

磁法考古探测应用机制及其应用效果

张寅生

摘要 对地下文物的磁性通过模拟实验和实际应用研究,系统地阐明了应用磁法探测地下文物的机制、方法、特点和效果。从野外测量、资料处理到成果解释循序渐进地探索了磁法考古的工作方法、技术特点、异常规律和推断解释方法等。通过实例介绍,阐述了可操作性强,宜于推广应用的工作系统;并侧重论述了磁法考古应用的优越性及其应用前景,指出了进一步研究的内容和方向。

关键词 磁法考古;机制;技术;效果;研究方向

THE MECHANISM AND EFFECTS OF APPLYING MAGNETIC METHOD TO ARCHEOLOGICAL EXPLORATION

Zhang Yinsheng

(Chuzhou Institute of Preservation of Cultural Relics, Chuzhou 239001)

Abstract Based on model experiment and practical application of magnetic method for detection of underground cultural relics, this paper systematically describes the mechanism, technique, character and effects of applying magnetic method to the detection of underground cultural relics. From survey through data processing to interpretation of achievements, it probes step by step into the working method, technological features, anomaly regularity and means for inference and interpretation of magnetic archaeology. With practical examples, the paper recommends an operable and popularizable working system, emphatically deals with the merits and prospects of magnetic archaeology, and points out the content and direction of further research work.

Key words magnetic archaeology; mechanism; technique; effect; direction of research

90年代,地球物理勘探在野外考古中的应用出现了一派令人可喜的新局面。目前,投入的方法较多,有电法、磁法、探地雷达、浅层地震和遥感等,都有见效实例问世。在此仅介绍磁法考古研究所取得的成果。

1 地下文物的磁性

野外考古勘探的对象通常是地下古窑址、古冶炼遗址、古墓葬和古建筑遗址等古代遗存,它们通过多种方式获得一定的磁性,其磁性的强弱取决于其内在因素和外部因素。内在因素主要是指各类古代遗存或文物结构材料中磁性矿物的磁性、组分、颗粒大小和分布状态等;外部因素主要是指其生成过程中所处的磁场、温度、压力和化学

环境等。地下各类古代遗存和(文物)器物的磁性一般可分为以下几种。

1.古代的窑、炉、灶等遗存和砖、瓦、陶器、瓷器等文物，其原材料(粘土)中含有简单盐类、氧化物类和次生铝硅酸盐类等矿物。在烘烤过程中，由于热运动和地磁场的作用，使这类遗存和文物获得了热剩余磁性（也称温差顽磁性）。与此同时，化学作用（如氧化还原作用）使它们又伴生了化学剩余磁性。热剩磁和化学剩磁使这类文物具有较稳定的磁性，以热剩磁为主的文物遗存和由这类材料构成的古代遗址在野外考古中颇为常见。

2.古代的废物堆、藏物洞、窖、窟以及一些含腐殖质土层的遗址长期处于温度、压力发生变化的有机环境中，由于氧化还原作用，使其含有的铁氧化物转换生成新的磁性物质，如 Fe_2O_3 氧化还原为 Fe_3O_4 等，致使这类古代遗存中磁性物质生成，获得了以化学剩磁为主的磁性。

3.地下古建筑夯土基础以及后期沦为地下的古代夯土建筑（如河南省开封北宋时期城墙）等，在其营造过程中，土质材料受到层层夯压，其密度和结构等物理因素均产生了变化，随之磁化率呈现增大的趋势；再者，有些夯土材料取自于“异地”，与当地土层的矿物成分、含量等有所不同；加之夯土中人为掺杂着一些磁性物质（如陶片、瓷片、烧土颗粒等）使得这类古代遗存与周围介质产生一定的磁性差异。

4.某些地下古代遗存中含有的铁器、（磁性料质）石器 etc 文物，由于其含有一定量的铁氧化物、硫化物以及其他金属元素固溶体等铁磁性物质，均具有较强的天然剩磁。虽然这些古代器物体积较小，且当它们堆积成集合体，埋藏较浅时，就能够产生可测取的磁性异常。这种磁异常可成为寻找整个古代遗存的局部信息。

