[18]。被检测出高磁化率值和高红度值的样品中富含细粒磁铁矿和赤铁矿, 这两种矿物导致了沉积物的高磁化率值和高红度值^[86, 91]。热磁分析(即 χ -T曲线)结果显示(图10a和10b), 疑似用火区样品N114E69C3和非用火区样品N118E71B2的加热曲线在 $580\text{ }^{\circ}\text{C}$ 接近0, 指示磁铁矿的居里温度; 疑似用火区样品 χ -T

图 10 周口店及黄龙洞沉积物典型样品的磁化率随温度变化($\chi-T$)曲线

实线表示加热曲线，虚线表示冷却曲线，其中(a)和(b)为周口店地区疑似用火区样品 N114E69C3 和非用火区样品 N118E71B2 加热到 700 °C 的 $\chi-T$ 曲线，改自张岩等^[18]；(c)和(d)为黄龙洞沉积物典型样品的磁化率随温度变化($\chi-T$)曲线，改自刘武等^[13]

Fig. 10 Variation of magnetic susceptibility along with temperature ($\chi-T$ curve) for typical sediment samples from Zhoukoudian and Huanglong cave. Plots of (a) and (b) show the $\chi-T$ curves of sample N114E69C3 from possible burning stratum and sample N118E71B2 from unburning stratum, which have been heated at temperature above 700 °C in Beijing Zhoukoudian^[18]；Plots of (c) and (d) are $\chi-T$ curves of typical sediment samples from possible burning and unburning strata, respectively, in Huanglong cave, which are revised from Liu et al.^[13]

表 3 周口店猿人遗址样品以及其他区域样品元素碳浓度^[17]Table 3 Concentrations of elemental carbon of samples from the Peking man site of Zhoukoudian and other areas^[17]

样品号	样品来源及描述	初始量(g)	剩余量(g)	剩余物碳含量(%)	总碳量(g)	元素碳浓度(%)
ZKD1	第 10 层沉积物(下部)，棕红色土	2.8633	0.0424	26.19	0.0111	3.88
ZKD2	第 10 层沉积物(中部)，棕红色砂质粘土	1.0238	—	—	0.00191	1.87
ZKD3	第 10 层沉积物(中部)，棕红色砂质粘土	0.7967	—	—	0.00088	1.11
ZKD4	洞口外相当于第 10 层，棕红色砂质粘土	2.7912	—	—	0.00033	0.12
ZKD5	第 4 层顶部，粘土质粉砂	3.9165	0.0565	0.89	0.0005	0.12
ZKD6	第 4 层中部，粘土质粉砂	2.9675	0.0333	1.60	0.0004	0.13
ZKD7	第 4 层底部，粘土质粉砂	3.0152	0.0313	—	0.0005	0.15
ZKD8	第 7 层 20~80 cm, 细粉砂层	2.8201	—	—	0.00048	0.17
ZKD9	第 7 层展品(6 号)，黑色粘结土	2.3761	0.2473	42.03	0.1039	43.74
ZKD10	第 7 层展品(5 号)，棕红色土	2.7367	0.0562	8.60	0.0048	1.77
WN80	渭南黄土	2.6490	—	—	0.00048	0.18
WN81	渭南黄土	3.0000	0.0131	4.65	0.0006	0.20
B30	南极乔治王岛燕窝湖沉积物	3.1453	—	—	0.00048	0.095

曲线基本可逆，而非用火区样品曲线显示不可逆。这表明对疑似用火区样品加热时磁性变化不大，基本没有强磁性矿物生成，则该区域含铁硅酸盐或粘土矿物已经消耗殆尽，无法生成强磁性矿物；而非

用火区域样品燃烧过程有大量强磁性矿物。此外，磁化率随温度变化的特征进而表明在高磁化率值的区域应经历过 700 °C 以上高温加热，这是自然火难以达到的温度，说明这些区域确实发生过长时间就

地用火^[18]。

晚更新世的黄龙洞遗址, 其地层样品的磁化率, 如取自疑似用火层位的样品 HLD-R 磁化率高达 $516 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$, 远高于灰岩和碎屑岩的磁化率背景值^[13]。样品 HLD-R 的高磁化率特征是地质埋藏因素如沉积后风化作用难以解释的, 因此推测样品 HLD-R 所在的地层曾经历过高温烘烤, 从而导致磁化率异常升高。与此同时, 根据 χ -T 曲线的变化趋势也推测出样品 HLD-R 所在的地层被加热的温度可能小于 400 ℃, 因其在加热到 200~400 ℃ 时磁化率变化不大, 而加热至 406 ℃ 后磁化率又逐渐升高(图 10c)。取自非疑似用火层位的黑色, 富含碳质的样品 HLD-B 进行平行实验, 该样品磁化率为 $98 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$, 比 HLD-R 小很多, 并未经历高温烘烤(图 10d)。磁化率测量关于可疑燃烧地层经历过高温事件的结果, 与该遗址微观形态分析、碳元素含量测定结果相一致, 研究者据此认为这些燃烧是当时人类进行控制性用火活动所致^[13]。

2.5 元素含量特征变化

燃料不完全燃烧过程中产生一类富含碳元素的物质元素碳(一些文献称为黑碳, 火成碳, 其内涵是一致的, 在这里统称元素碳), 在古人类遗址中检测到高浓度的元素碳可以作为支持燃烧事件发生的证据^[17]。洞穴沉积物中所含天然火所产生的元素碳通常有两种类型: 一是大气沉降元素碳, 另一是鸟粪等类物质就地自燃产生的元素碳。相对于人类用火来说, 前者贡献很小, 可通过其他类型沉降物如黄土沉积物中元素碳的测定研究予以扣除; 后者则可依据元素如富磷特征等予以区分^[42]。此外, 元素碳碳同位素组成能反映燃料信息^[17, 92~93], 如古人类控制性用火对于燃料具有一定的选择性, 通过

