

## 北京地区史期地磁场及其变化的研究

邓兴惠 李东节

(中国科学院地球物理研究所)

### 提 要

本文利用考古地磁法,对北京地区汉、三国、唐、宋、金、元、明、清各朝代的古砖标本进行了研究,测定了标本的剩余磁性,并做了逐步加热的实验,从而推算出上述各时期北京地区的磁倾角值和磁场强度值。结果表明,北京地区近两千年来磁倾角是在 $51^{\circ}$ — $66^{\circ}$ 之间变化,并且有循环性特征,其周期为一千余年;而地磁场强度则是逐渐减小的,汉、三国、唐、宋、元、清各时期的地磁场强度分别为现代地磁场强度的1.57, 1.41, 1.42, 1.29, 1.21, 1.12倍。

### 一、引 言

古地磁学和考古地磁学是地磁学范围内近年来获得迅速发展的一個新分支。它不仅是目前研究地磁场历史的唯一途径,而且还提供了一种研究地磁场长期变化的新方法。当然,对于研究地磁场及其变化,直接观测是最有效的方法。但遗憾的是人们对它的直接测量只是在十六世纪才开始,而较系统的观测则只有一百多年的历史;现有的观测资料还不足以阐明地磁场长期变化的规律。古地磁学通过对各地质年代岩石的天然剩余磁化强度的测定和分析,可以确定各地质年代地磁场的平均状态,从而提供了研究地质时期地磁场历史的唯一途径;而考古地磁学,由于它采用的标本——古代的陶器、砖瓦、窑灶遗址等——远比岩石具有更准确的记时标志,因此使我们有可能通过对考古地磁标本剩余磁化强度的测定和分析,来研究历史时期地磁场方向和强度的变化规律。由于考古地磁的部分结果所处的年代已经达到直接观测地磁场的时期,因此通过比较还可以检验工作成果的可靠性。由于这些缘故,古地磁学和考古地磁学目前已成为地磁场研究的一个重要方面。显然,地磁场历史及其变化规律的进一步阐明,对于检验和探讨地磁场成因的理论,以及进一步研究地球内部的构造和它的物质状态,都有直接或间接的关系。根据古地磁研究所提出的地磁场倒转的问题,已成为地磁场基本理论研究的一个重要课题,就是很好的例证。此外,古地磁在大陆漂移等学科中也有其实际的应用。因此古地磁和考古地磁的研究工作不论在学术上和实际应用方面都有它的重要性。

目前古地磁的研究积累了很多资料,取得了许多重要的成果。而考古地磁学,在用来研究近几年来地磁场倾角的变化和地磁场强度的变化方面,也得到了一些有意义的结果。特别应该提出的是法国学者 E. 特利埃 (E. Thellier) 和 O. 特利埃 (O. Thellier) 所提出的逐步加热法<sup>[1]</sup>,为考古地磁的研究提供了有力的工具。这种方法不但能消除标本中的某些次生磁化,查明标本的温度史,并检验标本的剩余磁化强度和矿物的稳定性,并且也提供了测量古代地磁场强度的可能性。苏联学者 A. C. 波尔沙科夫 (A. C. Бо-

льшаков) 用逐步加热法,对同时存在于标本中的热剩余磁化强度和粘滞磁化、正常磁化进行了定量的划分<sup>[2,3]</sup>,并指出,在标本中即使有占热剩磁的百分之四十的粘滞磁化( $I_{re} = 40\% I_{rt}$ )存在,当标本加热到 100—200°C 时,这个粘滞磁化亦可完全消失。根据目前进行的考古地磁研究知道,在粘土烧制品如古砖、陶器等标本中,一般说来粘滞磁化只占热磁化的百分之几,因此我们只要适当地选择净化温度即可消除标本中的次生磁化。这也说明了用逐步加热法确定古代地磁场强度是可靠的。法国学者 E. 特利埃和 O. 特利埃,苏联学者布尔拉茨卡娅(С. П. Бурлацкая)、彼得洛娃(Г. Н. Петрова),日本学者永田武等人,利用逐步加热法确定了法国、苏联、日本等地区近几千年来的地磁倾角和地磁场强度值<sup>[4-11]</sup>。结果表明,地磁倾角的变化有循环性特征,周期约为一千年。地磁场强度的变化似乎也有周期性特征,周期约为一万年。近两千年来,地磁场强度是一直在减小,公元初期地磁场强度约为现代地磁场的 1.5—1.7 倍。另外,在苏联高加索地区的磁倾角变化曲线中发现有相位移动的特征。因此在全苏第六届基本磁场和古地磁学会议上,布尔拉茨卡娅、彼得洛娃提出了用考古地磁资料研究地磁场长期变的西向漂移的可能性。从列宁格勒和里沃夫地区的考古地磁研究中,磁倾角的十年平均变化曲线有非周期性特征<sup>[12]</sup>。E. H. 塔尔霍夫提出了用考古地磁法研究地壳构造的可能性。虽然这方面的工作目前还做得不多,但近年来的确引起了各国地球物理学家的兴趣。

我国是一个有悠久历史的文明古国,开展这方面的研究工作有着极其优越的条件。1963 年我们开始了北京地区的标本收集工作,先后由北京文物工作队收集到汉、三国、唐、宋、金、元、明、清各朝代的古砖标本四十块,并加工成四百二十七块立方体标本。我们对这些标本的剩余磁性进行了测定和逐步加热研究,从而初步确定了北京地区近两千年来地磁倾角和地磁场强度及其变化的情况。

## 二、利用古物的剩余磁性确定古代地磁场的方向和强度的方法

考古地磁研究中所用的标本——陶器、砖、瓦、古代窑灶遗址等——在烧制前由于土坯中含有铁磁性物质,经过高温烧制后在地磁场中冷却,一般说来就得到相当强的热剩余磁化强度  $I_{rt}$ 。因此铁磁性物质的热磁化规律乃是我们进行考古地磁研究的主要依据。根据大量的实验结果,铁磁性物质热剩余磁性的产生和消失的规律如下:

(1) 任何含铁磁性物质的物体,在磁场中经过从高温冷却的过程,都要被磁化。这种磁化强度叫做热剩余磁化强度  $I_{rt}$ 。

(2) 热剩余磁化强度的方向与冷却时所处的磁场方向一致。

(3) 物体在弱磁场(例如 1 奥斯特)中冷却时,热剩余磁化强度的大小与外加磁场的强度成正比,即  $I_{rt} \propto F$ 。

(4) 在冷却过程中,整个温度间隔内所得到的热剩磁等于分别在各个部分温度间隔内所得到的部分热剩磁的几何和:

$$I_r(\theta, F, 20^\circ\text{C}) = \sum_{t_1=\theta}^{t_2=20^\circ\text{C}} \Delta I_r(t_1, F, t_2). \quad (1)$$

这里  $\theta$  是铁磁性物质的居里点,  $F$  是物体冷却时所处的磁场强度;  $I_r(\theta, F, 20^\circ\text{C})$  是一个矢量,代表铁磁性物质,在从其居里点的高温开始在磁场  $F$  中冷却至室温  $20^\circ\text{C}$  的整个温

