

考古磁学应用及进展¹⁾

李士 赵舜英

(中国科学院高能物理研究所)

本文介绍了近年来新发展起来的考古磁学 (archaeomagnetism) 这一门新兴的交叉学科。首先讨论了考古磁学的特性、理论和实验技术,然后介绍了它在考古学中的应用,并展望了它的发展方向。

考古学和磁学是分属社会科学和自然科学两大学科中完全不同的科学,它们原来互不相干,毫无共同之处。但是,随着科学技术的发展,特别是新的仪器设备和新的分析方法的不断出现,传统的考古学也正在逐渐吸收自然科学技术之精华,从而转化为现代实验考古技术。这大大地促进了考古学的发展,沟通了社会科学和自然科学之间的联系,形成了一门新兴交叉学科——考古磁学^[1,2]。

一、考古磁学的基础

1. 地球磁场

大约在 400 年前人们就已经开始了对地球磁场进行观测,并记录了它的变化。图 1 为地球磁场示意图。它表示出磁偶极子位置、磁极和地理极点之间的关系。如果用一根悬挂于重心上的磁针,使其可以自由摆动,这时磁针(磁经线)与地理经线的交角为磁偏角 D ,而磁针与水平面的交角为磁倾角 I 。从图 1 可以想象,位于地球中心类似有一个棒状磁铁,它能产生一个具有南北磁极,象一个磁偶极子的磁场,实际上用单一偶极子磁场来描述地球磁场过于简单化了。我们可以设想,地球磁场是由更多的偶极子(约八个)产生的磁场^[3],该磁场可以分解成许多分场,每一分场影响大约 1000km 的区域范围。但是,地球磁场的状态是变化的,不同地区的磁场是不同的,如果要想获得某处的地球磁场变化规律,需要数百年、数千年的长时间数据积累,所以在实际工作中要想得知数千

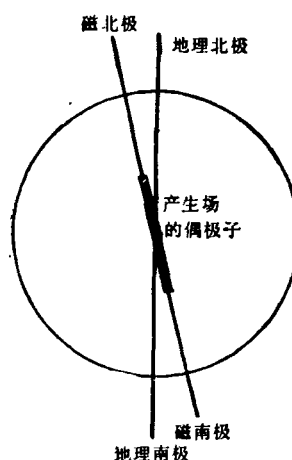


图 1 地球磁场示意图

年前地磁的变化规律是十分困难的。但是利用已知年代样品的 TRM (热剩磁)数据,可以找出过去地磁方向和强度随年代的变化规律从而反推过去该地区古地磁情况^[4]。对于地球给定点的磁场强度测量,其单位是特斯拉 (T)。一般的场强变化是在 $30 \mu\text{T}$ (赤道) 到 $60 \mu\text{T}$ (地球极点)之间变化,在英国 (不列颠) 大约是 $50 \mu\text{T}$ 。最近发现,场强正以约每百年 $2.5 \mu\text{T}$ 的速度改变着。但是也曾发现过去的一些时刻在某些区域其场强为常数,而在另一时刻内,却以较快的速度变化。例如在法国在 0—200 A. D. 期间,其场强从 $50 \mu\text{T}$ 上升到了 $100 \mu\text{T}$ 。磁偏角和磁倾角的情况也是如此。1985 年英国 (不列颠) 的磁偏角大约是 9° , 它的变化约每三年 0.5° , 但有时也不变化。目前在英国 (不列颠)

1) 国家自然科学基金资助项目。

磁倾角的数值大约是 66° ，自公元 1900 年以来，它几乎是常数。

2. 地球磁场变化曲线

由于地球不同点的磁场是随时间变化的，所以在某些特定点测量的地球磁场的方向和强度一般是不能直接绘成曲线的，但是可以转换成另一种能很容易地与其他地点的测量结果相比较的形式。

一种转换形式是将来自同一地区且包含在个别地点所测量到的磁偏角和磁倾角，转换成中心点位置的测量值；另一种形式是比较来自地球上不同地区的测量结果，利用实际的磁极位置，并计算地球中心单个磁偶极子的纬线和经线，可以得到实际的极点，从而会产生被探测到的某地区地磁的方向。它的优点是，如果不存在非单一偶极场，那么实际上的磁极位置在任何时间都是相同的，它可以画在一个投影立体图上，在这个图上，地球磁场的磁偏角或者实际磁极的经度是在圆的圆周上，而磁倾角或纬度将沿着半径从 0° 到中心的 90° 上。图 2 是利用这个方法绘出的英国和日本虚地磁极移动轨迹。如果磁场方向的变化较小，则可以使用笛卡尔坐标直接画出沿水平方向的磁偏角和沿