对比分析疑似古人类用火残余物与围岩沉积物中的元素碳碳同位素值, 可能判断是否存在古人类主动用火, 但目前这一方法还较少被应用。

在周口店地区也做过元素碳的分析, 结果如表 3, 在北京猿人遗址展厅展示的疑似炉床部位的第 7 层 ZKD9 样品(黑色粘结土)其元素碳浓度为 43.73‰, 同层位 ZKD10 样品(棕红色土)元素碳浓度为 1.75‰^[17]。两者均比大气沉降的天然火元素碳浓度, 也就是表 3 中渭南黄土元素碳浓度高出一个数量级以上, 且前者为后者的 25 倍。ZKD1 样取自西壁第 10 层下部, 其元素碳含量介于“炉床”样 ZKD8 和“炉床”周围碎土样 ZKD10 之间。第 10 层中部的 ZKD2 和 ZKD3 元素碳浓度低于 ZKD1, 但仍在同一数量级。其他层位样品的元素碳浓度与大气沉降的天然火元素碳浓度属同一数量级, 相差不大。结果揭示“炉床”部位堆积物元素碳浓度明显偏高的事实^[17]。

刘武等^[13]对黄龙洞遗址样品元素含量的测定结果列于表 4, 可以看出, 可疑燃烧样品与对比样品碳元素含量差别非常显著。6 个可疑燃烧样品(HLD1 和 HLD2)的碳元素含量均在 60% 以上。相对而言, 4 个对比样品(HLD3、HLD4、HLD5 和 HLD6)的碳元素含量都在 10% 以下。除元素碳外, 其他地球化学元素对燃烧事件也有一定的指示意义。可疑燃烧样品氧含量较低, 而对比样品氧元素含量相对较高, 提示燃烧造成的局部氧含量减少。磷元素只在可疑燃烧样品中出现。此外, 钠、钾、铁元素都出现在对比样品中, 但除了在 HLD1 (1) 样品检测到少量的钾外, 这些元素未出现在其他可疑燃烧样品中。铝和硅在对比样品中的含量也明显高于可疑的燃烧样品。

表 4 黄龙洞遗址样品元素半定量分析结果(重量百分含量%)^[13]

Table 4 The result of semi-quantitative analysis of elements in Huanglong cave (weight percentage)^[13]

样品号	C	O	Cu	Na	Mg	Al	Si	P	K	Ca	Ti	Fe
HLD1 (1)	73.29	23.99	—	—	0.88	0.05	0.06	0.09	0.06	1.58		
HLD1 (2)	71.62	23.03	0.51	—	1.19	0.49	0.16	0.09		2.91		
HLD1 (3)	70.75	25.79	—	—	0.92	—	—	0.07		2.47		
HLD1 (4)	72.02	22.13	0.28	—	1.24	0.42	0.12	0.11		3.69		
HLD1 (5)	62.44	25.41	—	—	1.13	—	—	0.56		10.47		
HLD2	64.59	29.35	—	—	0.60	0.67	0.96	0.89		2.94		
HLD3	9.49	48.38	—	0.69	1.96	7.76	20.13	—	1.57	4.24		5.78
HLD4	5.82	43.75	—	2.10	8.29	22.09	1.18	—	1.69	4.94	1.28	8.87
HLD5	6.52	44.42	—	1.51	1.90	7.84	23.59	—	1.69	2.72		9.82
HLD6	5.82	46.86	—	1.06	2.03	8.43	25.66	—	2.32	0.97		6.86

3 研究方法小结

宏观证据是研究古人类用火历史最直观的方法，烧骨、烧石以及火塘是大多数人类用火遗迹或者遗址中都可能会存在且易于鉴别。通常在古人类遗址中发现有烧骨烧石等，研究者们才会关注到该地区是否有值得研究的用火事件。但是这些我们肉眼所见的发黑石头、骨头样品是否真的经过燃烧，抑或是在经历数万年的埋藏风化后产生的颜色变化，我们仅仅靠肉眼观察得到的结论并不是准确的。

微观形态分析是在微观尺度上对样品的形态进行分析，燃烧过后产生的草木灰、微小烧骨等不易被肉眼所见，借助常用的显微镜、电子显微镜等器材对其进行分析记录。微观的形态可以用来判断沉积环境，确定该地的样品是原位沉积或是流水等动力作用冲积而来。此外，微观研究可以清楚的揭示其他分析技术不容易获得的信息，包括燃料的组成、燃烧条件等，这是对宏观证据的一个补充。由此可见，无论是宏观证据还是微观形态分析，得到的都是一个相对直观清晰的证据。

FTIR 红外光谱是一种分子分析技术，FTIR 技术可用于材料中有机和无机官能团的鉴别与半定量分析。在研究古人类用火时主要是对粘土矿物和骨头进行分析。由于对成因过程的物质以及结构变化有高精度的敏感性，通过特征谱线我们能够获得样品是否真的发生过燃烧事件以及燃烧温度和燃烧过程中物质的变化。红外光谱技术成熟，应用于古人类用火研究不失为一种很好的方法。在 Wonderwerk 洞中应用微观形态分析和 FTIR 获得了人类用火较为充分的证据。