度间隔内, 所获得的热剩余磁化强度;  $\Delta I_{rr}(t_1, F, t_2)$  则代表这个铁磁性物质, 在磁场  $F$  中, 在由温度  $t_1$  冷却至  $t_2$  这一部分时间间隔内所获得的部分热剩余磁化强度, 最高的温度  $t_1 = \theta$ , 最低的温度  $t_2 = 20^\circ\text{C}$  (室温)。

(5) 在弱磁场中的热磁化过程是个可逆的过程。

根据上述规律, 我们就可以利用古代加热冷却后原始位置尚未移动过的窑灶遗址和古物, 测定它们的热剩余磁化强度的方向, 并由此确定该古物冷却时当时当地的地磁场方向(磁偏角和磁倾角)。如果古物的原始位置已有变动, 但尚有办法恢复它们原先加热冷却时的水平位置, 那么也可以确定冷却时地磁场的倾角。此外, 还可以根据标本从某一温度  $t_1$  加热到另一温度  $t_2$  所失去的原始热剩余磁化强度  $\Delta I_{rr}(t_1, F_0, t_2)$ , 与同一标本在现在实验室的给定磁场  $F'$  中由  $t_2$  冷却到  $t_1$  时所得到的热剩磁化强度  $\Delta I'_{rr}(t_2, F', t_1)$  之比, 来确定原先的古地磁场强度  $F_0$ , 即

$$F_0 = \frac{\Delta I_{rr}(t_1, F_0, t_2)}{\Delta I'_{rr}(t_2, F', t_1)} F' \quad (2)$$

古地磁和考古地磁的研究要求所采用的标本的磁性是稳定的。法国学者 E. 特利埃根据大量试验的结果指出, 粘土烧制物的剩余磁性具有考古地磁研究所需要的稳定性。同时他还指出, 如果选择净化温度为  $100^\circ\text{C}$ , 一般次生磁化强度即可消除。布尔拉茨卡娅和彼得洛娃的试验指出, 器壁弯曲的古物, 其剩余磁化强度的方向往往会受到器壁弯曲的影响, 而且垂直方向的剩余磁化强度比起其它两个分量来说是不够稳定的。因此从磁稳定性和测量精度两方面来考虑, 古砖是考古地磁研究中比较理想的标本。此外, 我们还根据逐步加热过程中原始剩余磁化方向的变化情况, 各温度间隔内  $K$  值 ( $K = F_0/F'$ ) 的分散情况, 和比较同一朝代不同地点或不同年限的标本的剩余磁化强度和方向, 对标本进行了稳定性的估计, 从而决定对它们的取舍。然后我们利用所得到的各朝代  $K$  的平均值  $\bar{K}$ , 根据情况分别选择中间温度  $t_i$  为  $200^\circ\text{C}$  或  $300^\circ\text{C}$ , 并按下列公式定量地估计了标本的次生磁化强度(见表 5):

$$I_n^s = I_n - [I_n^0(\theta, F_0, t_i) + \bar{K} I_n'(t_i, F', 20^\circ\text{C})] \quad (3)$$

这里  $I_n^s$  表示标本的次生磁化强度;  $I_n$  表示标本的总剩余磁化强度;  $I_n^0$  表示标本加热到  $t_i$  后原始热剩磁的残留部分;  $I_n'$  表示标本加热到  $t_i$  后在已知的实验室磁场  $F'$  中冷却到室温所得到的磁化强度。

标本剩余磁性的测定是用无定向磁力仪进行的。仪器的格值在灯尺离磁系 2 米时可达  $1.1 \times 10^{-7}$  奥斯特/毫米。用标准线圈作四十次重复测定时, 仪器的相对可几误差为  $\pm 2.1\%$ 。由于我们这次所测定的标本磁性较强, 一般使用的仪器的格值为  $1 \times 10^{-6}$  奥斯特/毫米。相对可几误差在  $\pm 2\%$  以下。仪器磁系两磁针之间的距离为 35.0 厘米, 因此把标本放在上磁针附近时, 对下磁针的影响只有对上磁针作用的  $1/100$ , 可以忽略不计。仪器的磁系是安置在东西方向, 这样我们就直接采用地磁场的水平强度对标本的磁化作用来测定标本的磁化率  $\kappa$ 。为了消除地磁场变化的干扰, 采用了负反馈目视地磁记录仪对地磁场水平强度的变化进行了补偿。仪器的格值随外界温度的变化而改变; 温度变化  $1^\circ\text{C}$ , 仪器的格值改变  $2\%$ 。对一标本进行单次测定时, 温度变化极微, 其影响可以忽略不计。但在进行逐步加热试验时, 一块标本需在两个多月的时间内进行多次测定, 这时为了

消除温度变化所引起的误差,在每次测定的前后都对仪器进行格值测量。

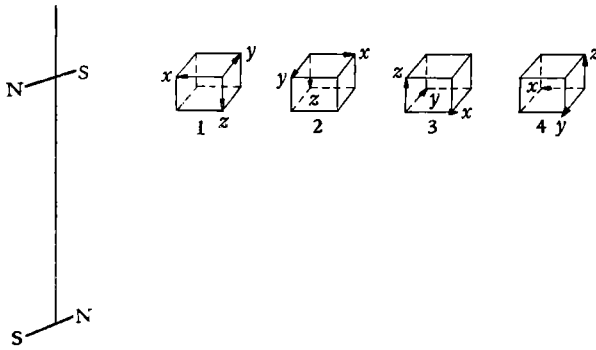


图 1 标本磁化强度的  $x$  分量测定示意图

$n_1, n_2, n_3, n_4$  表示按图 1 放置标本时的读数,则有

$$\begin{aligned} \varepsilon n_1 &= [(I_{rx} + I_{ix}) + (I'_{ry} + I'_{iy}) + (I'_{rz} + I'_{iz})], \\ \varepsilon n_2 &= [(-I_{rx} + I_{ix}) + (-I'_{ry} + I'_{iy}) + (I'_{rz} + I'_{iz})], \\ \varepsilon n_3 &= [(-I_{rx} + I_{ix}) + (I'_{ry} + I'_{iy}) + (-I'_{rz} + I'_{iz})], \\ \varepsilon n_4 &= [(I_{rx} + I_{ix}) + (-I'_{ry} + I'_{iy}) + (-I'_{rz} + I'_{iz})]. \end{aligned}$$

式中  $I_{rx}$  和  $I_{ix}$  分别表示标本  $x$  方向的天然剩余磁化强度和感应磁化强度,  $I'_{ry}, I'_{iy}, I'_{rz}, I'_{iz}$  分别表示在测量  $x$  分量时  $y$  和  $z$  分量的影响。