5.地层在缓慢沉积过程中磁性矿物颗粒在重力、水动力和磁场的作用下，其磁化方向有顺着地磁场方向排列的趋势，产生较为稳定的背景磁场。各类古代建筑，在其营造过程中，动土或挖空致使稳定的背景场中产生了与古代建筑位置相对应的紊乱磁场区域，这便成为寻找此类古建筑遗存的间接磁性信息。

表1列出几种常见考古材料的磁性参数。

表1 考古标本的磁性参数

名 称	红烧土(瓷窑)	红烧土(炼炉)	瓷 片	窑 砖	墓 砖	窑 具
$M_r/(A \cdot m^{-1})$	1.22	1.61	0.33	1.34 ~ 7.18	7.31 ~ 12.9	5.22
$I/(\times 10^{-6} \text{ SI})$	1170	6180	1080	1630 ~ 3250	1170 ~ 6220	5680
备 注	宋代古磁窑	汉代冶铜炉	北宋古窑址	宋代古窑址	三国时期墓	宋代古窑址
名 称	炼 渣	工作 台	现代 砖	水泥 制品	砂 土	
$M_r/(A \cdot m^{-1})$	11.2	0.172	1.05	0.1 ~ 10	0.001 ~ 0.1	
$I/(\times 10^{-6} \text{ SI})$	51000	10800	7030	100 ~ 1000	10 ~ 100	
备 注	汉代冶炼址	汉代冶炼址	资 料	资 料	资 料	

考古对象的磁性和规模都是应用磁法探测的必要条件，埋藏深度一般为几米至几十米，通过2个模拟实验来说明应用磁法考古的效果。

2 磁法探测模拟实验

2.1 瓷片模拟实验

实验点选择了一片地形平坦，背景磁场较为平稳的农田。分别设置了A，B，C三个瓷片模拟体，均为北宋时期的青釉瓷器和瓷片，参数及结果见表2。测网密度为0.5 m × 0.5 m，在模拟体附近加密为0.5 m × 0.25 m。探头高度经多次试验确定为0.3 m和0.5 m。

由表2可知，磁场强度与瓷片的总质量有关，质量越大则其磁场越强，且其异常形变小；模拟体的磁场强度影响着异常范围。磁场越强，产生的异常范围越大；异常范围的大小与埋藏深度相关。同一模拟体，埋深大的比埋深小的异常范围相对要大。

表2 古代瓷片模拟实验综合分析

模拟点		模拟体			磁场强度		异常形态		备注
代码	位置 点号/线号	埋深 cm	体积 cm ³	平面直径 cm	ΔT_{\max} nT	异常幅度 %	长轴 cm	长短轴比 值	
A	10/5	10	最小	30	9.8	22.5	40	3.0	瓷碗3个
B	14/4	10	12560	40	13.6	70.0	220	1.5	瓷片集合体
C	10/2	20	6280	20	10.9	36.3	144	1.7	同上

注：表中异常幅度 = $\frac{\Delta T_{\text{异常极大值}} - \Delta T_{\text{正常场值}}}{\Delta T_{\text{正常场值}}} \times 100\%$

图1为实测结果，在b图中的3个模拟体位置上呈现3个似等轴状的 T高值异常闭合圈；极大值点分别与模拟体中心位置对应，磁场梯度值越接近模拟体变化越大(图1d)。由图1还可知，不同探测高度对埋藏浅、场强较小的探测对象测量结果不同，选择正确的探测高度至为重要。