燃烧后的沉积物其红度和磁性都会改变，通过数据构建数学模型曲线可以分析得出样品区域沉积物高磁化率、高红度值的形成机制，及所经受的烘烤燃烧温度等。如果温度很高，达到自然火无法达到的温度则很有可能是人为控制用火；而古地磁法可以判断遗址区域的燃烧事件是否为原位发生。目前，此方法也逐渐被应用于古人类用火研究领域。

元素分析是通过沉积物中元素变化来分析判断燃烧证据和机理。疑似燃烧部位的元素碳浓度比大气沉降元素碳浓度高出数倍，其最高峰值部位可能是说明该地发生了原位持续燃烧的结果，结合元素碳同位素对于燃烧材料的分析，再辅以其他可能获得的宏观、微观、FTIR、磁化率、红度等证据，可以判断出是人为火还是野火造成。

4 结语

古人类用火研究一直是一个热点，随着研究方法和技术手段的逐步发展，对该领域研究愈加深入但争议仍然存在。很多早期遗址曾被认为存在用火遗存，然后被质疑、否定，有的争议一直无法了断。为有效解决争论，建立人类有意识用火证据的标准并被学术界认可的体系，是十分有必要的。事实上，没有单一的方法可以确定该地是否发生人类用火事件，需要多种方法的联合才能得到比较准确的结论。如在 Wonderwerk 洞穴使用多种分析手段检验是否发生过燃烧事件，并结合考古学及地层学的背景，得到了可靠的古人类用火证据。我们认为在对一个遗址进行火活动发生的研究时，首先要获取该地的文化层资料，然后确定是否发生燃烧，是何物质发生燃烧，以及与人类活动的联系。一个地区是否发生火事件是比较容易判别的，但是否可以与人类活动相联系起来，单单靠一种分析方法是不能够获得完全准确的证据。宏观的火塘是很好的古人类用火证据，而烧骨或烧石的存在是用火的良好补充。可是地质埋藏过程中发生的种种作用都会使遗迹发生一定程度的改变，完整的火塘几乎很少存在。与此同时，因为受地质作用的扰动，在获得疑似燃烧过的合适材料进行 FTIR、磁化率及红度分析也受到限制。沉积物完整的微观形态分析可以清晰的了解该地燃烧物的形态，而根据沉积物的形态结合当时的古环境等可以推测是否为原地燃烧，这对人类用火来说是十分重要的证据，然而微观形态如受外力扰动则不易观察获得。元素碳分析可以明确火的发生和火燃烧机制如火的强度和类型等；而碳稳定同位素方法可示踪燃料类型和来源，在植被、气候、人类活动相互联系方面广泛应用。古人类用火研究引入元素碳及其碳同位素技术可为该领域提供新的研究手段和思路。

致谢：成文过程中受到朱照宇研究员、杨晓燕研究员、孟宪强博士、孙雪峰博士、贾鑫博士、惠家明同学的帮助，特此深表感谢。真挚地感谢审稿老师和编辑部杨美芳老师建设性的修改意见，使文章得以完善。

参考文献(References)：

- [1] 蔡树雄. 火在人类进化中的作用[J]. 化石, 1989,(1):8-9.
Cai Shuxiong. The role of fire in human evolution[J]. Fossils,