由以上四式可得

$$I_{rx} = \frac{\varepsilon}{4} [(n_1 - n_2) + (n_4 - n_3)], \tag{4}$$

$$\kappa_x = \frac{\varepsilon}{4H'} (n_1 + n_2 + n_3 + n_4), \tag{5}$$

式中  $H'$  是现代地磁场水平强度, 约为 0.3 高斯。依上述方法可同样测出  $I_{ry}, \kappa_y$  和  $I_{rz}, \kappa_z$ 。由此可得倾角

$$J = \arctg \frac{I_{rz}}{\sqrt{I_{rx}^2 + I_{ry}^2}}. \tag{6}$$

### 古代磁場强度的确定

如上所述,古代的地磁场强度是根据(2)式来确定的。但为了消除标本的某些次生磁化强度,检查标本的温度史,并检验标本中的矿物以及磁稳定性,我们采用了 E. 特利埃提出的“逐步加热法”作出标本的磁化曲线和退磁曲线图,并从图线上量出所要的数值,来确定古代的地磁场强度。我们把标本从室温逐步加热到标本中铁磁性矿物的居里点,每隔一定的温度间隔加热两次(例如  $20^\circ\text{C}-100^\circ\text{C}, 20^\circ\text{C}-100^\circ\text{C}; 20^\circ\text{C}-200^\circ\text{C}, 20^\circ\text{C}-200^\circ\text{C}; \dots$ )。每次加热之后,使标本在现代地磁场中冷却,而第二次加热后的冷却位置是第一次冷却位置绕地磁场的东西方向反转  $180^\circ$ ,并且在每次冷却后都进行一次测量。例如,第一次从室温  $20^\circ\text{C}$  加热到  $100^\circ\text{C}$ ,随即使其冷却,其时把标本按其原来的剩余磁化方向放在现在的地磁场方向上。那末所测到的磁化强度,是标本在古代磁场中从居里点冷却到  $100^\circ\text{C}$  时所已经获得的磁化强度  $I_r(\theta, F_0, 100^\circ\text{C})$ ,加上在实验室现代地磁场中从  $100^\circ\text{C}$  冷却到室温  $20^\circ\text{C}$  时所新得到的磁化强度  $I_r(100^\circ\text{C}, F',$

### 倾角的测定

标本的坐标轴是这样选择的:因古代长方形的砖在烧制时都是沿长边直立横放的,因此我们选择垂直向下的磁化强度为  $z$  轴的正向,其它两轴的方向则按右手坐标系规定。当测量标本剩余磁化强度的某一分量时,为了消除其它分量的影响,对每一标本沿三个相互垂直的轴进行四次测定(图 1)。如用  $\varepsilon$  表示仪器的格值,

20℃), 即

$$I_{\Sigma r_i} = I_{r_i}(\theta, F_0, 100^\circ\text{C}) + I_{r_i}(100^\circ\text{C}, F', 20^\circ\text{C}). \quad (7)$$

第二次从室温 20℃ 加热到 100℃ 时, 却把标本放在与现代地磁场相反的方向上冷却。这时所得到的磁化强度仍然是上述两部分组成, 但上式中第二项符号相反, 即

$$I'_{\Sigma r_i} = I_{r_i}(\theta, F_0, 100^\circ\text{C}) - I_{r_i}(100^\circ\text{C}, F', 20^\circ\text{C}). \quad (8)$$

因此得到:

$$I_{r_i}(\theta, F_0, 100^\circ\text{C}) = \frac{1}{2} (I_{\Sigma r_i} + I'_{\Sigma r_i}), \quad (9)$$

$$I_{r_i}(100^\circ\text{C}, F', 20^\circ\text{C}) = \frac{1}{2} (I_{\Sigma r_i} - I'_{\Sigma r_i}). \quad (10)$$

其余的温度区间可以依此类推。这样我们就分别得到标本从居里点以下各个温度到室温时的原始剩余磁化强度, 和标本在实验室给定磁场中不同温度时的磁化强度; 这样就可以分别作出标本的磁化曲线和退磁曲线。根据各个温度间隔内所失去的原始剩余磁化强度和已在已知的实验室磁场中得到的新磁化强度之比, 由(2)式可求出古代地磁场强度。

由于加热电炉自动温度控制的最小刻度是 20℃ 以及实验中其它误差的存在, 直接采用标本在加热过程中失去的原始磁化强度与在实验室磁场中获得的新磁化强度的实测值之比来计算  $K$  值并不适宜。在远离居里点的温度范围内, 由于磁性随温度变化缓慢, 磁化和退磁曲线比较平直, 可采用磁化和退磁光滑曲线上温度对应的  $\Delta I$  之比求  $K$ , 或者采取给定温度间隔内标本退磁曲线减小之面积和在同一温度间隔内磁化曲线相应增加之面积之比来确定  $K$  值亦可。在居里点附近由于磁性随温度变化迅速, 实验误差较大, 同时考虑到在居里点附近矿物磁性变化对磁化的影响, 可采用下式来计算  $K$  值:

$$K = \frac{\int_{t_0}^{t_i} [I_{r_i}(\theta, F_0, t_i) - I_{r_i}(\theta, F_0, t_0)] dt}{\int_{t_0}^{t_i} [I'_{r_i}(t_i, F', 20^\circ\text{C}) - I'_{r_i}(t_0, F', 20^\circ\text{C})] dt}. \quad (11)$$

求得的  $K$  值结果较好。在计算中我们采取的温度间隔为 50℃ 或 100℃。

表 1 和图 2 是北京芦沟桥汉墓古砖 2.12 号标本的加热试验结果。

表 1

$t_i$ (°C)	$J$ (度)	$I_0(\theta, F_0, t_i)$ 10 <sup>-8</sup> CGSM	$I'(t_i, F', 20^\circ\text{C})$ 10 <sup>-8</sup> CGSM	$K = \frac{\Delta I_{r_i}(t_1, F_0, t_2)}{\Delta I'_{r_i}(t_2, F', t_1)}$
20	55.8	118.7	0	
150	56.4	106.6	13.47	1.48
200	56.0	99.25	14.12	1.48
300	57.8	78.73	27.96	1.42
350		46.88	55.38	
500		2.64	178.2	

由表 1 可以看出, 标本加热到 100℃ 之后倾角值基本上保持不变, 这也说明了次生磁化强度已基本消除了。采用光滑曲线上的各对应温度, 直接量算原始磁化强度和新磁化强度之比, 求出的  $K$  值较集中。而直接根据各对应温度所量得的原始磁化强度和新磁化强度之比求出的  $K$  值则较为分散。

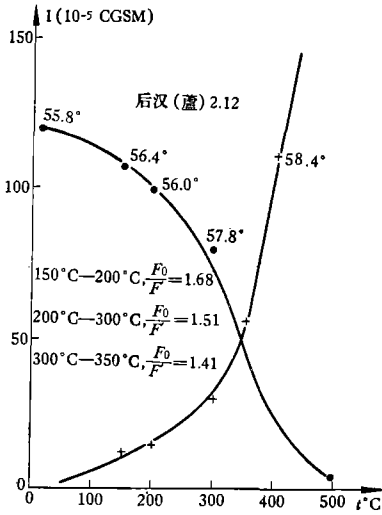


图 2 北京芦沟桥汉砖加热试验结果

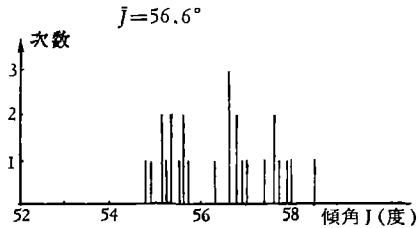


图 3 现代砖磁化强度矢的倾角频率分布

### 三、结果的分析

#### 1. 近两千年来北京地区磁倾角及其变化

本工作采用的古砖标本共四十块，全部切割成  $4 \times 4 \times 4$  立方厘米和  $3 \times 3 \times 3$  立方厘米的小立方体标本，两种共四百二十七块。除三国、宋、金、清几个朝代是各用一个古迹上的一至二块标本外，汉、唐、元、明几个朝代的标本是从两个或三个不同地区的古墓或建筑物上收集来的。有两块元砖注有“至正”年号；一块明砖注有“嘉靖”年号。