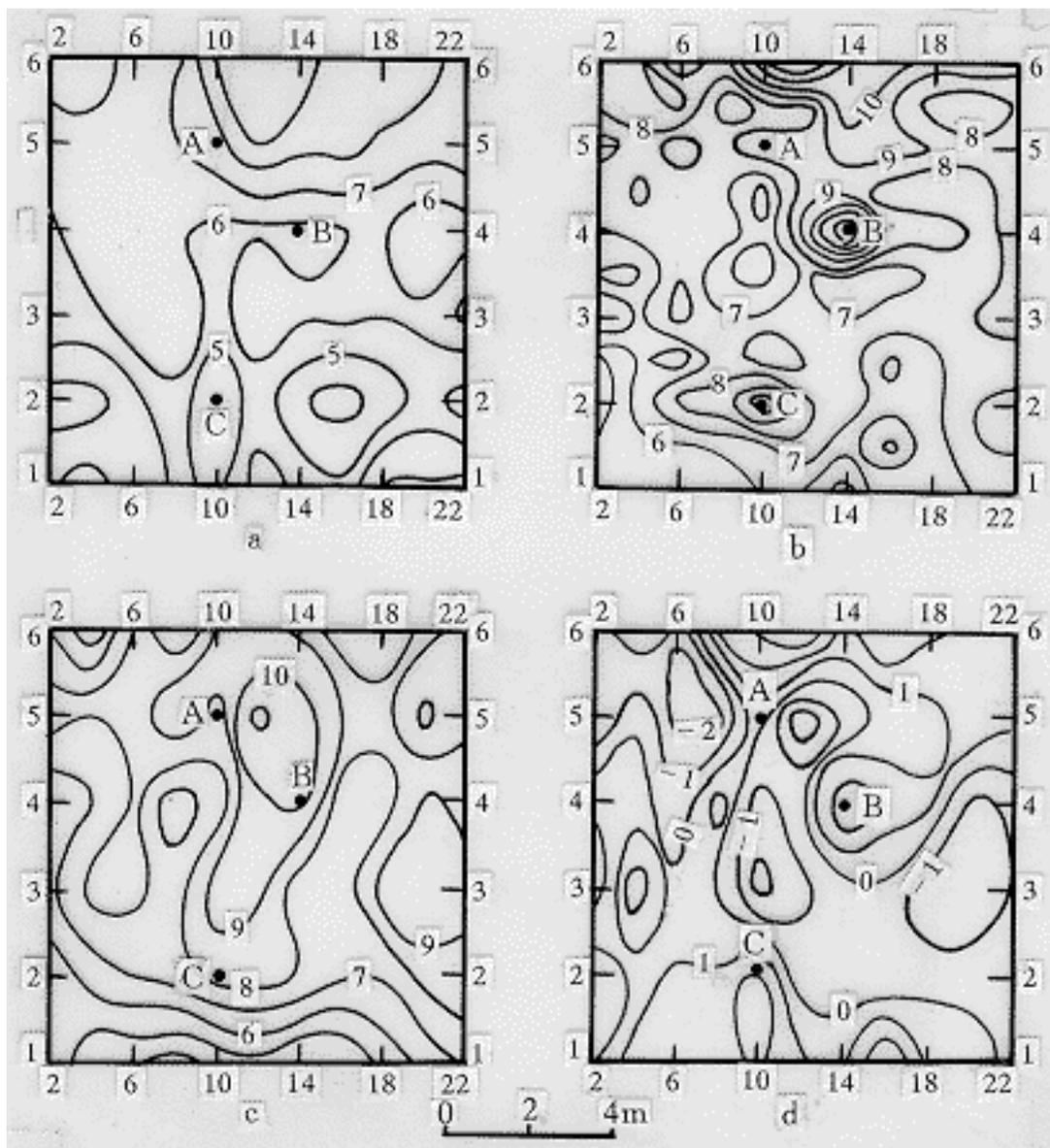


图1 瓷片模拟磁测 T综合平面等值线
a—磁背景场；b—探测高度为0.3 m的 T等值线；c—
探测高度为0.5 m的 T等值线；d—磁场梯度等值线

2.2 古炼炉遗存磁探实验

选择一已知的椭圆形古代冶铜炼炉，长轴2 m，短轴1.3 m，中心位于110/113点，北东走向，顶面埋深0.3 m；炉壁为红烧土，炉基系用炼渣掺土锤夯而成。测网密度为1 m×1 m，异常段加密为0.5 m×0.5 m。探测高度选为1 m，1.5 m。

