

# 周口店第1地点用火的磁化率和色度证据

张岩<sup>①②</sup>, 郭正堂<sup>①\*</sup>, 邓成龙<sup>③</sup>, 张双权<sup>④</sup>, 吴海斌<sup>①</sup>, 张春霞<sup>①</sup>, 葛俊逸<sup>④</sup>, 赵得爱<sup>⑤</sup>,  
李琴<sup>①②</sup>, 宋扬<sup>①②</sup>, 朱日祥<sup>③</sup>

① 中国科学院地质与地球物理研究所新生代地质与环境重点实验室, 北京 100029;

② 中国科学院大学地球科学学院, 北京 100049;

③ 中国科学院地质与地球物理研究所, 岩石圈演化国家重点实验室, 北京 100029;

④ 中国科学院古脊椎动物与古人类研究所脊椎动物演化与人类起源重点实验室, 北京 100044;

⑤ 中国地质大学地球科学学院, 武汉 430074

\* 联系人, E-mail: ztguo@mail.iggcas.ac.cn

2013-09-05 收稿, 2013-11-14 接受, 2014-01-24 网络版发表

科技部科技基础性工作专项(2007FY110200)资助

**摘要** 针对周口店北京猿人遗址是否存在原地用火证据的争议, 对遗址第1地点第4堆积层(据贾兰坡 1959 划分方案)中新发现的疑似用火遗迹进行系统野外采样以及磁化率和色度测量. 结果显示, 部分疑似用火区沉积物的磁化率、红度均显著异常, 磁化率值较周围沉积物高出 22 倍, 红度高出近 3 倍. 高磁化率值和高红度值分别由高温作用过程中新生成的细粒磁铁矿和赤铁矿颗粒引起. 漫反射光谱分析表明, 疑似用火区沉积物的赤铁矿-针铁矿组成与平面其他部位及第 2, 3 地点自然样品显著不同. 磁化率随温度变化特征进一步揭示出疑似用火区沉积物很可能经历了 700 以上的加热, 而自然火一般无法达到如此高的温度. 这些磁性、色度异常的沉积物很可能受到人类控制用火的作用, 但其为原地用火区堆积还是曾经历再搬运, 还需要进一步研究.

## 关键词

周口店  
控制用火  
磁化率  
色度  
岩石磁学

控制用火是远古人类最重要的生存技能之一, 至今已有 0.5 Ma, 甚至 1.0 Ma 以上的历史<sup>[1-4]</sup>. 周口店古人类遗址是保存有最早的确切用火证据的遗址之一<sup>[5-7]</sup>. 二十世纪二三十年代周口店遗址第 1 地点主堆积发掘过程中, 陆续发现明显炭化或部分经煅烧的动物骨骼、鹿角以及“黑土”等, 化学分析结果证实其为“中国猿人用火遗迹”<sup>[5]</sup>. 随后的发掘过程中, 又发现了烧石、紫荆树炭块、灰烬层等遗迹<sup>[8]</sup>. 郭士伦等人<sup>[9,10]</sup>在针对第 1 地点第 10 及第 4 堆积层的裂变径迹年代测定中, 发现灰烬样品中的榍石具明显的加热退火特征, 也证明燃烧作用的存在. 裂变径迹、电子自旋共振(ESR)、古地磁等多种手段的测年结果显示, 第 10 堆积层年代约为距今 50 万年<sup>[1,9,11-13]</sup>, 最新的石英 <sup>26</sup>Al/<sup>10</sup>Be 埋藏年龄测试结果达到 70 多万

年<sup>[2]</sup>. 第 1 地点发现的丰富用火遗存, 在当时将人类控制用火的历史大大提前.

但近年来, 一些学者对周口店遗址原地人类控制用火遗迹的存在提出质疑<sup>[14,15]</sup>. 他们认为第 1 地点既未发现灰烬或灰烬残余(如“硅质聚集体” siliceous aggregates), 也未发现特征的“火塘”结构, 过去认为的用火堆积具细层理构造, 为水流搬运沉积, 且认为遗址大部分细粒沉积物均为水流搬运而来. 在这种情况下, 发现的炭屑、烧骨等用火证据的来源具有不确定性, 无法作为人类用火的证据. 然而, 我国学者<sup>[16,17]</sup>认为, Weiner 等学者仅对第 1 地点局部少数沉积物进行了研究, 忽略了前人大量的研究成果, 结论并不具说服力.

针对考古遗址的磁学研究发现, 燃烧可导致土

**引用格式:** 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. 科学通报, 2014, 59: 679-686

**英文版见:** Zhang Y, Guo Z T, Deng C L, et al. The use of fire at Zhoukoudian: Evidence from magnetic susceptibility and color measurements. Chin Sci Bull, 2014, 59, doi: 10.1007/s11434-013-0111-7

壤及其他沉积物磁性显著增强<sup>[18,19]</sup>,原因是加热过程中新生成了磁铁矿、磁赤铁矿等强磁性矿物<sup>[20]</sup>.因此,磁学方法被广泛应用于考古材料的研究<sup>[20-24]</sup>.各种燃烧条件实验<sup>[25-28]</sup>结果也表明,磁学方法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.

沉积物经烘烤会发生颜色变化.研究显示,针铁矿加热至250~400℃时可脱羟基形成赤铁矿<sup>[29]</sup>.赤铁矿为典型的染色矿物,其含量的增加会导致沉积物变红.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贡献者<sup>[28,30]</sup>.因此,系统的色度测量对沉积物磁性矿物组成及变化有重要的指示意义.