在测定这些古砖标本的剩余磁化强度之前，我们先利用北京地区的现代砖对测量仪器和加热系统进行了检验。表 2 和图 3 是北京地区六块现代砖的剩余磁性的测定结果。

表 2

现代砖标本编号	$I_r(10^{-5}\text{CGSM})$	$J$ (度)	现代砖标本编号	$I_r(10^{-5}\text{CGSM})$	$J$ (度)
1.1	37.5	58.0	2.9	34.0	57.6
1.2	49.5	56.3	4.1	25.1	55.6
1.3	51.0	57.6	4.2	35.1	56.9
1.4	41.6	55.1	4.3	24.6	57.4
1.5	35.5	57.6	4.4	41.2	55.3
1.6	25.8	57.0	4.6	37.0	54.8
1.7	36.0	55.5	4.7	44.2	56.8
1.8	24.7	55.1	5.1	142.0	55.8
2.1	40.0	56.6	5.2	107.0	54.9
2.2	53.0	56.6	5.5	86.8	56.8
2.3	39.5	58.9	5.6	45.3	56.6
2.4	38.4	55.7	6.1	59.8	55.6
2.5	50.2	55.6	6.2	42.0	56.7
2.6	17.6	57.9	6.3	48.2	55.5
2.7	45.5	55.2	6.4	52.2	57.2
2.8	32.2	58.5			平均 $\bar{j} = 56.5 \pm 1.1$

表 3

朝代	所属年代范围	标本编号	倾角 $J$ (度)	标本块数	采集地点
汉	公元前 206—	01, 1,2,3,...	60.1	10	北京
汉	公元后 219 年	02, 1,2,3,...	56.0	6	北京
后汉	公元 24—219 年	1, 1,2,3,...	56.7	9	北京西苑汉墓
后汉	公元 24—219 年	3, 1,2,3,...	58.3	6	北京西苑汉墓
后汉	公元 24—219 年	4, 1,2,3,...	54.1	6	北京西苑汉墓
后汉	公元 24—219 年	5, 1,2,3,...	56.1	9	北京西苑汉墓
后汉	公元 24—219 年	8, 1,2,3,...	53.3	6	北京西苑汉墓
后汉	公元 24—219 年	9, 1,2,3,...	57.5	6	北京西苑汉墓
后汉	公元 24—219 年	10, 1,2,3,...	56.5	9	北京西苑汉墓
后汉	公元 24—219 年	11, 1,2,3,...	55.6	6	北京西苑汉墓
后汉	公元 24—219 年	12, 1,2,3,...	54.7	9	北京西苑汉墓
后汉	公元 24—219 年	15, 1,2,3,...	57.1	6	北京西苑汉墓
后汉	公元 24—219 年	16, 1,2,3,...	55.8	6	北京西苑汉墓
后汉	公元 24—219 年	17, 1,2,3,...	55.3	6	北京西苑汉墓
后汉	公元 24—219 年	19, 1,2,3,...	58.6	6	北京西苑汉墓
后汉	公元 24—219 年	21, 1,2,3,...	56.3	6	北京西苑汉墓
后汉	公元 24—219 年	(芦)1, 1,2,3,...	56.8	18	北京芦沟桥汉墓
后汉	公元 24—219 年	(芦)2, 1,2,3,...	56.1	31	北京芦沟桥汉墓
后汉	公元 24—219 年	(芦)3, 1,2,3,...	57.4	11	北京芦沟桥汉墓
三国	公元 220—280 年	1, 1,2,3,...	57.6	15	北京
三国	公元 220—280 年	2, 1,2,3,...	54.0	8	北京
唐朝	公元 618—905 年	2, 1,2,3,...	61.5	11	北京先农坛墓砖
唐朝	公元 618—905 年	3, 1,2,3,...	58.0	10	北京先农坛墓砖
唐朝	公元 618—905 年	4, 1,2,3,...	63.7	8	北京龙潭湖墓砖
宋朝	公元 960—1276 年	1, 1,2,3,...	66.2	18	北京
金朝	公元 1115—1234 年	1, 1,2,3,...	63.0	6	北京和平门附近城砖
元朝	公元 1280—1368 年	1, 1,2,3,...	57.9	25	北京
元朝	公元 1341—1367 年	2, 1,2,3,...	54.2	8	北京和平门附近城砖注“至正”年号
元朝	公元 1341—1367 年	3, 1,2,3,...	58.3	7	北京和平门附近城砖注“至正”年号
元朝	公元 1280—1368 年	4, 1,2,3,...	62.8	12	北京和平门附近城砖
元朝	公元 1280—1368 年	5, 1,2,3,...	56.0	12	北京和平门附近城砖
元朝	公元 1280—1368 年	6, 1,2,3,...	61.7	12	北京和平门附近城砖
元朝	公元 1280—1368 年	7, 1,2,3,...	58.5	11	北京和平门附近城砖
元朝	公元 1280—1368 年	8, 1,2,3,...	59.8	8	北京和平门附近城砖
元朝	公元 1280—1368 年	9, 1,2,3,...	58.3	12	北京和平门附近城砖
明朝	公元 1522—1566 年	0, 1,2,3,...	$48.3+6=54.3$	24	山东临沂烧制砖上注有“嘉靖”年号
明朝	公元 1368—1643 年	2, 1,2,3,...	16.6	11	北京和平门附近城砖刻有“裕成窑记”四字
明朝	公元 1368—1643 年	3, 1,2,3,...	10.0	10	北京和平门附近城砖刻有“裕成窑记”四字
清朝	公元 1644—1911 年	1, 1,2,3,...	51.2	8	北京

由它们的磁化强度矢算得的平均倾角  $\bar{j} = 56.5^\circ$ ，均方根误差为  $\pm 1.1^\circ$ ，与现代北京地区磁倾角  $57.2^\circ$  相差不超过  $1^\circ$ 。

按上述方法，我们对各朝代标本的剩余磁化强度进行了测定，并对部分标本进行了逐步加热试验。根据逐步加热过程中原始剩余磁化强度方向的变化情况和对标本次生磁化强度的估计，对所用标本进行了选择。

古砖标本剩余磁性的测量结果在表 3 中列出。汉代的标本是由北京地区三个不同地点收集来的。根据这些标本剩余磁性的测定分析，公元初期北京地区的平均磁倾角为  $58.0^\circ$ 。图 4 a 和图 4 b 分别表示北京西苑和芦沟桥后汉时期(公元二世纪)标本剩余磁化强度矢的倾角频率分布。前者的平均倾角是  $56.1^\circ$ ，均方根误差为  $\pm 1.6^\circ$ ；后者是  $56.7^\circ$ ，均方根误差为  $\pm 1.3^\circ$ 。显然，两个结果是相当一致的。三国时期(公元 220—280 年)北京地区的磁倾角是  $58.8^\circ$ 。唐朝的标本是由北京先农坛和北京龙潭湖的两个古墓中取来的，所得到的倾角值也比较接近(见表 3)，其平均值为  $61.1^\circ$ 。由宋、金时代(十二世纪)标