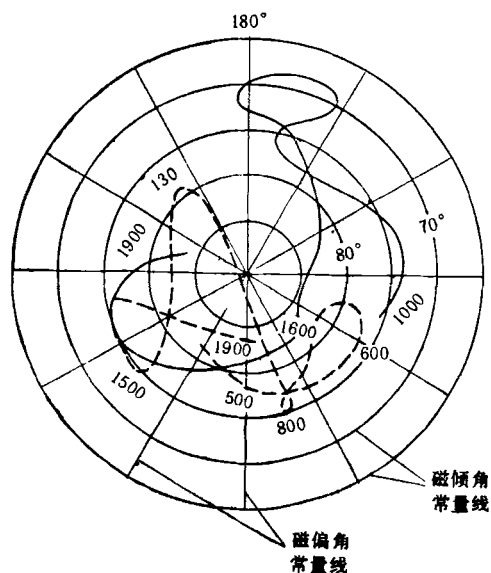


图 2 英国(实线)公元前 1900—1000 年，日本(虚线)公元前 1900—500 年虚地磁极移动轨迹

垂直方向的磁倾角(如图 3 所示)，这个图习惯称之为 Bauer 图。

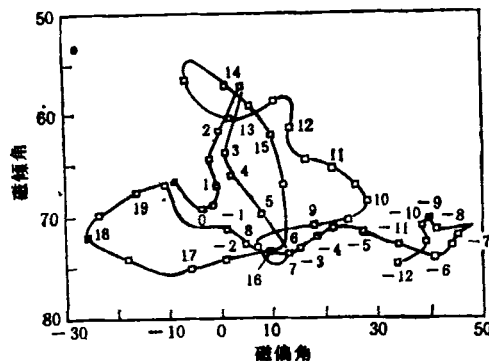


图 3 英国地区磁偏角和磁倾角长期变化曲线(图中数值单位为 100 年,正和负值分别表示 A.D. 和 B.C.)

3. 考古磁学用于断代的原理

为了了解考古磁学断代的原理，我们应知道为什么陶器或瓷器能够被磁化和它们怎样被磁化的。众所周知，在陶器和瓷器粘土中含有极少量的强磁性的铁的氧化物粒子或晶粒，它们象一些很小的磁棒，在粘土中是无序分布的，因此测量不出剩磁。但是如果以适当的形式使其增加能量(如加热)，则各个晶粒磁矩会自由旋转。若有一个外磁场，那么大多数磁矩将会排列在一个方向。如果在外磁场中自然冷却，这一排列就会被固定下来，该陶器或瓷器就获得了在外加磁场方向的磁化强度即热剩磁，因而该样品将通过热剩磁记录下磁场的强度和方向。

二、应用

1. 地磁场的变化与 ^{14}C 断代的关系

考古磁学最重要的应用是它能提供有关磁场方向和强度变化的信息，它不仅能研究地球磁场短期的变化，而且还能提供地球磁场如何快速变化的信息。目前，有关地球磁场的变化的研究结果也已较多地直接用于考古学，如断代的研究(在下面将给出实例)。此外，地球磁场的强度变化也会影响 ^{14}C 产生率的变化，因此影响 ^{14}C 断代。这是因为在地球中 ^{14}C 的产生

是借助于从外层空间来的宇宙线粒子束,但是由于地球磁场起屏蔽作用,会使许多粒子从大气中偏转出去,因此它们不能产生 ^{14}C 。在地球磁场较强时,即当磁偶极矩较大时,偏离的粒子就多一些, ^{14}C 产生的就少;反之,当地球磁场较弱时, ^{14}C 产生的就多一些。图4为地球磁场强度和树木 ^{14}C 含量之间的关系,从树木年轮的研究可以推断出若干年前树木的年代。图中的曲线与我们预期的一样,两条曲线相差 180° 的相位,地球磁场的最大值恰恰发生在 ^{14}C 的最小值处,这有可能根据地球磁场的变化去校正 ^{14}C 的年代。