2009年开始的周口店遗址保护性清理发掘过程中<sup>[31]</sup>,在第1地点西壁剖面第4堆积层<sup>[32]</sup>中发现了一系列疑似用火遗迹.我们对第4堆积层的发掘平面进行了系统采样,对样品进行磁化率、色度测试及数据的平面制图,以期确定疑似用火区域的分布范围和变化特征.在此基础上,选择典型样品进行详细的磁化率随温度变化特征( $\chi-T$ 曲线)和漫反射光谱(DRS)分析,进一步探讨高磁化率值和高红度值区域的形成机制.

## 1 材料与方法

疑似用火遗迹位于周口店遗址第1地点第4层顶部向下约1 m深度,考古发掘面积约为30 m<sup>2</sup>.平面沉积物以粉砂质为主,见不同程度钙质胶结.平面上散落分布直径约20 cm至近1 m的灰岩角砾,可能为洞顶或洞壁的剥落物<sup>[33]</sup>.疑似用火区位于发掘平面南北两端.平面北部考古探方N119E71中部可见灰黑色、红棕色、棕黄色粉砂质沉积物呈斑点及条带状分布,其周围可见砾石形似环状排列,砾石直径约2~27 cm,本文将此区域定名为H1(野外定名HT1)(图1(a)).H1西北侧,探方N120E69与N120E70交界处的沉积物呈浅砖红色,为平面北端另一处疑似用火区,本文定名为H2(图1(b)).平面南端疑似用火区位于探方N114E69及N115E69的南部,沉积物呈橙红色,与周围黄棕色沉积物近突变接触,本文定名H3(野外定名HT3)(图1(c)).野外观察未见水平、平行层理等,沉积物微结构有待进一步研究.

为捕捉平面沉积物的细节变化,确定用火区范围,我们对各考古探方(1 m×1 m)进一步平均分格采

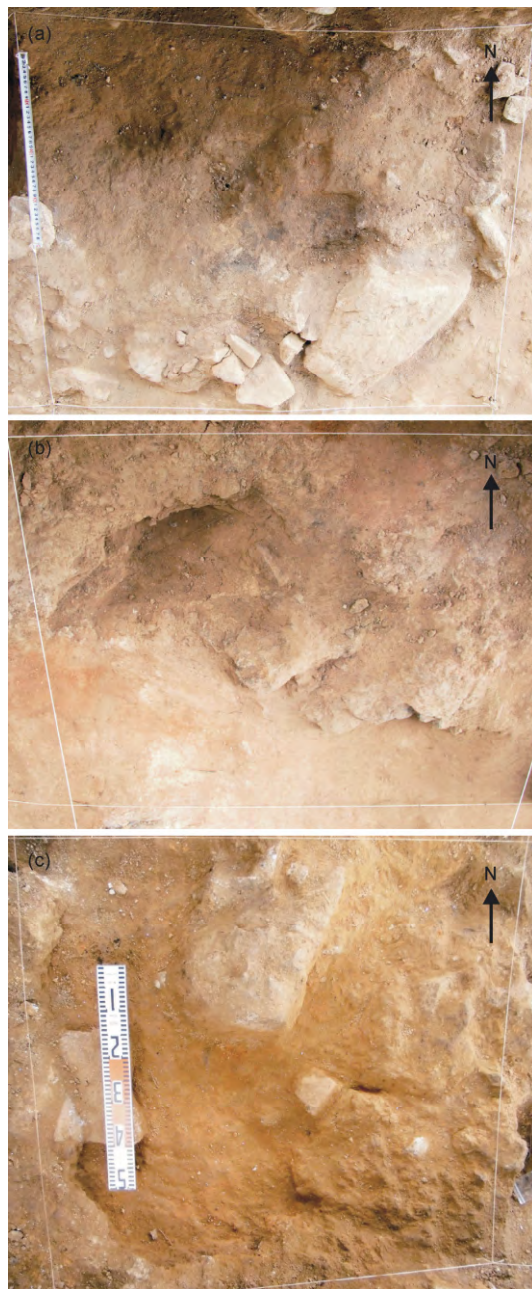


图1 周口店遗址第1地点第4堆积层疑似用火区H1(a), H2(b)和H3(c)野外照片  
照片中白色线为1 m×1 m考古探方边界线

样,在疑似用火区及其周边区域每探方采集36个样品,平面其他区域根据沉积物均一程度及胶结程度每探方采集9~24个样品.根据采样位置,采取“探方编号+探方内小格编号”的规则对样品进行编号,如样品N119E71 C3代表探方N119E71中C行(由南向北分为A~F共6行)第3列(由西向东分为1~6列).此

外,在第1地点附近采集4份表土样品,与考古发掘平面沉积物进行磁化率对比;在遗址第2地点及第3地点分别采集一个自然条件下形成的红色调沉积物<sup>[34,35]</sup>,与疑似用火区同色调沉积物进行对比分析,以探讨疑似用火区红色调沉积物的成因。

样品首先在室内自然风干,然后进行色度和磁化率测量.色度测试使用 KONICA MINOLTA CM-700d 色彩色差仪,颜色表述采用  $L^*a^*b^*$  颜色空间法,色度值标准偏差小于  $\Delta E^*_{ab} 0.04$ ,共测试样品 401 个。