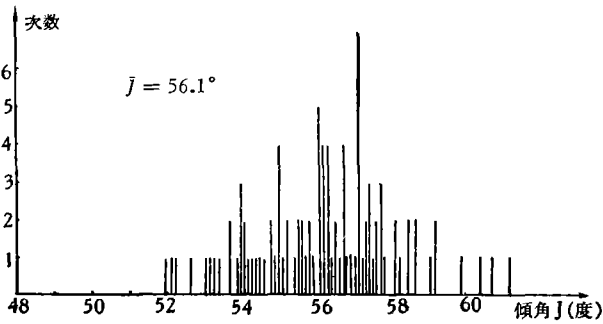


图 4a 北京西苑汉砖磁化强度矢的倾角频率分布

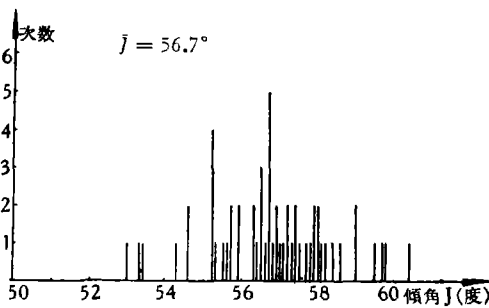


图 4b 北京芦沟桥汉砖磁化强度矢的倾角频率分布

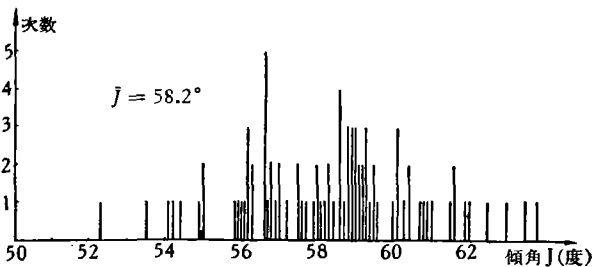


图 5 元砖磁化强度矢的倾角频率分布

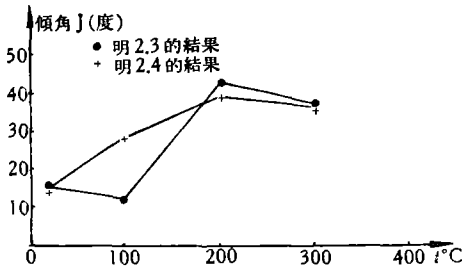


图6 明砖(2号标本)磁化强度矢的倾角随温度的变化

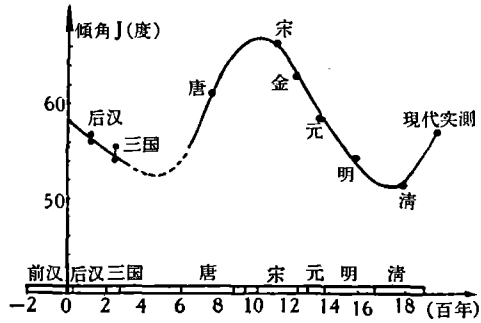


图7 北京地区近两千年磁倾角的变化

本所测得的磁倾角分别为  $66.2^\circ$  和  $63.0^\circ$ 。元朝的标本是北京三个不同地区的墓砖和城砖。由这三个不同地区收集来的标本所确定的磁倾角很接近,图5是其频率分布,其平均值为  $58.2^\circ$ 。明朝的标本有两组,第一组砖上注有“嘉靖”年号,是山东临沂烧制的。根据这组标本所得出的平均倾角是  $48.3^\circ$ 。临沂的现代磁倾角比北京地区小  $6^\circ$ 。为了便于与北京地区各年代的磁倾角相比较,加上这个差值后,明朝时期北京地区的磁倾角应为  $54.3^\circ$ 。第二组标本上注有“裕成窑记”字样。这组标本所得到的平均倾角为  $13.3^\circ$ 。根据逐步加热法进行研究后,发现这组标本的磁性很不稳定,随着温度的增加倾角变化很大,如图6,当标本由室温加热到  $200^\circ\text{C}$  时,倾角由  $15^\circ$  左右增加到  $40^\circ$  以上。显然这一组标本的结果不可靠,不应采用。根据清代古砖的测定,在清代(1644—1911年)北京地区的磁倾角为  $51.2^\circ$ 。

根据所得到的各年代的磁倾角平均值,得到了近两千年来北京地区地磁倾角变化图(图7)。由于缺少六朝标本,曲线的该部分用虚线表示,虚线的画法是根据整个曲线变化的趋势,也参考了国外的结果。由图7可明显地看出,近两千年来北京地区的磁倾角约在  $51^\circ-66^\circ$  之间变化,其变化有循环性特征,循环周期约为一千余年。磁倾角变化曲线的相位随地区的不同而有所差异。图8表示目前各国所得到的结果。由图8可以看出,北京地区磁倾角变化曲线的相位与日本的结果较接近,而苏联高加索地区所得曲线的相位几乎正好相反。

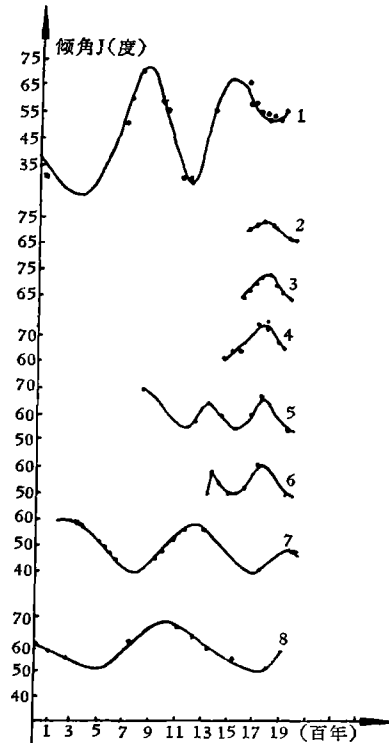


图8 近两千年来磁倾角变化曲线 1,苏联高加索地区; 2,3,伦敦和巴黎实测结果; 4,巴黎; 5,6,罗马和西西里岛; 7,日本; 8,北京

### 2. 近两千年来北京地区的地磁场强度及其变化

我们采用 O. 特利埃提出的逐步加热法,对北京地区各朝代的古砖标本 30 余块作了

“逐步加热”研究,做出了标本的磁化和退磁曲线,并确定了各朝代的地磁场强度。

在对古砖标本进行上述试验以前,我们利用北京地区的现代砖标本对加热系统进行了检验。表 4 是现代砖标本重复加热试验的结果,所得的平均值  $\bar{K}$  为 0.98,因此我们认为所使用的加热系统及测量仪器能满足实验的要求。

表 4

标本编号	加热前磁矩 ( $10^{-8}$ CGSM)	加热温度 ( $^{\circ}$ C)	加热冷却后的磁矩 ( $10^{-8}$ CGSM)	K	备注
1.3	34.93				在高温电炉中加热 4 小时后在实验室 的地磁场中冷却三 天
	35.68	750	38.47	0.91	
	38.47	700	39.35	0.98	
	39.35	700	37.39	1.05	
	37.39	700	38.14	0.98	
	38.14	700	38.09	1.00	
4.1	76.81				
	77.59	700	82.68	0.94	
	82.68	700	80.60	1.01	
6.3	87.00				
	90.68	700	97.75	0.93	
	97.75	700	89.53	1.09	
1.1	125.9				
	126.4	700	133.6	0.95	
1.2	148.2	700	161.2	0.93	
				$\bar{K} = 0.98$	