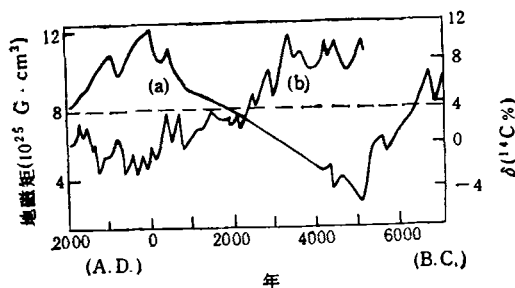


图4 地球磁场强度(a)与大气中树木 ^{14}C 含量(b)之间的关系

2. 考古磁学断代

考古磁学用于断代有两种形式:一种是地磁方向断代;另一种是地磁强度断代。利用地磁方向断代必须要选用适当的样品,还需要有该地区(大约 1000km 范围内)的校准曲线,而且取样工作十分重要,位置变动过的地方不能取样。与地磁方向断代相比,地磁强度断代有它的优点和不足。它的优点是容易获得样品,因为这时样品位置的改变已不是那么重要了,当然它也需要有校准曲线。该方法的缺点是必须考虑当时地球磁场强度变化,因为各个时期地球磁场强度变化是不同的。图5是位于埃及和美索不达米亚公元前2300—500年之间地球磁场强度变化曲线。从图5可以看出,在1500—500 B. C. 之间的地球磁场强度变化较大,可用于断代。但在2300—1500 B.C. 之间变化较小,甚至无变化,所以不能用于断代。这时可选用其它断代方法较为合适。所以在进行地磁强度断代前,要讨论的问题是哪个样品能进

物理

行断代,以保证得到有用的信息。

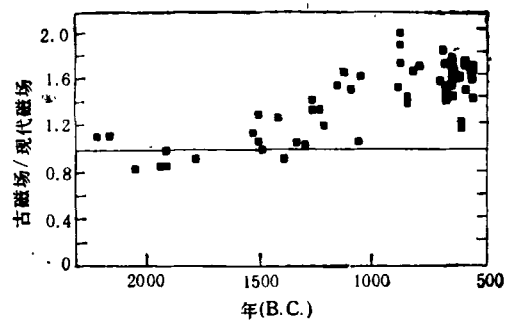


图5 埃及和美索不达米亚公元前2300—500年之间的地球磁场强度变化曲线

前面我们已经介绍了考古磁学断代的两种形式。此外,考古磁学断代能提供相对年代或绝对年代两方面的信息。如果确定绝对年代需要有校准曲线。但是在没有校准曲线时,虽不能提供绝对年代,但仍可以提供相对年代。利用相对年代可以判断两个考古事件是否为同一时代,但是它不能确定哪个先,哪个后,除非有其它数据证明。

利用地磁相对断代的最近例子是 Downey 等人所做的米诺(Minoan)文明时代的工作^[3],他们收集了从 Santorini 喷发产生的各种物质和在 Crete 和 Santorini 被火烧过的某些建筑物,并测量了这些样品的磁化强度和方向。结果表明,所有的测量结果可分为两组:一组为早期的灰分样品,它们是早期 Santorini 火山喷发的和在 Crete 中心位置的灰;另一组是在 Crete 东部和 Santorini 后来取得的物质。他们分析了这两组样品的磁性在强度和方向上的差别,以及磁场变化的速率后认为,该地区曾出现两次火山爆发,并伴有地震发生,而 Crete 东部的建筑物直到第二次火山爆发才被毁坏。此外通过磁性断代也能说明,米诺文明时代的崩溃和 Santorini 火山喷发之间在时间上有紧密的联系。

在介绍绝对断代之前,先介绍一下磁场反转。早期的磁反转主要用于地质样品断代。目前磁场反转也用于确定早期人类遗址的年代。图6表示考古学者感兴趣的磁场反转年代。较

简单的办法是，建立或找到正常或反转磁场的衔接处。假如，样品的磁时代能确定的话，则可以精确地断代，条件是样品必须比 0.73 百万年更早，这是该方法的极限^[4]。