低频和高频磁化率测量使用 MFK1-FA 多频磁化率仪,测试频率分别为 976 Hz (低频磁化率  $\chi_{LF}$ )及 15616 Hz (高频磁化率  $\chi_{HF}$ ),仪器分析精度为 0.1%,共测试样品 405 个.并计算频率磁化率( $\chi_{FD}=\chi_{LF}-\chi_{HF}$ )及其百分数( $\chi_{FD}\%=\chi_{FD}/\chi_{LF}\times 100\%$ )。

在色度及磁化率测试的基础上,我们在疑似用火区和非用火区选取代表性样品进行 DRS 和  $\chi$ -T 曲线测量。

首先,选择 8 个平面代表性样品,并选择采自第 2、第 3 地点的两个样品作为对照,使用 Varian Cary 5000 分光光度计进行 DRS<sup>[36]</sup>测试,仪器测量精度为 0.5%。利用 Torrent 和 Barrón<sup>[36]</sup>的方法对赤铁矿、针铁矿的相对含量进行半定量估算。

然后,在疑似用火区和非用火区各选择一个代表性样品进行  $\chi$ -T 曲线测量.  $\chi$ -T 曲线使用 KLY-3 卡帕桥及 CS-3 温度装置在氩气环境下进行测试.加热速率为 11 /min.我们将每个样品分成 2 份,对第一份样品仅进行最高温度为 700 的一个加热/冷却循环,对第二份样品进行分步加热,最高温度设定为 100~700 (即以 100 为间隔,共 7 个加热/冷却循环)。

## 2 结果

图 2 为低频磁化率、红度、频率磁化率的平面等值线图.  $\chi_{LF}$  的分布见图 2(a),其值在  $36\times 10^{-8}\sim 1773\times 10^{-8} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$  之间变化,两个明显的高值区分别位于平面南北两端,其他区域  $\chi_{LF}$  较低且变化不大.南侧高值区与野外划定的疑似用火区 H3 基本一致,分布较集中,平面磁化率最高值即出现在 H3 内 N114E69 C3 处,可达其相邻磁化率低值区的 22 倍.平面北部  $\chi_{LF}$  高值区面积较大,约  $4 \text{ m}^2$ ,磁化率值明显低于 H3 区,其最高值  $961\times 10^{-8} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$  出现在 H2 中,最大值可达其相邻区域磁化率低值的 20 倍.H1 区  $\chi_{LF}$  最高值为  $514\times 10^{-8} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$ .而采自龙骨山的 4 份表土样品磁化率值均小于  $180\times 10^{-8} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$ 。

图 2(b)为沉积物红度平面等值线图.红度变化范

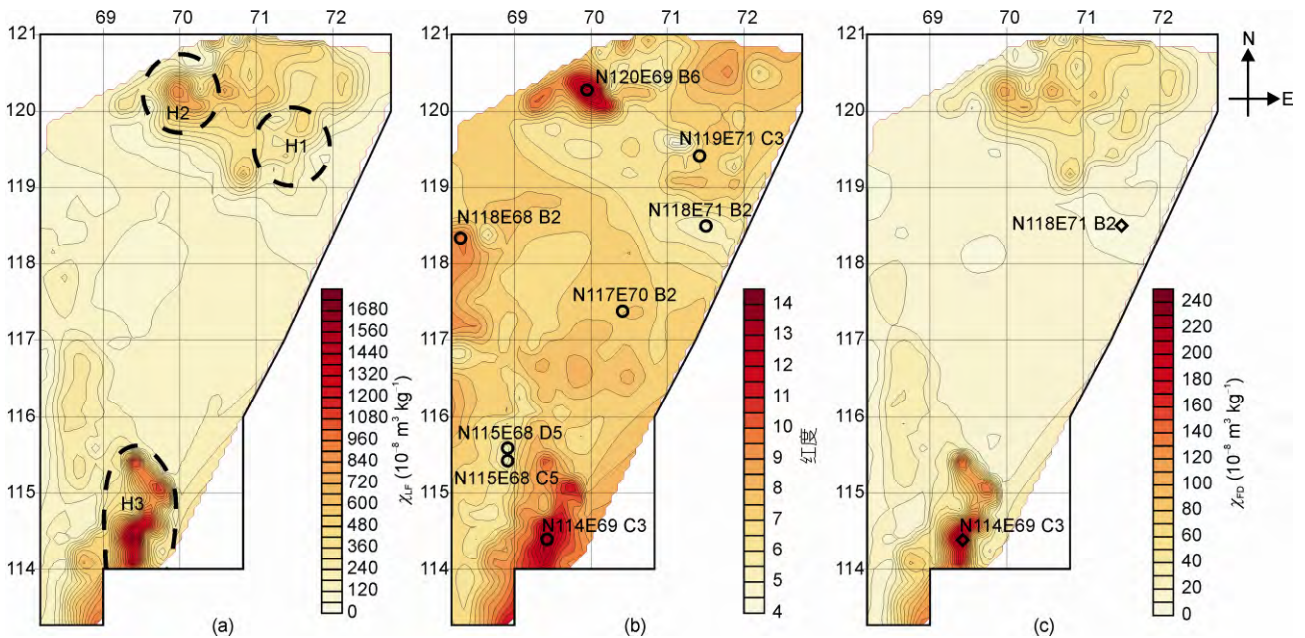


图 2 周口店遗址第 1 地点第 4 堆积层平面沉积物低频磁化率(a),红度(b)及频率磁化率(c)等值线图

黑色粗边框表示发掘面范围,网格表示发掘探方,外侧数字为考古发掘坐标,各探方均以该坐标位置命名.(a)中虚线所示范围为野外划定的疑似用火区域.(b)中黑色圈号指代 DRS 样品位置(N119E71 C3, N114E69 C3, N120E69 B6 为疑似用火区样品; N115E68 C5, N115E68D5, N117E70 B2, N118E68 B2, N118E71 B2 为其他区域样品).(c)中菱形指代  $\chi$ -T 样品位置