图2为实验结果， 号异常呈椭圆形，长轴2.3 m，短轴1.6 m；最大值为-55 nT，为炼炉遗存反应，中心点位于110/112点，相对于炼炉中心约南移0.5 m。 号、 号磁异常为炼炉附近的工作台、工棚基址所引起的；实验中所产生的磁异常向南位移现象是斜磁化影响所致，需对其进行异常转换处理，处理后的 号异常中心与炼炉遗存中心仅差0.1 m。

模拟实验客观地论证了磁法考古应用的可行性和有效性，探索了野外测量方法、考古磁异常的特点以及资料处理方法等，为下一步实测应用研究奠定了基础。

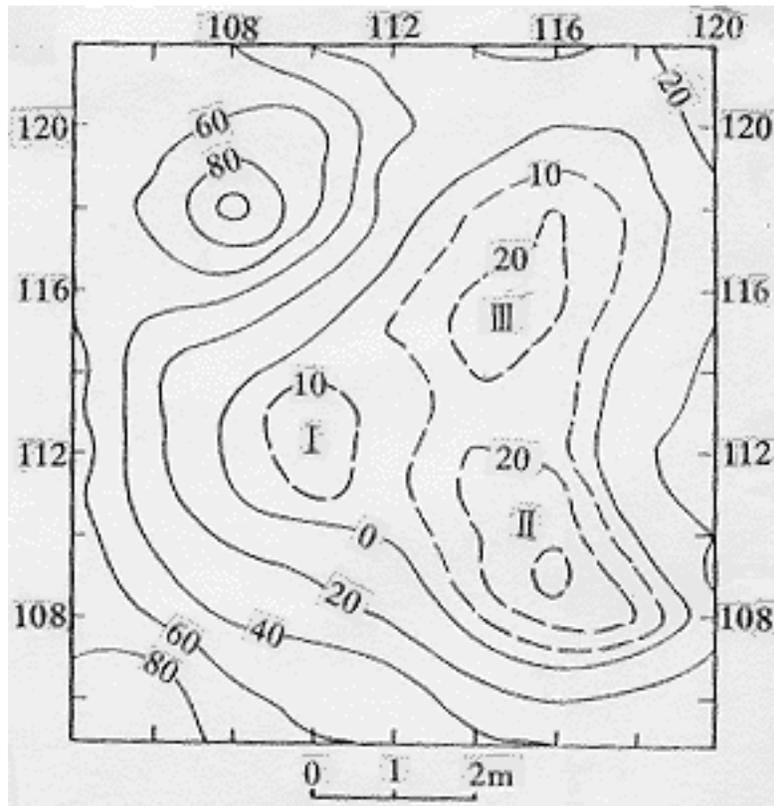


图2 古窑址模拟磁测 T平面等值线

3 实测应用研究

在应用机制研究和模拟实验的基础上，刻意选择了地下古窑址、古冶炼遗址和古墓葬3种有代表性的考古对象开展实测应用研究。在围绕磁测应用效果研究的同时，辅以直流电阻率法探测，探索磁、电方法综合应用的有关问题。先后有6例应用均获得了不同程度的成效，这里，择其业经考古验证的3例做以介绍。

3.1 五代—北宋时期瓷窑遗存探测

据考证，该瓷窑的形制为龙窑类，窑体顺山坡而上修建。原窑长达数10 m，宽数米；窑体两侧多为半穴式土砖石窑壁，上砌拱形券顶，顶高近2 m。此窑现已遭破坏。遗址地表为农田，瓷器碎片、废窑具比目皆是。一明水渠经过遗址，水渠两壁可见大范围红烧土出露。一侧渠壁上可见一拱形砖砌门券，但窑体位置难以确定。