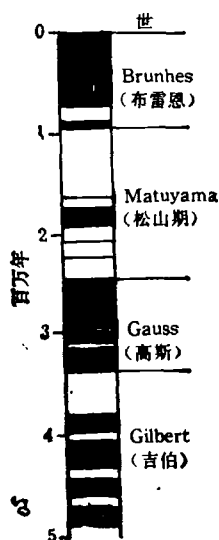


图 6 过去 500 万年期间内主要的磁反转
 ■ 正常极性；□ 反转极性

Caltori 等人已利用某些组磁场反转断代去证实 K/Ar 断代的结果，他们发现与人类活动相联系的沉积物的磁化全部是可逆的，当最后的反转发生时，它们必须比 0.73 百万年早些，这样得到的年代和 K/Ar 断代得到的年代 0.73 ± 0.04 百万年的年代一致，因此提供了在欧洲早期人类活动的证据^[4]。Thouveny 等人在法国，Schmitt 等人在埃塞俄比亚也分别报道了类似的工作^[5,6]。

Gale 等人^[7]对旧石器时代位于不列颠教堂附近岩洞中的沉积物的磁场方向进行了测量，他们通过比较分析，给出了这些沉积物的年代为公元 11—10.5 千年，这个结果与花粉和软体动物研究给出的结果一致。在这些数据的基础上，作者还提议不列颠的 Recolonisation 开垦应在冰河时代以后，较先前推定的年代晚。

Thompson^[8]对英国萨里的 Hascombe 的小山丘堡垒和 Holmbury 沟底的淤泥和坑中烧过的岩石进行了测量。对 Holmbury 淤泥测得的磁偏角为 $9.6W \pm 3.4^\circ$ ，磁倾角为 $64.8 \pm$

1.4° ；而对 Hascombe 山丘堡垒中烧过的岩石测得的磁偏角为 $8.6W \pm 4.6^\circ$ ，磁倾角为 $65.3 \pm 1.9^\circ$ ；对 Hascombe 淤泥测得的磁偏角为 $7.9W \pm 7.9^\circ$ ，磁倾角为 $66.1 \pm 3.2^\circ$ 。这些样品的年代相应于公元前 70—0 世纪。这个结果与取自遗址中的硬币的证据相一致。这项工作说明了，对于坑或者沟中的淤泥可用于考古遗址的断代研究。

断代应用的最后一个例子是想说明利用校准曲线是十分重要的。Barbetti 对 Glozel 的刻字书板是否为古代的还是现代伪造品进行了鉴定^[9]。热释光断代给出的年代为公元前 350 到公元 250 年之间，而有些人认为它是现代的。Barbetti 对该样品进行了磁性测量，得到的强度值为 $47 \pm 7 \mu T$ ，将这个数据与欧洲地区校准曲线进行了比较，结果表明，在公元前 1500 年到公元 1500 年之间，该地区剩磁强度不低于 $60 \mu T$ ，因此该样品不可能来自这个时间间隔，但是 $47 \mu T$ 在法国是常有的场强，故证实了该样品是现代伪造的，否定了热释光断代的结果。

3. 其它应用

除了用于断代方面的研究之外，考古磁学还可以进行古陶制造原料的来源方面的研究。这是因为不同出处的考古样品，由于制造时采用的粘土原料不同，其铁的化合物会有一些差异，即使在同一地点制造，采用同一粘土，但由于制造工艺不同，也会存在差异。如果只从外形和颜色上去区分，有时会判断失误。利用穆斯堡尔谱学技术测定粘土和陶器中 Fe^{2+} 和 Fe^{3+} 的超精细相互作用参数值，由它们的分布可以确定样品的原料来源。如 Gancedo 等人对公元前 400 年前的彩陶和灰陶进行了研究，发现彩陶和灰陶中铁的化合物没有差异，颜色的不同是由于采用了不同的制造工艺，故推断这两种古陶采用同一粘土在同一地点制造的。归纳起来，在测定大量陶片磁参数的基础上，可以确定它们的来源问题。此外，利用测得的磁参数

1) F.H. Thompson *et al.*, Three Survey Hillforts. (1985), 245.