围为 4.6~14.3, 平面南侧红度高值区分布范围与  $\chi_{LF}$  非常相似, 最高值为 13.8, 与  $\chi_{LF}$  最高值在同一点上. 平面北部红度高值主要分布在 H2 区, 与野外观察一致, 最高值 14.3, 也与北侧  $\chi_{LF}$  最高值在同一位置. H1 区红度值则较低, 最高仅为 8.1. 此外, 平面西侧两个探方 N118E68 和 N117E68 红度值也较高(最高值为 9.9), 但低于南北高值区, 且均具较低的  $\chi_{LF}$ . 第 2、第 3 地点的两个样品同样具较高的红度值, 分别为 11.3 及 10.6, 但二者的  $\chi_{LF}$  与疑似用火区相比则较低, 分别为  $120 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$  及  $153 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$ .

频率磁化率及其百分数 ( $\chi_{FD}$ ,  $\chi_{FD}\%$ ) 可以有效反映细颗粒(主要是处于超顺磁/单畴边界附近的颗粒)磁性矿物的含量<sup>[37]</sup>. 从平面分布上来看,  $\chi_{FD}$  高值分布范围与  $\chi_{LF}$  基本一致(图 2(c)), 二者呈非常好的线性相关关系(图 3(a)).  $\chi_{FD}\%$  平均值为 11%, 最大值达 15%,

说明样品中含有大量超顺磁/单畴(SP/SD)边界的磁性颗粒, 尤其是在  $\chi_{LF}$  较高的疑似用火区(图 3(b)).

疑似用火区样品 N114E69 C3 及非用火区样品 N118E71 B2 的  $\chi$ - $T$  曲线如图 4. 图 4(a)和(i)表示最高温度为 700 的  $\chi$ - $T$  曲线, 两个样品的加热曲线均在 ~580 接近 0, 指示磁铁矿的居里温度; 此外, 最显著的特征是疑似用火区样品 N114E69 C3 的  $\chi$ - $T$  曲线基本可逆(图 4(a)), 而非用火区样品 N118E71 B2 的  $\chi$ - $T$  曲线明显不可逆, 冷却曲线位于加热曲线上方(图 4(i)). 这说明疑似用火区样品 N114E69 C3 在加热过程中基本没有强磁性矿物生成, 生成强磁性矿物所需的热不稳定的含铁硅酸盐或黏土矿物已经消耗殆尽<sup>[38]</sup>; 而非用火区样品 N118E71 B2 不可逆的  $\chi$ - $T$  曲线表明在加热过程中生成了大量的强磁性矿物, 冷却曲线在 ~580 的转折说明新生成的磁性矿物应为磁铁矿.

为了进一步揭示疑似用火区样品和非用火区样品  $\chi$ - $T$  曲线的可逆性特征, 我们测量了其分步加热的  $\chi$ - $T$  曲线<sup>[39]</sup>. 图 4(b)~(h)为疑似用火区样品 N114E69 C3 的分步加热曲线, 结果显示, 除了 400 的曲线外(图 4(e)), 其他温度点的  $\chi$ - $T$  曲线均基本可逆, 说明在加热过程中该样品未发生明显的磁性矿物转化, 这也进一步支持上文的推论, 即疑似用火区样品 N114E69 C3 中已经基本不含有生成强磁性矿物所需的热不稳定的含铁硅酸盐或黏土矿物. 非用火区样品 N118E71 B2 的分步加热  $\chi$ - $T$  曲线显示, 100~500 的曲线基本可逆(图 4(j)~(n)), 而 600 和 700 的冷却曲线均明显高于加热曲线(图 4(o),(p)), 这说明该样品中明显含有热不稳定的含铁硅酸盐或黏土矿物, 一旦达到合适的温度即转化生成新的强磁性矿物(主要是磁铁矿), 这也表明该样品至少没有经历过 600 以上高温的长期作用. 综合上述  $\chi$ - $T$  曲线结果, 我们认为疑似用火区样品较非用火区样品含有更多的磁铁矿, 原因很可能是前者经历过 700 以上的高温加热.

DRS 结果显示(图 5), 所测样品中均含针铁矿及赤铁矿. 其中红度值高的样品(N120E69 B6, N114E69 C3, N118E68 B2 及第 2, 3 地点样品)赤铁矿相对含量高, 红度值低的样品赤铁矿相对含量低. 半定量估算结果表明, 疑似用火区 H2 及 H3 样品针铁矿相对含量低于赤铁矿, H1 样品针铁矿相对含量稍高于赤铁矿(~1.5 倍), 其他平面样品针铁矿含量均显著高于赤