正如上面所指出的,利用逐步加热法求古代的磁场强度,是基于标本中热剩余磁化强度的产生和消失的规律。考虑到标本中除存在有原生的热剩余磁化强度外,还可能有次生的磁化强度——正常磁化、粘滞磁化存在,并考虑到随着温度的增加标本中的矿物成分会发生变化等情况,我们应当选择次生磁化基本消失,而矿物成分也没有发生变化的温度范围来求 K 值。这个温度范围主要是根据加热过程中热剩余磁化强度方向的变化情况来确定的。因为在有次生磁化存在时,所测量的磁化强度是原生磁化强度和次生磁化强度的矢量和,而粘滞磁化和正常磁化对于加热的稳定性远远小于热磁化,它们随温度的增加而很快消失,这时所测量的剩余磁化强度的方向就趋于一个确定的方向(即古代地磁场的方向)。但热剩磁方向的突然变化又是矿物发生变化的标志,因此可以选择原始磁化强度的倾角保持一个常数的温度范围来求 K 值。

表 5 是对各朝代标本进行逐步加热研究的结果。由于篇幅限制,在这里我们只选出了部分标本的磁化和退磁曲线图,如图 9, 10, 11, 12, 13, 14。由表 5 可以看出,我们采用的绝大多数标本在加热到  $100^{\circ}$ C 后,剩余磁化强度的方向基本上可以看成是稳定的。加热到  $300^{\circ}$ C 以后,在实验室地磁场中磁化强度矢的倾角与北京地区现代地磁倾角十分接近。在表 5 中还列出了利用所得到的各朝代的平均值  $\bar{K}$ , 中间温度为  $200^{\circ}$ C 或  $300^{\circ}$ C 时,按公式(3)算出的标本次生磁化强度。由表 5 还可以看出,我们选用的标本有百分之

表 5

标 编 号	年 范 围	倾 角 $J_0$ (度)						$J'$ (度)	$F_0/F'$								$\bar{K}$	$I_n/I_n$ (%)	$F_0$ (高斯)
		20°C	100°C	150°C	200°C	300°C	350°C		100°C— 200°C	150°C— 200°C	200°C— 300°C	250°C— 350°C	300°C— 350°C	300°C— 400°C	300°C— 400°C	350°C— 400°C			
汉 01—13	公元前 206 年— 公元后 219 年	61.1	60.6	58.3	58.7	57.0	57.0	1.59	1.42						3.1	0.86			
汉 01—15		61.4	58.8	60.9	60.0	57.7	57.7	1.63	1.51						2.8				
汉 02—8		54.7	56.6	55.8	57.3	57.3	57.3	1.56	1.62						0.7				
汉 02—14		56.4	57.0	56.2	56.4	57.1	57.1	1.60	1.50						0.9				
汉(芦)2.12		55.8	56.4	56.0	57.8	58.4	58.4	1.68	1.41						3.0				
汉(芦)1.26		56.9	56.8	58.1	57.1	59.9	59.9	1.56	1.62				1.50		0.3				
汉(芦)3.7		60.3	58.2	56.6	57.5	58.0	58.0	1.50	1.62						1.1				
汉(西)5.2		57.0	57.7	56.5	56.8	56.5	56.5	1.68	1.63						2.0				
三国 1.2	公元 618 年— 公元 905 年	57.2	56.8	56.9	56.8	55.7	57.6	1.53	1.27						1.5	0.77			
三国 2.2		54.0	54.3	53.6	53.3	54.2	56.4	1.44						1.41					
三国 2.8		55.5	54.3	54.9	55.1	55.9	55.9	1.34			1.34			7.9					
唐 2.1	公元 618 年— 公元 905 年	60.3	60.5	62.9		57.0	57.0	1.41							0.78				
唐 2.2		59.9	60.5	62.2		58.7	58.7	1.39											
唐 4.2		62.2	63.3	66.1		57.6	57.6	1.44											
唐 4.3		63.2	65.5	62.6		57.4	57.4	1.46											
宋 1.19	公元 960 年— 公元 1276 年	67.0	66.3	67.1	66.8	59.3	59.3	1.31						4.2	0.71				
宋 1.8		66.2	66.7	67.2	67.3	55.4	55.4	1.21		1.39				0.4					
元 1.21	公元 1280 年— 公元 1360 年	58.6	57.7	57.3	57.3	53.2	53.2	1.28						0.3	0.67				
元 1.20		58.7	57.4	56.1	58.0	55.2	55.2	1.38			1.15	1.03		0.3					
清 1.5	公元 1644 年— 公元 1911 年	49.7	49.4	48.9	48.2	55.9	55.9	1.03	1.02					4.2	0.62				
清 1.4		51.8	54.3	55.1	51.4	56.3	56.3	1.20	1.32					0.9					

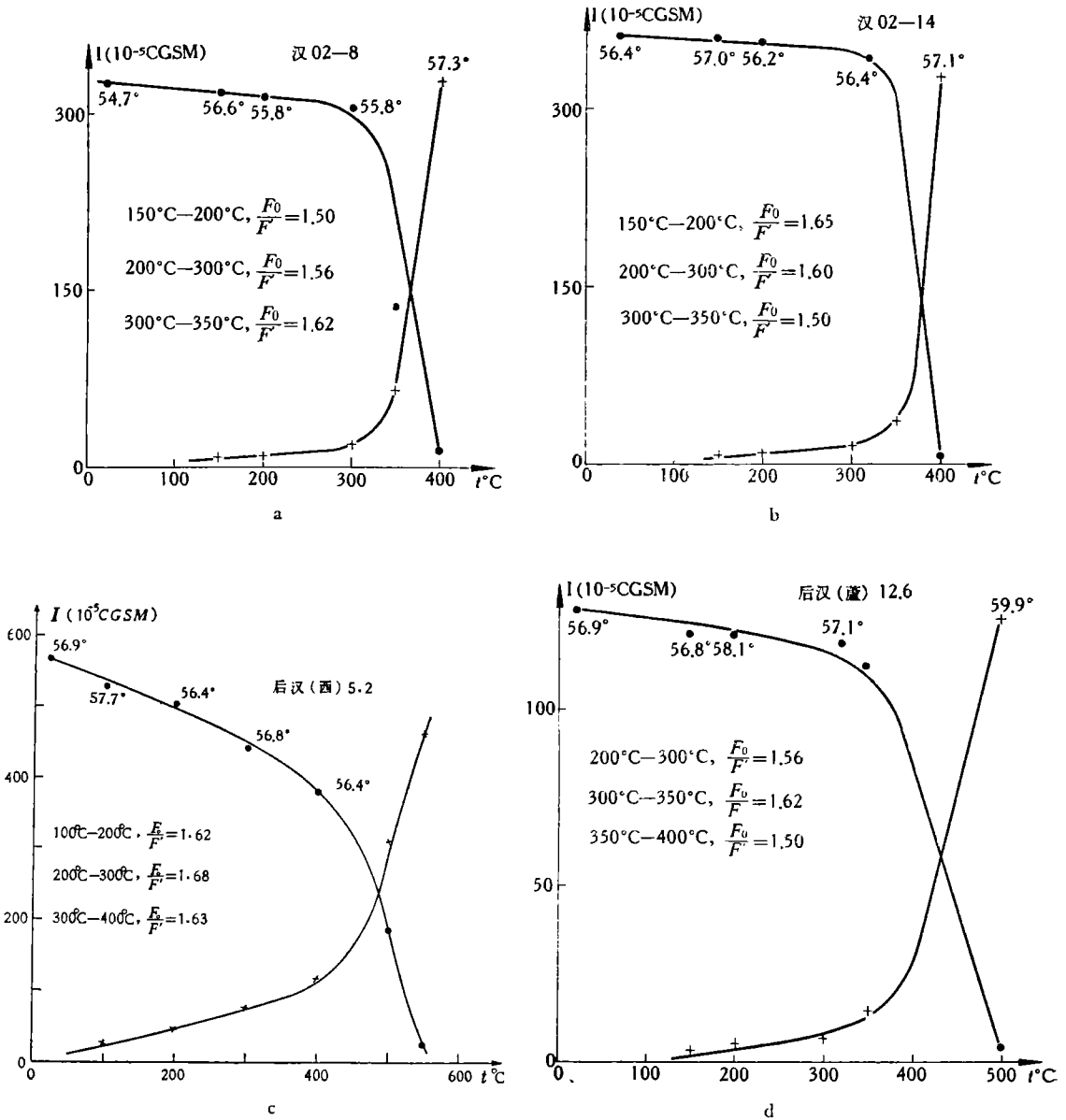
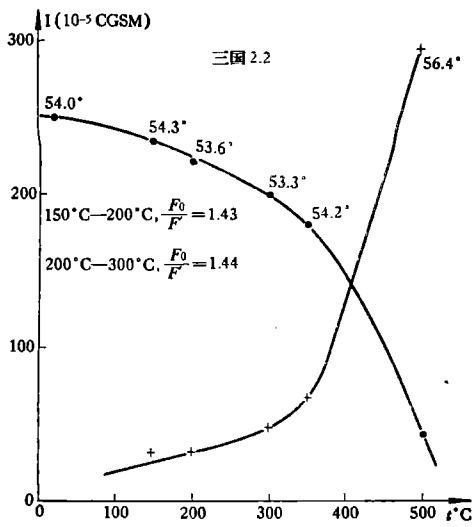