- 1989, (1):8-9.
- [2] 贾兰坡, 王建. 人类用火的历史和火在社会发展中的作用[J]. 历史教学, 1956, (12):7-10.
Jia Lanpo, Wang Jian. The history of human fire and the role of fire in social development[J]. History Teaching, 1956, (12):7-10.
- [3] Brown K S, Marean C W, Herries A I, et al. Fire as an engineering tool of early modern humans[J]. Science, 2009, 325 (5942):859-862.
- [4] Attwell L, Kovarovic K, Kendal J. Fire in the Plio-Pleistocene: The functions of hominin fire use, and the mechanistic, developmental and evolutionary consequences[J]. Journal Anthropological Science, 2015, 93(1):1-20.
- [5] Santín C, Doerr S H. Fire effects on soils: The human dimension[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society of London, 2016, 371:20150147. doi:10.1098/rstb.2015.0171.
- [6] Gowlett J A. The discovery of fire by humans: A long and convoluted process[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences, 2016, 371: 20150164. doi: 10.1098/rstb.2015.0164.
- [7] Bowman D M J S, O'Brien J A, Goldammer J G. Pyrogeography and the global quest for sustainable fire management[J]. Annual Review of Environment & Resources, 2013, 38(1):57-80.
- [8] Clark J D, Harris J W K. Fire and its roles in early hominid lifeways[J]. African Archaeological Review, 1985, 3(1):3-27.
- [9] Mcbrearty S, Brooks A S. The revolution that wasn't: A new interpretation of the origin of modern human behavior[J]. Journal of Human Evolution, 2000, 39(5):453-463.
- [10] Delson E, Tattersall I, Couvering V, et al. Encyclopedia of Human Evolution and Prehistory[M]. New York: Garland Publishing Inc., 2000:268-269.
- [11] Gibbon A. Food for thought[J]. Science, 2007, 316 (5831): 1558-1560.
- [12] James S R, Dennell R W, Gilbert A S, et al. Hominid use of fire in the Lower and Middle Pleistocene: A review of the evidence and comments and replies[J]. Current Anthropology, 1989, 30(1): 1-26.
- [13] 刘武, 武仙竹, 李宜垠, 等. 湖北鄖西黄龙洞古人类用火证据[J]. 科学通报, 2008, 53(24):3096-3103.
Liu Wu, Wu Xianzhu, Li Yiyin, et al. Evidence of ancient human fire in Huanglong cave in Yunxi, Hubei Province[J]. Chinese Science Bulletin, 2008, 53(24):3096-3103.
- [14] 武仙竹, 李禹阶, 刘武. 旧石器时代人类用火遗迹的发现与研究[J]. 考古, 2010, (6):57-65.
Wu Xianzhu, Li Yujie, Liu Wu. The discoveries and researches on the remains of hominid use of fire in Paleolithic Age[J]. Archaeology, 2010, (6):57-65.
- [15] 周振宇, 关莹, 王春雪, 等. 旧石器时代的火塘与古人类用火[J]. 人类学学报, 2012, 31(1):24-40.
Zhou Zhenyu, Guan Ying, Wang Chunxue, et al. Remains of human fire-use: An overview of Paleolithic hearth and human fire-use behavior[J]. Acta Anthropologica Sinica, 2012, 31 (1): 24-40.
- [16] 周军. 谈谈旧石器遗址中的用火遗迹——兼论小空山下洞旧石器遗址中的灰烬层[J]. 中原文物, 1990, (4):127-129.
Zhou Jun. Talk about the fire relics in the paleolithic sites—And discuss the ash layers in the lower cave paleolithic sites in the Xiaokong Mountain[J]. Cultural Relics of Central China, 1990, (4):127-129.
- [17] 沈承德, 易惟熙, 杨英, 等. 周口店猿人遗址样品“元素碳”浓度及其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.
Chengde, Yi Weixi, Yang Ying et al, The concentration of "elemental carbon" in samples from the Peking Man site at Zhoukoudian and the possibility of their application in the development of evidence for the use of fire by human[J]. Chinese Science Bulletin, 2004, 49(3):275-278.
- [18] 张岩, 郭正堂, 邓成龙, 等. 周口店第1地点用火的磁化率和色度证据[J]. 科学通报, 2014, 59(8):679-686.
Zhang Yan, Guo Zhengtang, Deng Chenglong, et al. The use of fire at Zhoukoudian: Evidence from magnetic susceptibility and color measurements[J]. Chinese Science Bulletin, 2014, 59(8): 679-686.
- [19] 贾兰坡, 盖培, 尤玉桂. 山西峙峪旧石器时代遗址发掘报告[J]. 考古学报, 1972, (1):39-58.
Jia Lanpo, Gai Pei, You Yugui. Excavation report of the Paleolithic site at Xiyu, Shanxi[J]. Acta Archaeologica Sinica, 1972, (1):39-58.
- [20] 张森水. 马鞍山旧石器遗址试掘报告[J]. 人类学学报, 1988, 7(1):64-74.
Zhang Senshui. A brief report of the tentative excavation in Ma'anshan Paleolithic site[J]. Acta Anthropologica Sinica, 1988, 7(1):64-74.
- [21] 陈子文, 李建军, 余生富. 福建三明船帆洞旧石器遗址[J]. 人类学学报, 2001, 20(4):256-270.
Chen Ziwen, Li Jianjun, Yu Shengfu. A Paleolithic site at Chuanfangdong in Sanming City, Fujian Province[J]. Acta Anthropologica Sinica, 2001, 20(4):256-270.
- [22] 张松林, 刘彦锋. 织机洞旧石器时代遗址发掘报告[J]. 人类学学报, 2003, 22(1):1-17.
Zhang Songlin, Liu Yanfeng. Report on the excavation of Zhijidong cave site[J]. Acta Anthropologica Sinica, 2003, 22(1):1-17.
- [23] 高星, 周振宇, 关莹. 青藏高原边缘地区晚更新世人类遗存与生存模式[J]. 第四纪研究, 2008, 28(6):969-977.
Gao Xing, Zhou Zhenyu, Guan Ying. Human cultural remains and adaptation strategies in the Tibetan Plateau margin region in the Late Pleistocene[J]. Quaternary Sciences, 2008, 28 (6): 969-977.
- [24] 武仙竹, 肖琳. 三峡地区旧石器时代人工用火遗迹的重要发现[J]. 重庆师范大学学报(社会科学版), 2010, (3):95-98.
Wu Zhuxian, Xiao Lin. The important discovery of artificial fire relic in Paleolithic period in Three Gorges area[J]. Journal of Chongqing Normal University(Edition of Social Sciences), 2010, (3):95-98.