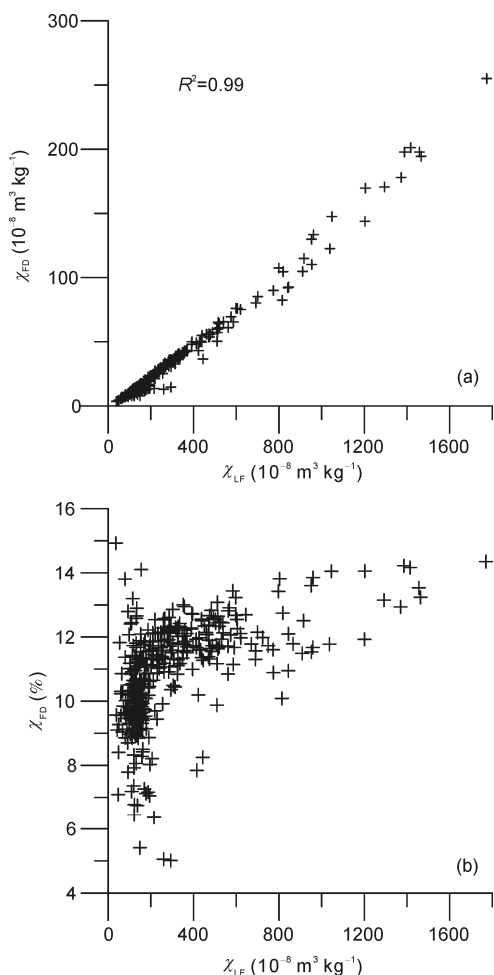


图 3 周口店遗址第 1 地点第 4 堆积层样品  $\chi_{LF}$  与  $\chi_{FD}$  (a),  $\chi_{LF}$  与  $\chi_{FD}\%$  (b) 之间的关系

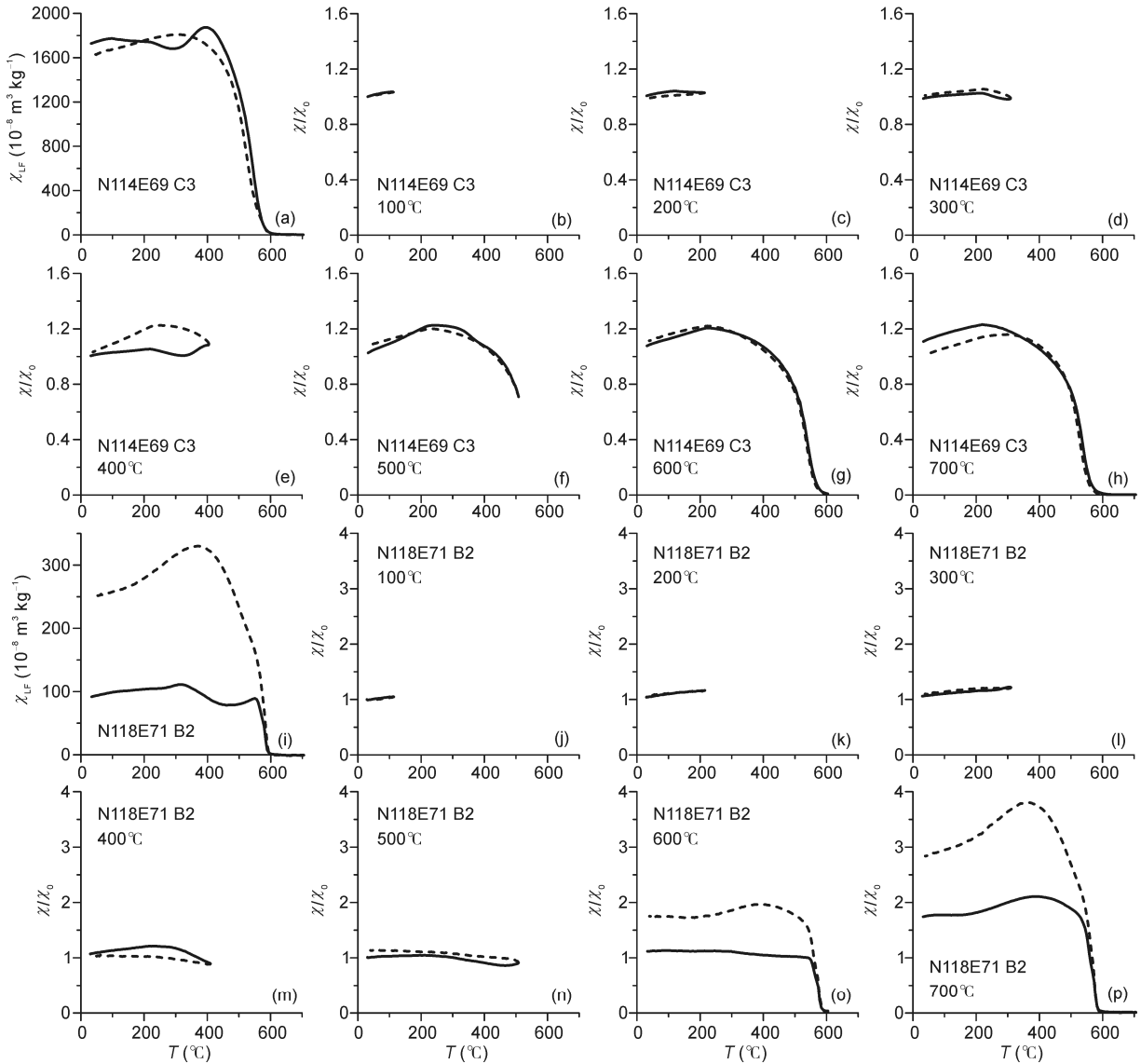


图4 周口店遗址第1地点第4堆积层疑似用火区及非用火区典型样品的 $\chi-T$ 曲线

(a), (i)分别为样品 N114E69 C3 及 N118E71 B2 直接加热至 700 结果; (b)~(h) 样品 N114E69 C3 最高温度设置为 100~700 的分步加热结果; (j)~(p) 样品 N118E71 B2 最高温度设置为 100~700 的分步加热结果. 实线为加热曲线, 虚线为冷却曲线

铁矿含量. 第2, 3地点样品针铁矿相对含量显著高于绝大多数第1地点的平面样品(除 N118E68 B2, 三者针铁矿相对含量接近), 其赤铁矿相对含量明显高于平面非用火区样品, 但低于疑似用火区样品.