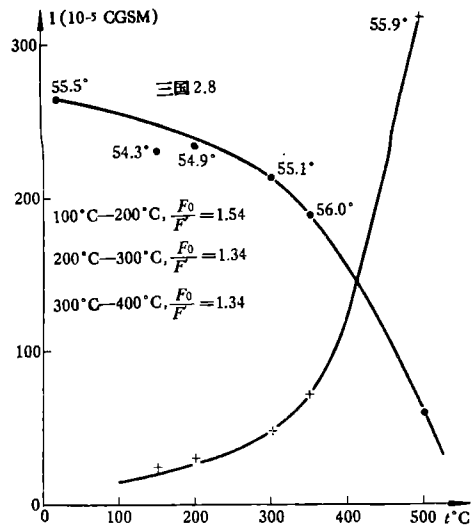
图 9 汉代标本加热试验结果

七十以上次生磁化强度与原始剩余磁化强度之比不超过 5%，仅有个别标本的这个比值达到 10%。

由“逐步加热”试验所确定的各朝代的平均值  $\bar{K}$  如下：汉 1.57，三国 1.41，唐 1.42，宋 1.29，元 1.21，清 1.12。北京现代地磁场的总强度为 0.55 高斯。因此与上述各朝代相应的地磁场强度分别为 0.86，0.77，0.78，0.71，0.67，0.62 高斯。图 15 是北京地区近两千年来地磁场强度的变化。显然可以看出，北京地区近两千年来地磁场是逐渐减小的，法国、苏联、日本所得的结果与我们的结果接近(图 16)。



a



b

图 10 三国时期标本加热试验结果

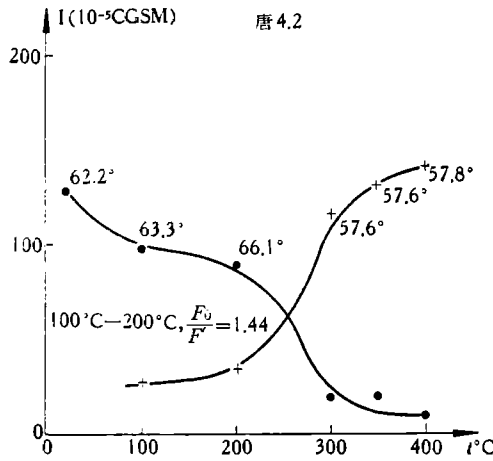
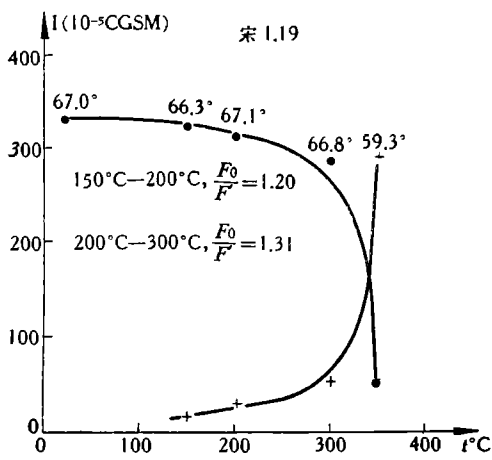
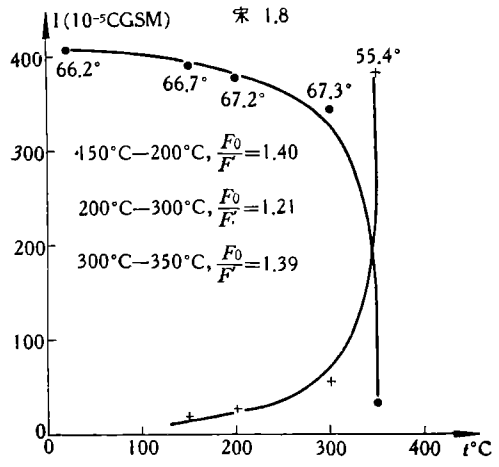


图 11 唐代标本加热试验



a



b

图 12 宋代标本加热试验结果

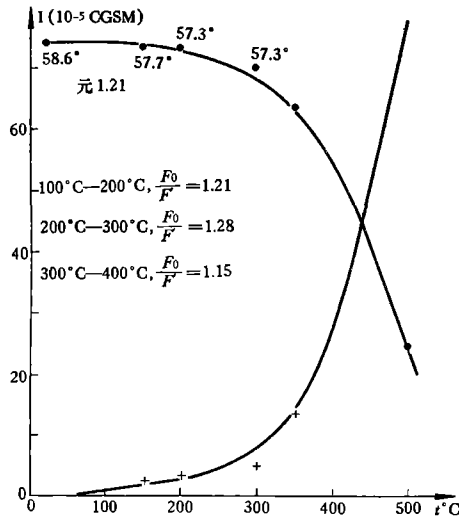
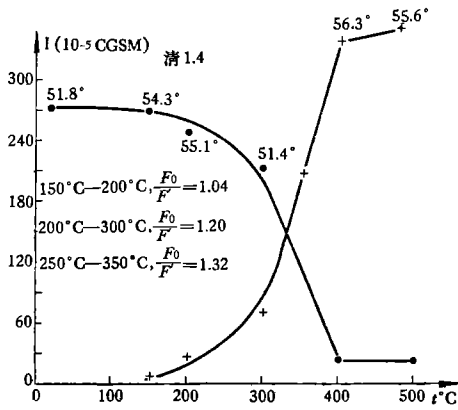
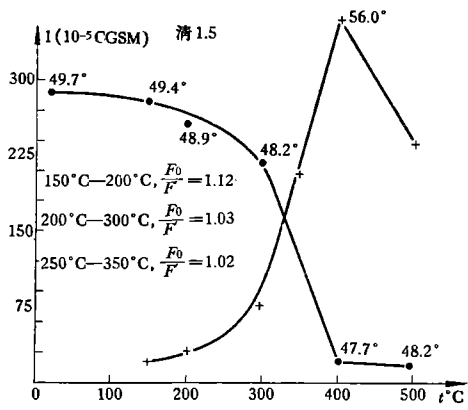