古代磁窑遗存内含的磁性文物有经过多次高温烘烤的窑壁、窑具、红烧土和遗留的瓷器及其碎片；窑体周围有以红烧土和废、碎瓷器为主的生产废堆。

磁测使用IGS?2/MP?4型质子磁力仪，灵敏度为0.1 nT。每个测点分别读取高度为0.5 m和0.8 m两种数据。

图3a为该遗址实测 T平面，图中呈现一正、负伴生的带状古窑体异常。由于来自深部、地表、旁侧磁性干扰的影响，使得此异常范围扩大，边界也不够清晰；又由于斜磁化的影响，其中心位置可能产生偏移。为此，将实测结果进行了化（向磁）极和求导等异常变换处理。化极处理后的异常位置北移0.4 m；再经一阶导数处理，初步消除了水平迭加磁异常影响，使窑体异常尤为清晰、突出。图3b中异常带于80线处，宽度发生了变化，并分解出另一个磁异常，并持续延伸。综合古窑址考古要素和地形特点分析认为，由于地表水渠切割古窑体，使部分古窑遗存磁性体残缺，将原来完整的

磁异常分割为两部分；80号线已位于坡下，接近窑门部位，生产废料相对集中，致使异常于此向坡下延伸。

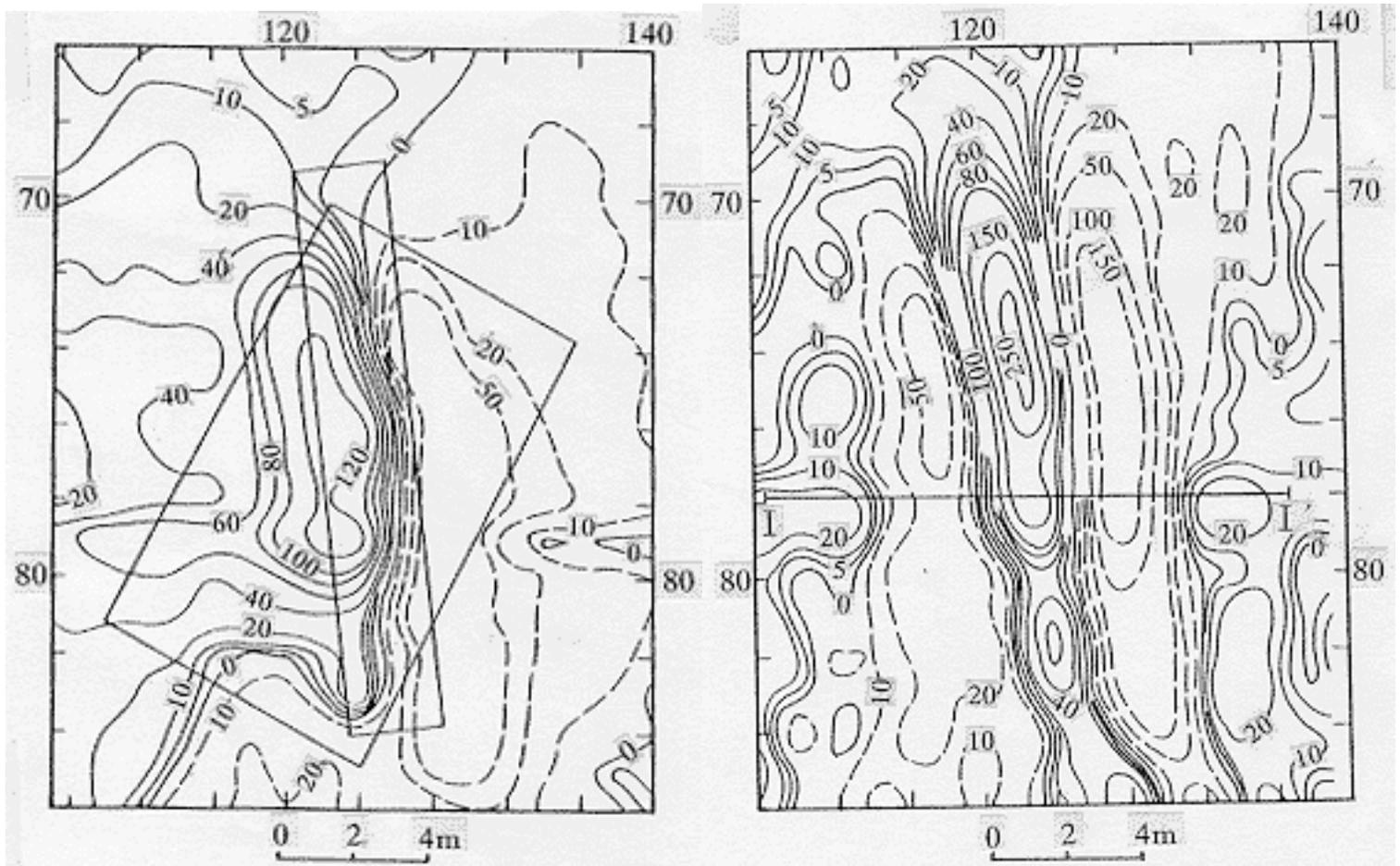


图3 古窑遗址磁法勘探及研究成果
a— T等值线平面；b— T一阶导数等值线平面