综上所述, 疑似用火区样品磁性矿物主要为磁铁矿、赤铁矿和少量的针铁矿, 非用火区样品磁性矿物为磁铁矿、针铁矿和少量赤铁矿. 沉积物磁化率的差异主要受磁铁矿含量控制, 红度的差异主要受赤铁矿含量控制, 疑似用火区沉积物的高磁化率值和高红度值分别来自加热过程中新生成的大量细粒

(SP/SD 边界附近)磁铁矿和赤铁矿颗粒.

### 3 讨论

前人用火实验结果显示, 营火等人类控制用火(一般情况下, 燃烧会集中在一个地点, 并持续一定时间或反复发生)造成的沉积物磁化率增强可达周围未经加热样品磁化率的 50%<sup>[25]</sup>, Carrancho 和 Villalain<sup>[20]</sup>的实验结果更显示燃烧后沉积物磁化率值最高可达燃烧前的 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<sup>[25]</sup>,

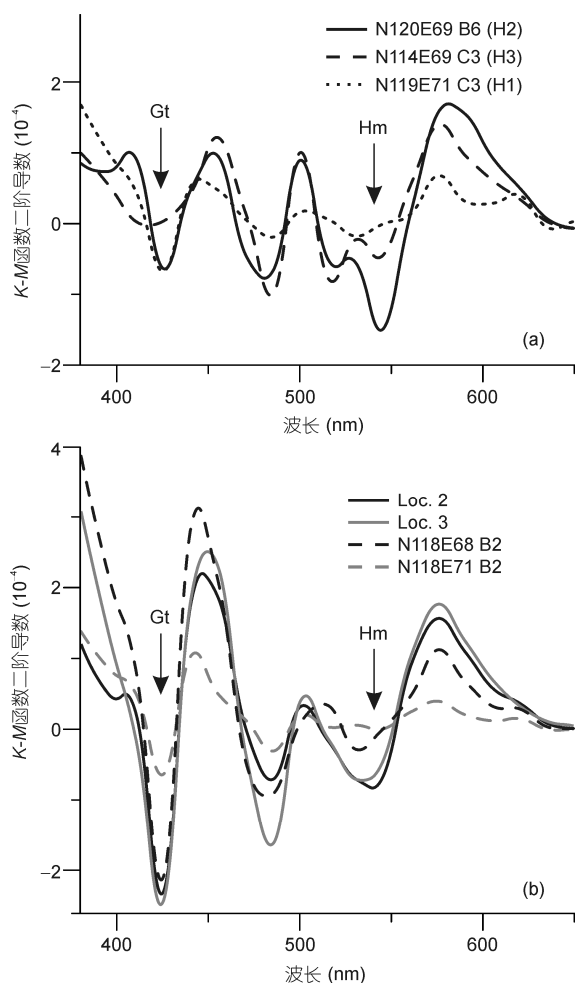


图5 周口店遗址第1地点第4堆积层典型样品DRS结果的K-M函数二阶导数曲线

(a) 疑似用火区样品结果; (b) 平面其他区域及第2(Loc. 2), 3地点(Loc. 3) 样品结果. Gt 指示针铁矿吸收带(~425 nm), Hm 指示赤铁矿吸收带 (~535 nm)<sup>[36,40]</sup>

主要原因在于二者燃烧温度的差异. 营火等人类控制用火燃烧中心区地表温度可达 600 以上, 最高可达 860 , 燃烧区周边地表温度则急剧降低, 一般小于 300 <sup>[20,21,25,26,41]</sup>. 自然火无法达到与营火等人类控制用火相当的温度, 一般小于 300 , 不能提供足够的热量以造成沉积物磁学性质的显著改变<sup>[25]</sup>. 周口店遗址位于碳酸盐岩区, 基岩磁化率非常低, 遗址附近表土磁化率也低于  $180 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$ . 而第1地点新发现的疑似用火作用沉积物磁化率显著高于平面其他区域以及第2, 3地点自然样品及表土样品, 说明其很可能经历了高温烘烤; 热磁分析(即  $\chi$ -T 曲线) 结果则进一步表明, 疑似用火区沉积物很可能经历

了 700 以上的高温加热. 由于自然火不太可能造成疑似用火区沉积物如此显著的磁化率增强, 因而此结果更可能反映人类控制用火作用.