- [25] 高星, 王惠民, 刘德成, 等. 水洞沟第12地点古人类用火研究[J]. 人类学学报, 2009, 28(4):329–336.
Gao Xing, Wang Huimin, Liu Decheng, et al. A study of fire-use activities at Shuidonggou locality 12 [J]. *Acta Anthropologica Sinica*, 2009, 28(4):329–336.
- [26] Berna F, Chazan M. Microstratigraphic evidence of *in situ* fire in the Acheulean strata of Wonderwerk Cave, Northern Cape Province, South Africa[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America; Biological Sciences*, 2012, 109(20):7593–7594.
- [27] Brain C K, Sillent A. Evidence from the Swartkrans Cave for the earliest use of fire[J]. *Nature*, 1988, 336(6198):464–466.
- [28] Archibald S, Levin S A. Evolution of human-driven fire regimes in Africa[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2012, 109(3):847–852.
- [29] Pickering R. U-Pb dating small buried stalagmites from Wonderwerk Cave, South Africa: A new chronometer for earlier Stone Age cave deposits[J]. *African Archaeological Review*, 2015, 32(4):645–668.
- [30] Goren-Inbar N, Alperson N, Kislev M, et al. Evidence of hominin control of fire at Gesher Benot Ya'aqvo, Israel[J]. *Science*, 2004, 304(5671):725–727.
- [31] Balter M. Earliest signs of human-controlled fire uncovered in Israel[J]. *Science*, 2004, 304(5671):663–664.
- [32] Berna F, Goldberg P. Assessing Paleolithic pyrotechnology and associated hominin behavior in Israel[J]. *Israel Journal of Earth Sciences*, 2008, 56(2):107–121.
- [33] Pobiner B L, Rogers M J, Monahan C M, et al. New evidence for hominin carcass processing strategies at 1.5 Ma, Koobi Fora, Kenya[J]. *Journal of Human Evolution*, 2008, 55(1):103–130.
- [34] Karkanas P, Shahack-Gross R, Ayalon A, et al. Evidence for habitual use of fire at the end of the lower Paleolithic: Site-formation processes at Qesem Cave, Israel[J]. *Journal of Human Evolution*, 2007, 53(2):197–212.
- [35] Paloma Sevilla, Jean Chaline. New data on bat fossils from Middle and Upper Pleistocene localities of France[J]. *Géobios*, 2011, 44(2):289–297.
- [36] Preece R C, Gowlett J A J, Parfitt S A, et al. Humans in the Hoxnian: Habitat, context and fire use at Beeches Pit, West Stow, Suffolk, UK[J]. *Journal of Quaternary Sciences*, 2010, 21(5):485–496.
- [37] 张森水. 关于西侯度的问题[J]. 人类学学报, 1998, 17(2):81–93.
Zhang Senshui. A discussion on the so-called cultural relics found at Xihoudi site in Ruicheng County, Shan'xi Province[J]. *Acta Anthropologica Sinica*, 1998, 17(2):81–93.
- [38] 贾兰坡, 王建. 西侯度: 山西更新世早期古文化遗址[M]. 北京: 文物出版社, 1978:1–70.
Jia Lanpo, Wang Jian. Xi Houdu: Early Pleistocene Ancient Cultural Sites in Shanxi[M]. Beijing: Cultural Relics Publishing House, 1978:1–70.
- [39] 戴尔俭, 许春华. 蓝田旧石器的新材料和蓝田猿人文化[J]. 考古学报, 1973,(2):1–12.
Dai Erjian, Xu Chunhua. New finds of Palaeoliths from Lantien[J]. *Acta Archaeologica Sinica*, 1973,(2):1–12.
- [40] 王幼平. 中国远古人类文化的源流[M]. 北京: 科学出版社, 2005:1–120.
Wang Youping. Origin of Ancient Human Culture in China[M]. Beijing: Science Press, 2005:1–120.
- [41] 张森水, 宋惕冰. 北京志·世界文化遗产卷·周口店遗址志[M]. 北京: 科学出版社, 2004:1~513
Zhang Senshui, Song Tibing. Annal of Beijing · World Cultural Heritage Volume—Zhoushoudian Ruins[M]. Beijing: Science Press, 2004:1–513.
- [42] Weiner S, Xu Q, Goldberg P, et al. Evidence for the use of fire at Zhoukoudian, China[J]. *Science*, 1998, 281(5374):251–253.
- [43] Zhong M, Shi C, Gao X, et al. On the possible use of fire by *Homo erectus* at Zhoukoudian, China[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2014, 59(3):335–343.
- [44] 武仙竹. 鄢西人——黄龙洞遗址发掘报告[M]. 北京: 科学出版社, 2006:1–279.
Wu Xianzhu. Yunxi Man—Huanglongdong Site Excavation Report[M]. Beijing: Science Press, 2006:1–279.
- [45] 涂华, 沈冠军, 武仙竹. 古人类遗址湖北鄢西黄龙洞的铀系年代[J]. 人类学学报, 2011, 30(3):327–333.
Tu Hua, Shen Guanjun, Wu Xianzhu. U-series dating of Huanglong cave, a Paleolithic site at Yunxi, Hubei Province[J]. *Acta Anthropologica Sinica*, 2011, 30(3):327–333.
- [46] 武春林, 张岩, 李琴, 等. 中国古人类遗址环境数据库及遗址时空分布初步分析[J]. 科学通报, 2011, 56(26):2229.
Wu Chunlin, Zhang Yan, Li Qin, et al. An environmental database and temporal and spatial distribution of Chinese paleoanthropological sites[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2011, 56(26):2229.
- [47] Zhu Z Y, Dennell R, Huang W W, et al. New dating of the *Homo erectus* cranium from Lantian (Gongwangling), China[J]. *Journal of Human Evolution*, 2015, 78: 144 – 157. doi: 10.1038/s41586-018-0299-4.
- [48] Binford L R, Ho C K, Aigner J S, et al. Taphonomy at a distance: Zhoukoudian, “The Cave Home of Beijing Man”? [and Comments and Reply][J]. *Current Anthropology*, 1985, 26(4):413–442.
- [49] Black D. Evidence of the use of fire by *Sinanthropus*[J]. *Bulletin for Geological Society of China*, 1931, 11(2):107–108.
- [50] 徐钦琦, 刘金毅. 对美国《科学》杂志关于周口店第1地点用火证据的文章的评论[J]. 人类学学报, 1998, 17(4):317–329.
Xu Qinqi, Liu Jinyi. Comment on an article in science magazine about evidence of fire in Zhoukoudian site 1 [J]. *Acta Anthropologica Sinica*, 1998, 17(4):318–329
- [51] 张双权, 高星, 陈福友, 等. 周口店第一地点西剖面2009–2010年发掘报告[J]. 人类学学报, 2016, 35(1):63–75.
Zhang Shuangquan, Gao Xing, Chen Fuyou, et al. A report of the 2009–2010 field excavations at the west section of Zhoukoudian Loc.1[J]. *Acta Anthropologica Sinica*, 2016, 35(1):63–75.
- [52] 武仙竹, 裴树文, 吴秀杰, 等. 湖北鄢西白龙洞古人类遗址初