图 13 元代标本加热试验结果



a



b

图 14 清代标本加热试验结果

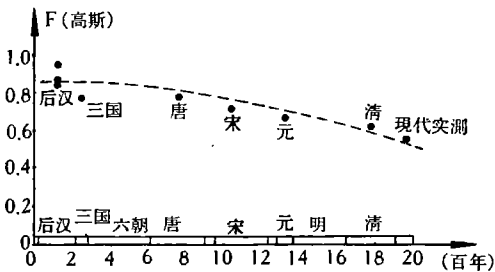


图 15 北京地区近两千年地磁场强度的变化

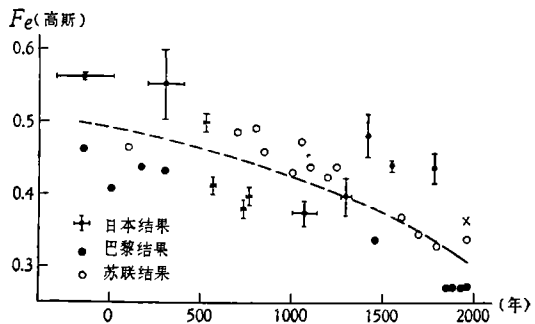


图 16 国外所得结果(根据文献[11])

## 四、結 論

根据上述结果我们可以得到以下的初步结论：

1. 北京地区地磁场倾角在近两千年来是在  $51^{\circ}$ — $66^{\circ}$  之间变化，并有循环性特征，循环周期一千余年。与国外结果相比可以看出，虽然磁倾角变化曲线的特征相同，但存在相位差。这可能是由于所处经度不同的缘故。北京地区磁倾角变化的相位与日本的结果相近，在五世纪和十七世纪，曲线上出现极小值，在十一世纪则出现极大值。这种情况与苏联高加索地区的磁倾角变化相位几乎正好相差  $180^{\circ}$ 。

2. 北京地区地磁场强度近两千年来是逐渐减小的。公元初期的地磁场强度约为现代地磁场强度的 1.6 倍。这一结果与法国、苏联、日本的结果相近。在倾角变化不大的情况下，地磁场强度的减小可认为是地球磁矩随时间的衰减。这一现象与维斯汀 (E. H. Vestine)<sup>[14]</sup> 根据 1836—1936 年实测资料分析所得到的地球磁矩逐渐减小的结果相符合。

本工作是在陈志强先生的指导下进行的。王子昌先生、周寿铭先生、刘庆龄先生和研究室的其他同志提出了许多宝贵的意见。在标本收集过程中曾得到北京市文物工作队郭仁、于震等同志的大力协助。仪器的装置和改进是得到顾子明同志协作的。特此致谢。

## 参 考 文 献

- [1] Телье, Е. и Телье, О., Об интенсивности магнитного поля земли в историческом и геологическом прошлом, *Изв. АН СССР, сер. геофиз.*, 1959, № 9, 1296—1331.
- [2] Большаков, А. С., Разделение термостатичной и нормальной компонент намагниченности температурным методом, *Изв. АН СССР, сер. геофиз.*, 1961, № 12, 1805—1815.
- [3] Большаков, А. С., Температурное разделение термостатичной и вязкой компонент намагниченности, *Изв. АН СССР, сер. геофиз.*, 1963, № 4, 606—609.
- [4] Бурлацкая, С. П. и Петрова, Г. Н., Археомангнитный метод изучения изменений геомагнитного поля в прошлом, *Геомагн. и аэрономия*, 1, 1, 111, 1961.
- [5] ———, Первые результаты изучения геомагнитного поля в прошлом археомангнитным методом, *Геомагн. и аэрономия*, 1, 2, 262—266, 1961.
- [6] ———, Восстановление картины изменения магнитного поля земли в прошлом при помощи археомангнитного метода, *Геомагн. и аэрономия*, 1, 3, 426—431, 1961.
- [7] ———, Изменение магнитного поля земли в прошлом по археомангнитным, палеомангнитным и обсерваторным данным, *Геомагн. и аэрономия*, 1, 4, 594—598, 1961.
- [8] Бурлацкая, С. П., Древнее магнитное поле земли в районе Тбилиси по археомангнитным данным, *Геомагн. и аэрономия*, 1, 5, 803—806, 1961.
- [9] ———, Исследование магнитного поля земли в прошлые эпохи археомангнитным методом, “Магнетизм горных пород и палеомагнетизм, материалы V всесоюзной конференции по палеомагнетизму, 1963.”
- [10] Watanabe, N., Secular variation in the direction of geomagnetism as the standard scale for geomagneto-chronology in Japan, *Nature*, 182, 4632, 383—384, 1958.
- [11] Nagata, T., Arai, Y. and Momose, K., Secular variation of the geomagnetic total force during the last 5000 years, *J. Geophys. Res.*, 68, 18, 5277—5281, 1963.
- [12] Nagata, T., *Rock-magnetism*, Tokyo, 1953.
- [13] Яновский, Б. М., *Земной магнетизм II*, 1963.
- [14] Vestine, E. H., Laporte, L. and Cooper, C., Geomagnetic secular change during past epochs, *Trans. Amer. Geophys. Uni.*, 27, 6, 814—822, 1946.

# THE GEOMAGNETIC FIELD IN PEKING REGION AND ITS SECULAR VARIATION DURING THE LAST 2000 YEARS

TENG HSING-HUEI LI TUNG-CHIEH

*(Institute of Geophysics and Meteorology, Academia Sinica)*

## ABSTRACT

The results of the archaeomagnetic study of the geomagnetic field in Peking region and its secular variation during the last 2000 years are presented.

The authors have measured the intensity of the natural magnetization of a number of ancient brick samples of known ages collected in Peking region for the last 2000 years. From these measurements the geomagnetic inclinations are deduced. The total intensities of the geomagnetic field are determined by means of Thellier's method of heating step by step.

The results clearly show that the inclination in Peking varies between  $51^{\circ}$ — $66^{\circ}$  during the last 2000 years, and has a cyclic variation, the period of which is about 1000 years. The total intensities  $F$  at the epoch of Han (206 B.C.—219 A.D.), San-Kuo (220—280 A.D.), T'ang (618—905 A.D.), Sung (960—1276 A.D.), Yuan (1280—1360 A.D.), Ch'ing (1644—1911 A.D.) are respectively 1.57, 1.41, 1.42, 1.29, 1.21, 1.12 times of that of the present field in Peking, the  $F$  decreases gradually with time during this period.