如前文所述, 含铁硅酸盐或黏土矿物在加热过程中新生成强磁性矿物(如磁铁矿), 可导致沉积物磁性显著增强<sup>[28,38,42]</sup>. 此外, 针铁矿广泛存在于各类沉积物中, 其加热至 250~400 时可脱羟基形成赤铁矿<sup>[29]</sup>, 导致沉积物红度增加. DRS 结果显示, 样品中均含针铁矿; H3 及 H2 样品的针铁矿含量小于赤铁矿含量, H1 样品针铁矿含量虽略大于赤铁矿, 但与非用火区样品及第2, 3地点样品也有显著差异, 说明疑似用火区沉积物中针铁矿的减少很可能是由于加热转化为赤铁矿, 而新生的赤铁矿造成 H2 及 H3 区域沉积物色调显著偏红. 第2, 3地点样品虽然同样具有较高的红度值, 但低磁化率及高针铁矿相对含量指示, 红色调应由风化成壤作用生成的赤铁矿造成. 赤铁矿磁化率值较低, 其含量增加并不能造成沉积物磁化率的显著增强, 但其在 400 以上的高温还原条件下会转化为磁铁矿<sup>[28,43,44]</sup>, 导致磁化率增强, 而  $\chi$ -T 曲线结果指示疑似用火区沉积物曾受 700 以上的高温加热.

加热还可能改变磁性矿物颗粒的大小. 由针铁矿脱羟基形成的赤铁矿一般为 SP 颗粒<sup>[29]</sup>, 前人对考古遗址的研究结果也显示, 大量细粒(SD 及 SP)磁铁矿、磁赤铁矿及赤铁矿颗粒在加热过程中形成<sup>[23]</sup>, “烧土”中也检测到大量的 SP 磁铁矿颗粒, 它们造成沉积物磁化率显著升高<sup>[30]</sup>. 沉积物频率磁化率平面分布特征也显示, 疑似用火区含大量的 SP/SD 边界附近的磁铁矿颗粒, 是导致该区域高磁化率值的主要因素, 这些磁铁矿颗粒很可能在人类控制用火过程中形成.

#### 4 结论

本次研究针对周口店遗址第1地点第4堆积层新发现的疑似用火遗迹沉积物, 及与其处于同一平面的其他沉积物进行详细的磁化率和色度研究, 得出如下结论:

第一, 疑似用火区沉积物的磁化率及红度值显著偏高, 尤其是南侧疑似用火区 H3, 低频磁化率最大可达周围沉积物的 22 倍,  $\chi$ -T 曲线结果指示其很可能经历了 700 以上的高温加热, 其他区域则未见明显高温作用痕迹; 第二, 高温加热导致细颗粒磁铁矿

和赤铁矿生成,造成沉积物磁化率和红度显著增强; 能指示人类控制用火行为,但这些用火遗迹是原地第三,700 的高温是自然火活动难以实现的,很可能形成还是曾经历再搬运,还需要进一步研究。

**致谢** 感谢中国科学院古脊椎动物与古人类研究所高星研究员、张乐博士等在野外工作过程中的帮助。感谢中国科学院地质与地球物理研究所李仕虎、蔡书慧、郑妍、李倩、吴百灵、葛坤鹏、孔艳芬、孙露、刘素贞等在采样和实验过程中的帮助。色度测试在中国科学院地质与地球物理研究所新生代地质与环境重点实验室完成,磁学和漫反射光谱实验在中国科学院地质与地球物理研究所古地磁学与地质年代学实验室完成。

## 参考文献

- 1 赵树森,裴静娴,郭世伦,等.北京猿人遗址年代学的研究.见:吴汝康,等,编.北京猿人遗址综合研究.北京:科学出版社,1985.239-240
- 2 Shen G, Gao X, Gao B, et al. Age of Zhoukoudian *Homo erectus* determined with  $^{26}\text{Al}/^{10}\text{Be}$  burial dating. *Nature*, 2009, 458: 198-200
- 3 Weiner S. *Microarchaeology: Beyond the Visible Archaeological Record*. New York: Cambridge University Press, 2010. 165
- 4 Berna F, Goldberg P, Horwitz L K, et al. Microstratigraphic evidence of in situ fire in the Acheulean strata of Wonderwerk Cave, Northern Cape province, South Africa. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2012, 109: E1215-E1220
- 5 Black D. Evidences of the use of fire by *Sinanthropus*. *Bull Geol Soc China*, 1932, 11: 107-108
- 6 James S R. Hominid use of fire in the Lower and Middle Pleistocene: A review of the evidence. *Curr Anthropol*, 1989, 30: 1-26
- 7 Renfrew C, Bahn P. *Archaeology: Theories, Methods and Practice*. London: Thames and Hudson, 1991
- 8 贾兰坡,黄慰文.周口店发掘记.天津:天津科技出版社,1984
- 9 郭士伦,周书华,孟武,等.用裂变径迹法测定北京猿人年代.科学通报,1980,25: 770-772
- 10 郭士伦,刘顺生,孙盛芬,等.北京猿人遗址第四层裂变径迹法年代测定.人类学学报,1991,10: 73-77
- 11 刘顺生,张峰,胡瑞英,等.裂变径迹法在北京猿人年代测定中的应用.见:吴汝康,编.北京猿人遗址综合研究.北京:科学出版社,1985.241-245
- 12 钱方,张景鑫,殷伟德.周口店第一地点西壁及探井堆积物磁性地层的研究.见:吴汝康,编.北京猿人遗址综合研究.北京:科学出版社,1985.251-255
- 13 Grün R, Huang P H, Wu X, et al. ESR analysis of teeth from the palaeoanthropological site of Zhoukoudian, China. *J Hum Evol*, 1997, 32: 83-91
- 14 Weiner S, Xu Q, Goldberg P, et al. Evidence for the use of fire at Zhoukoudian, China. *Science*, 1998, 281: 251-253
- 15 Goldberg P, Weiner S, Bar-Yosef O, et al. Site formation processes at Zhoukoudian, China. *J Hum Evol*, 2001, 41: 483-530
- 16 Wu X. Investigating the possible use of fire at Zhoukoudian, China. *Science*, 1999, 283: 299
- 17 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.人类学学报,1998,17: 318-329
- 18 Le Borgne E. Susceptibilité magnétique anormale du sol superficiel. *Ann Geophys*, 1955, 11: 399-419
- 19 Le Borgne E. Influence du feu sur les propriétés magnétiques du sol et sur celles du schiste et du granite. *Ann Geophys*, 1960, 16: 159-195
- 20 Carrancho Á, Villalaín J J. Different mechanisms of magnetisation recorded in experimental fires: Archaeomagnetic implications. *Earth Planet Sci Lett*, 2011, 312: 176-187
- 21 Linford N T, Canti M G. Geophysical evidence for fires in antiquity: Preliminary results from an experimental study. *Archaeol Prospect*, 2001, 8: 211-225
- 22 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. *Geoarchaeology*, 2007, 22: 747-774
- 23 Herries A I R, Kovacheva M, Kostadinova M, et al. Archaeo-directional and -intensity data from burnt structures at the Thracian site of Halka Bunar (Bulgaria): The effect of magnetic mineralogy, temperature and atmosphere of heating in antiquity. *Phys Earth Planet Inter*, 2007, 162: 199-216
- 24 Brown K S, Marean C W, Herries A I R, et al. Fire as an engineering tool of early modern humans. *Science*, 2009, 325: 859-862
- 25 Bellomo R V. A Methodological approach for identifying archaeological evidence of fire resulting from human activities. *J Archaeol Sci*, 1993, 20: 525-553
- 26 Morinaga H, Inokuchi H, Yamashita H, et al. Magnetic detection of heated soils at Paleolithic sites in Japan. *Geoarchaeology*, 1999, 14: 377-399