- 步研究[J]. 人类学学报, 2009, 28(1):1-15.
- Wu Xianzhu, Pei Shuwen, Wu Xiujie, et al. A preliminary study of the Bailong Cave paleoanthropological site in Yunxi County, Hubei Province[J]. Acta Anthropologica Sinica, 2009, 28(1):1-15.
- [53] 刘学彬. 湖北郧西白龙洞遗址²⁶Al/¹⁰Be埋藏测年研究[D]. 南京:南京师范大学博士学位论文, 2015:1-45.
- Liu Xuebin. Study of ²⁶Al/¹⁰Be Burial Dating of Bailong Cave Site in Yunxi, China[D]. Nanjing: The Ph.D Dissertation of Nanjing Normal University, 2015:1-45.
- [54] 贾兰坡. 匽河:山西西南部旧石器时代初期文化遗址[M]. 北京:科学出版社, 1962:1-73.
- Jia Lanpo. He He; Early Paleolithic Cultural Sites in Southwestern Shanxi [M]. Beijing: Science Press, 1962:1-73.
- [55] 黄春长. 锡水洞遗址古地理环境、用火遗迹及时代问题[J]. 史前研究, 1984,(1):1-6.
- Huang Changchun. The ancient geographical environment, fire remains and the dating problem of the Xishui cave site[J]. Prehistoric Research, 1984,(1):1-6.
- [56] 辽宁省博物馆, 本溪市博物馆. 庙后山——辽宁省本溪市旧石器文化遗址[M]. 北京: 文物出版社, 1986:1-110.
- Liaoning Provincial Museum, Benxi Museum, Temple Back Hill—Liaoning Province Benxi City Paleolithic Cultural Site[M]. Beijing: Cultural Relics Publishing House, 1986:1-110.
- [57] 吴茂霖, 王令红, 张银运, 等. 贵州桐梓新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, 13(1):14-23.
- Wu Maolin, Wang Linghong, Zhang Yinyun et al. Fossils of ancient human and their cultural relics discovered in Tongzi, Guizhou[J]. Vertebrata PalAsiatica, 1975, 13(1):14-23.
- [58] 陕西省考古研究院, 等. 花石浪(Ⅱ)——洛南化石浪龙牙洞遗址发掘报告[M]. 北京: 科学出版社, 2008:1-272.
- Shaanxi Archaeological Institute, et al. Marble Waves(Ⅱ)—Law South Fossil Sea Dragon Cavities Site Excavation Report[M]. Beijing: Science Press, 2008:1-272.
- [59] 湖北省清江隔河岩考古队, 等. 清江考古[M]. 北京: 科学出版社, 2004:1-529.
- Hubei Qingjiang Geheyuan Archaeological Team, et al. Qingjiang Archaeological[M]. Beijing: Science Press, 2004:1-529.
- [60] 鸽子洞发掘队. 辽宁鸽子洞旧石器遗址发掘报告[J]. 古脊椎动物与古人类, 1975, 13(2):122-136.
- Gezidong Excavation Team. Excavation report of palaeolithic site in Pigeonhole, Liaoning[J]. Vertebrata PalAsiatica, 1975, 13(2):122-136.
- [61] 高星, 张双权, 张乐, 等. 关于北京猿人用火的证据: 研究历史、争议与新进展[J]. 人类学学报, 2016, 35(4):481-492.
- Gao Xing, Zhang Shuangquan, Zhang Yue, et al. New evidences of *in-situ* using fire by the Peking Man at Zhoukoudian Locality 1: Research history, controversy and new development[J]. Acta Anthropologica Sinica, 2016, 35(4):481-492.
- [62] Goldberg P, Dibble H, Berna F, et al. New evidence on Neandertal use of fire: Examples from Roc de Marsal and Pech de l'Azé IV[J]. Quaternary International, 2012, 247:325-340. doi: 10.1016/j.quaint.2010.11.015.
- [63] Karkanas P, Bar-Yosef O, Goldberg P, et al. Diagenesis in prehistoric caves: The use of minerals that form *in situ*, to assess the completeness of the archaeological record[J]. Journal of Archaeological Science, 2000, 27(10):915-929.
- [64] Shahack-Gross R. Archaeological micromorphology self-evaluation exercise[J]. Geoarchaeology—An International Journal, 2015, 31(1):49-57.
- [65] 吴小红, 伊丽莎贝塔·博阿雷托, 袁家荣, 等. 湖南道县玉蟾岩遗址早期陶器及其他层堆积的碳十四年代研究[J]. 南方文物, 2012, (3):7-15.
- Wu Xiaohong, Boareto Elizabetha, Yuan Jiarong, et al. Radiocarbon dating of early pottery and strata at Yuchanyan site in Daoxian, Hunan Province[J]. Cultural Relics in Southern China, 2012, (3):7-15.
- [66] Albert R M, Marean C W. The exploitation of plant resources by early *Homo sapiens*: The phytolith record from Pinnacle Point 13B Cave, South Africa[J]. Geoarchaeology—An International Journal, 2012, 27(4):363-384.
- [67] Goldberg P, Miller C E, Mentzer S M. Recognizing fire in the Paleolithic archaeological record[J]. Current Anthropology: A World Journal of the Sciences of Man, 2017, 58:175-190. doi: 10.1086/692729.
- [68] Whittau R, Vannieuwenhuyse D, Dotte-Sarout E, et al. Home is where the hearth is: Anthracological and microstratigraphic analyses of Pleistocene and Holocene combustion features, Riwi Cave (Kimberley, Western Australia) [J]. Journal of Archaeological Method & Theory, 2018, 25(3):739-776.
- [69] Shahack-Gross R, Berna F, Karkanas P, et al. Evidence for the repeated use of a central hearth at Middle Pleistocene (300 ky ago) Qesem Cave, Israel[J]. Journal of Archaeological Science, 2014, 44(4):12-21.
- [70] Wil Roebroeks, Erik Trinkaus. On the earliest evidence for habitual use of fire in Europe[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2011, 108(13):5209-5214.
- [71] Goldberg P, Berna F, Chazan M. Deposition and diagenesis in the earlier Stone Age of Wonderwerk Cave, Excavation 1, South Africa[J]. African Archaeological Review, 2015, 32(4):613-643.
- [72] 张健平, 吕厚远. 现代植物炭屑形态的初步分析及其古环境意义[J]. 第四纪研究, 2006, 26(5):857-863.
- Zhang Jianping, Lü Houyuan. Preliminary study of charcoal morphology and its environmental significance [J] Quaternary Sciences, 2006, 26(5):857-863.
- [73] Marguerie D, Hunot J Y. Charcoal analysis and dendrology: Data from archaeological sites in north-western France[J]. Journal of Archaeological Science, 2007, 34(9):1417-1433.
- [74] 吕静, 王宇飞, 李承森. 古炭屑与古森林火[J]. 古地理学报, 2002, 4(2):71-76.
- Lü Jing, Wang Yufei, Li Chengsen. Fossil charcoal and ancient