还可以对古代陶器进行分类^[10]。

确定陶器的烧结温度的方法也很简单。图7为一万年前捷克斯洛伐克古陶器的穆斯堡尔谱^[10]。从谱中可以看出古陶内部和外表不一样,内部主要是 Fe^{2+} 和 Fe^{3+} 谱线,而外表是由 $\alpha-Fe_2O_3$ 和呈超顺磁性小颗粒的 $\alpha-Fe_2O_3$ 。这说明古陶表面涂了一层 $\alpha-Fe_2O_3$ 涂料,而内部以 Fe^{2+} 和 Fe^{3+} 为主,且没有氧化,说明古陶煨烧温度小于 $400^{\circ}C$ 。另外,从 Fe^{2+}/Fe^{3+} 的比例,可以确定古陶是在何种条件下煨烧,即在空气中烧制,还是在窑内煨烧的。因为在氧化气氛中(空气中)煨烧的陶器 Fe^{2+} 含量很少,而在还原条件下烧制却含有大量 Fe^{2+} 。Coey 等人曾对伊朗和土耳其的几种不同类型的古代陶器进行了研究^[11],一种是纯灰色陶器,另一种是具有黑色装饰的红色陶器,还有一种是淡黄色陶器。灰色陶器的年代大约出现在公元前 3000 年,并且与红陶和淡黄陶共存到大约公元前 1650 年。结果表明,灰色陶器是在较低温度下烧成的,其最高烧结温度不超过 $900^{\circ}C$,而且是在缺氧条件下烧成的;而红色陶器的热剩磁强度比纯氧化气氛中烧结样品的热剩磁强度大,说明该样品在烧结后曾采用最大限度鼓风混合气流,其烧结温度为 $950^{\circ}C$;对淡黄色陶器,它是在 $1050-1150^{\circ}C$ 的氧化高温中烧成的。

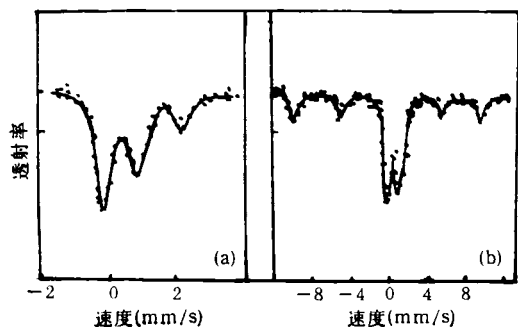


图7 一万年前捷克斯洛伐克古陶的穆斯堡尔谱
(a) 内部取样; (b) 表面取样

Gowlett 等人曾对非洲早期人类遗址中烧过的粘土进行了研究^[12],发现该粘土曾在 $400^{\circ}C$ 下烧过,他们认为粘土的焙烧是由于使用火的原因,而不是由偶然火山爆发引起的燃烧的结果。

物理

果。

对于某些金属(如铜和黄铜硬币)的磁性也可进行研究。在这些硬币中,铁是作为杂质而出现的。但纯铁或含铁很高的金属考古样品不能进行考古磁学断代研究,这是因为在铁中任何磁化都是多畴的,因而不能记录过去地球磁场的情况。Tailing 曾对铜或黄铜硬币进行了研究^[13],发现许多硬币有一个稳定的剩磁矩,且方向太分散,以致于无法用于断代研究。但是他们却得到了关于硬币是如何制造的结论,实际上借助研究等温饱和剩磁在硬币中的产生,已能辨别出硬币是铸造的还是锻压制造的^[14],以及区别不同矿石来源制做的硬币^[15]。

电子自旋共振(ESR)是一种微波吸收波谱技术。它能够探测电子自旋磁矩。其基本原理是利用由物质中放射性元素铀、钍、钾及其在环境中衰变导致的自然辐射所产生的不成对电子,而且这些辐射损伤自样品形成后就已经开始累积了,因此这些由电子自旋浓度的大小所决定的自然辐射总剂量与年代有关。Ikeya 和 Poulianos 等人先后利用 ESR 确定了人类骨头的年代^[16,17]。我国科学工作者最近利用 ESR 技术测定北京猿人的年代为 57.8 万年^[1]。利用

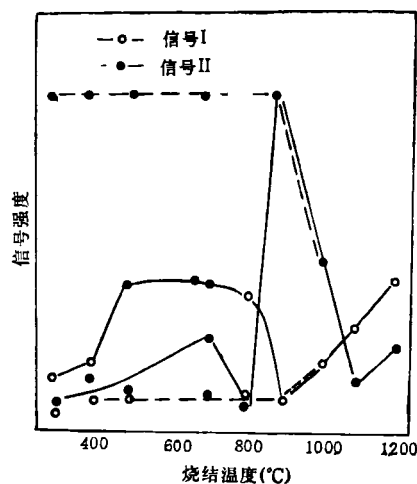


图8 粘土样品的 ESR 信号强度与烧结温度变化曲线

(下转第 697 页)

1) 北京日报,1989年10月21日,第一版。