- 27 Maki D, Homburg J A, Brosowske S D. Thermally activated mineralogical transformations in archaeological hearths: inversion from magnetite  $\gamma\text{Fe}_2\text{O}_3$  phase to haematite  $\alpha\text{Fe}_2\text{O}_3$  form. *Archaeol Prospect*, 2006, 13: 207–227
- 28 Carrancho 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). *Geophys J Int*, 2009, 179: 79–96
- 29 Dunlop D J, Özdemir Ö. *Rock Magnetism: Fundamentals and Frontiers*. Cambridge: Cambridge University Press, 1997. 74–75
- 30 Jordanova N, Petrovsky E, Kovacheva M, et al. Factors determining magnetic enhancement of burnt clay from archaeological sites. *J Archaeol Sci*, 2001, 28: 1137–1148
- 31 Stone R. Still Seeking Peking Man. *Science*, 2009, 325: 22–23
- 32 贾兰坡. 中国猿人化石产地 1958 年发掘报告. *古脊椎动物与古人类*, 1959, 1: 21–26
- 33 Goldberg P, Macphail R I. *Practical and Theoretical Geoarchaeology*. Malden: Blackwell Publishing, 2006. 175
- 34 Teilhard de Chardin P, Young C C. Preliminary report on the Choukoutien fossiliferous deposit. *Bull Geol Soc China*, 1929, 8: 173–202
- 35 张森水, 宋惕冰. 北京志·世界文化遗产卷·周口店遗址志. 北京: 北京出版社, 2003. 324–327
- 36 Torrent J, Barrón V. Diffuse reflectance spectroscopy of iron oxides. In: Hubbard A T, ed. *Encyclopedia of Surface and Colloid Science*. New York: Marcel Dekker, 2002. 1438–1446
- 37 Thompson R, Oldfield F. *Environmental Magnetism*. London: Allen & Unwin, 1986. 55–56
- 38 Deng C L, Zhu R X, Verosub K L, et al. Mineral magnetic properties of loess/paleosol couplets of the central loess plateau of China over the last 1.2 Myr. *J Geophys Res*, 2004, 109: B01103
- 39 Zhu R, Deng C, Jackson M J. A magnetic investigation along a NW-SE transect of the Chinese Loess Plateau and its implications. *Phys Chem Earth, Part A*, 2001, 26: 867–872
- 40 Torrent J, Barrón V. The visible diffuse reflectance spectrum in relation to the color and crystal properties of hematite. *Clays Clay Miner*, 2003, 51: 309–317
- 41 Berna F, Behar A, Shahack-Gross R, et al. Sediments exposed to high temperatures: Reconstructing pyrotechnological processes in Late Bronze and Iron Age Strata at Tel Dor (Israel). *J Archaeol Sci*, 2007, 34: 358–373
- 42 Deng C, Zhu R, Jackson M J, et al. Variability of the temperature-dependent susceptibility of the Holocene eolian deposits in the Chinese Loess Plateau: A pedogenesis indicator. *Phys Chem Earth, Part A*, 2001, 26: 873–878
- 43 Fine P, Singer M J, La Ven R, et al. Role of pedogenesis in distribution of magnetic susceptibility in two California chronosequences. *Geoderma*, 1989, 44: 287–306
- 44 Marmet E, Bina M, Fedoroff N, et al. Relationships between human activity and the magnetic properties of soils: A case study in the medieval site of Roissy-en-France. *Archaeol Prospect*, 1999, 6: 161–170