- forest fire[J]. *Journal of Palaeogeography*, 2002, 4(2):71–76.
- [75] 曹艳峰, 黄春长, 韩军青, 等. 黄土高原东西部全新世剖面炭屑记录的火环境变化[J]. 地理与地理信息科学, 2007, 23(1):92–96.
- Cao Yanfeng, Huang Chunchang, Han Junqing, et al. Changes of fire environment recorded by charcoal hided in Holocene profiles in the eastern and western Loess Plateau[J]. *Geography and Geo-Information Science*, 2007, 23(1):92–96.
- [76] 纪明, 沈吉, 张恩楼, 等. 星云湖地区过去137年生物质燃烧模式变化的湖泊沉积大炭屑记录研究[J]. 第四纪研究, 2018, 38(4):963–970.
- Ji Ming, Shen Ji, Zhang Enlou, et al. Biomass burning patterns around Lake Xingyun during the last 137 years based on a high-resolution analysis of macroscopic charcoal of lake sediment[J]. *Quaternary Sciences*, 2018, 38(4):963–970.
- [77] 李小强, 周新郢, 尚雪, 等. 黄土炭屑分级统计方法及其在火演化研究中的意义[J]. 湖泊科学, 2006, 18(5):540–544.
- Li Xiaoqiang, Zhou Xinyin, Shang Xue, et al. Different-(kPa/C) size method of charcoal analysis in loess and its significance in the study of fire variation[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2006, 18(5):540–544.
- [78] 郭小丽, 赵文伟, 孙静会, 等. 我国古环境中炭屑的研究现状与展望[J]. 冰川冻土, 2011, 33(2):342–348.
- Guo Xiaoli, Zhao Wenwei, Sun Jinghui, et al. Advances of charcoal study for paleoenvironment in China[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2011, 33(2):342–348.
- [79] 马春梅, 王冰翎, 刘泽雨, 等. 浙江田螺山遗址区孢粉学记录的中全新世植被、环境和人类活动初步研究[J]. 第四纪研究, 2018, 38(5):1304–1312.
- Ma Chunmei, Wang Bingling, Liu Zeyu, et al. A preliminary study on vegetation, environment and human activity of pollen records during Middle-Late Holocene in Tianluoshan site, Ningshao Plain[J]. *Quaternary Sciences*, 2018, 38(5):1304–1312.
- [80] 高鑫, 贾铁飞, 许清海, 等. 湖北中洲子牛轭湖最近70年孢粉-炭屑记录及其对气候和人类活动的响应[J]. 第四纪研究, 2016, 36(6):1445–1455.
- Gao Xin, Jia Tiefei, Xu Qinghai, et al. Records of lacustrine sedimentology and pollen-charcoal assemblages responding to climate change and human activities in Zhongzhouzi Oxbow Lake, Hubei Province for about 70 years[J]. *Quaternary Sciences*, 2016, 36(6):1445–1455.
- [81] 吴瑾光. 近代傅里叶变换红外光谱技术及应用[M]. 北京: 科学技术文献出版社, 1994:1–722.
- Wu Jingguang. *Modern Fourier Transform Infrared Spectrum Technology and Its Application*[M]. Beijing: Scientific and Technical Documentation Press, 1994:1–722.
- [82] 郭怡, 项晨, 夏阳, 等. 中国南方古人骨中羟磷灰石稳定同位素分析的可行性初探——以浙江省庄桥坟遗址为例[J]. 第四纪研究, 2017, 37(1):143–154.
- Guo Yi, Xiang Chen, Xia Yang, et al. Preliminary study on the feasibility of hydroxyapatite stable isotope analysis of ancient human bone in South China: Take the Zhuangqiaofen site, Zhejiang Province as an example[J]. *Quaternary Sciences*, 2017, 37(1):143–154.
- [83] Mareike C Stahlschmidt, Christopher E Miller, Bertrand Ligouis, et al. On the evidence for human use and control of fire at Schoningen[J]. *Journal of Human Evolution*, 2015, 89:181–201. doi:10.1016/j.jhevol.2015.04.004.
- [84] Rey C, Renugopalakrishnan V, Collins B, et al. Fourier transform infrared spectroscopic study of the carbonate ions in bone mineral during aging[J]. *Calcified Tissue International*, 1991, 49(4):251–258.
- [85] Carranco Á, Villalain J J. Different mechanisms of magnetisation recorded in experimental fires: Archaeomagnetic implications[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2011, 312(1–2):176–187.
- [86] Dunlop D J, Özdemir Ö. *Rock Magnetism: Fundamentals and Frontiers*[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1997: 74–75.
- [87] 姜兆霞, 刘青松. 赤铁矿的定量化及其气候意义[J]. 第四纪研究, 2016, 36(3):676–689.
- Jiang Zhaoxia, Liu Qingsong. Quantification of hematite and its climatic significances[J]. *Quaternary Sciences*, 2016, 36(3):676–689.
- [88] Jordanova N, Petrovsky E, Kovacheva M, et al. Factors determining magnetic enhancement of burnt clay from archaeological sites[J]. *Journal of Archaeological Science*, 2001, 28(11):1137–1148.
- [89] Carranco Á, Villalain J J, Angelucci D E, et al. Rock-magnetic analyses as a tool to investigate archaeological fired sediments: A case study of Mirador cave (Sierra de Atapuerca, Spain) [J]. *Geophysical Journal International*, 2009, 179(1):79–96.
- [90] Bellomo R V. A methodological approach for identifying archaeological evidence of fire resulting from human activities[J]. *Journal of Archaeological Science*, 1993, 20(5):525–553.
- [91] Church M J, Peters C, Batt C M. Sourcing fire ash on archaeological sites in the western and northern Isles of Scotland, using mineral magnetism[J]. *Geoarchaeology—An International Journal*, 2007, 22(7):747–774.
- [92] 周斌, 沈承德, 郑洪波, 等. 黄土高原中部晚第四纪以来植被演化的元素碳碳同位素记录[J]. 科学通报, 2009, 54(9):1262–1268.
- Zhou Bin, Shen Chengde, Zheng Hongbo, et al. Vegetation evolution on the central Chinese Loess Plateau since Late Quaternary evidenced by elemental carbon isotopic composition[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2009, 54(12):2082–2089.
- [93] Zhou B, Shen C D, Sun W D, et al. Late Pliocene-Pleistocene expansion of C_4 vegetation in semiarid East Asia linked to increased burning[J]. *Geology*, 2014, 42(12):1067–1070.

A REVIEW OF STUDY METHODS AND PROGRESS ON HOMINID USE OF FIRE

Hu Yuanfeng, Zhou Bin, Pang Yang, Xu Xiangchun

(Key Laboratory of Earth Surface Geochemistry, Ministry of Education, School of Earth Sciences and Engineering, Nanjing University, Nanjing 210023, Jiangsu)

Abstract

The use of fire has played a very important role in the process of human evolution. The academic community has done a lot of research on the history of human use of fire, with improving technique and methods. The systematic investigation and summary of related literatures on ancient human fire from Wonderwerk cave, Cape Town, South Africa, Qesem cave, Zhoukoudian in Beijing and Huanglong cave in Hubei Province, have been processed. It is found that the cultural and archaeological data of sites should be obtained firstly to determine whether fire events had ever happened, and then what fuels have been burned and how did the events related with human activities. We suppose that there is no single method to determine the information on Hominin control of fire in the early-mid Pleistocene, and a combination of multiple methods is necessary to get more accurate conclusions. Selecting macroscopic morphological analysis including hearth, and/or burning bones, and/or burning stones to preliminarily judge the area of fire activities, followed by using FTIR, elemental carbon content analysis and other geochemical methods including magnetic susceptibility and color measurements to determine the exact evidence of fire events, and then using micro-morphological and micro-stratigraphic analysis to systematically study the complete sediments to reveal the possibility of in-situ fire. At present, hominid control of fire in those sites we mentioned above is believed to have been occurred. Due to the usual lack or disturbance of those macroscopic morphological and/or micro-morphological evidences, stable carbon isotopes of elemental carbon should be a beneficial supplementary technique, which has been widely applied in studying the relationships among vegetation, climate and human activities. The introduce of stable carbon isotopes into hominin fire research can provide new aspects in this field.

Key words: hominin control of fire; Paleolithic; geochemical burning evidence; charcoal; elemental carbon (black carbon); stable carbon isotope

版权声明

为适应我国信息化建设,扩大本刊及作者知识信息交流渠道,本刊已加入“万方数据千种精品核心刊”计划,被中国核心期刊遴选数据库收录,并通过万方数据资源系统及其镜像系统等对外提供无偿或有偿信息服务,其作者文章著作权使用费与本刊稿酬一次性给付。本刊可免费提供作者文章引文统计分析资料。如作者不同意文章被收录,请在来稿时向本刊声明,本刊将作适当处理。