图4为窑体磁异常中心部位的 T ， s 综合剖面。联合剖面和四极对称 s 曲线的高阻段宽达22 m许，显然与古窑体宽度相差甚远，其中包括了窑体两侧生产废堆高阻体的反应；于高阻异常中段的 A_s ， B_s 曲线出现了相互交叉的现象，与此对应的 T 曲线产生了正、负伴生的磁异常。由此推断古窑体遗存的中心位置于125号点，剖面宽度为2.5 m。

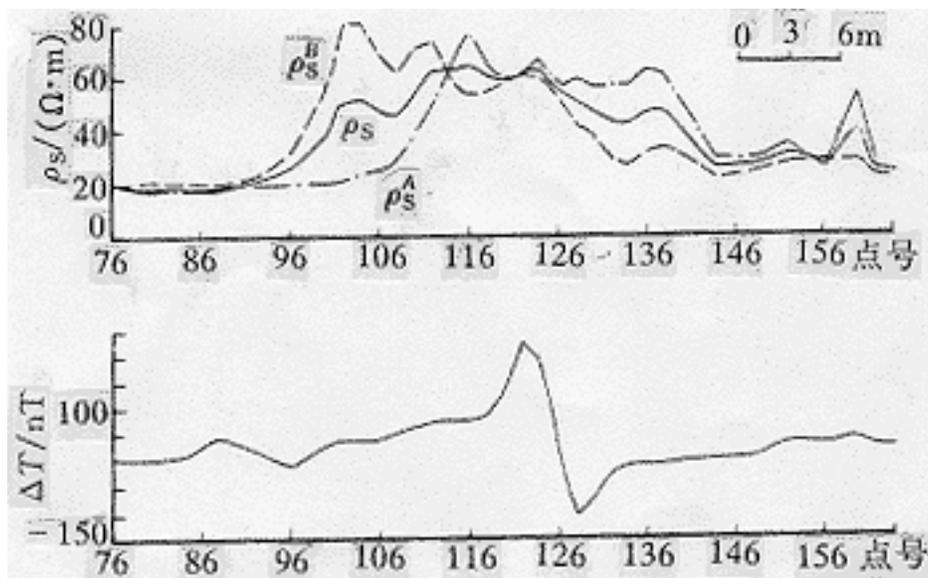


图4 古窑遗址 — 剖面综合剖面

结合其他资料推测古窑体遗存长15 m,位于测网69~84号线之间,北东走向;宽度为2.5 m;中心点位于124/79点,其顶面埋深为0.74 m。磁异常揭示为北宋时期的龙型瓷窑遗存,与发掘结果基本吻合。

值得一提的是,前文提到的水渠壁上的拱形砖券(位于测网121/76点),磁探结果否定了其为窑体遗存的推测。发掘揭示其为红烧土坯砖(碎)块堆积偶成拱形,其下为不含文化遗物的粘土层。

3.2 东周—西汉时期冶炼遗址应用

皖南古铜矿冶炼遗址是我国东南地区发现的唯一古代大型冶矿遗址,与铜陵古采矿遗址构成一完整的体系。古冶炼遗址的考古对象主要是冶炼炉、工作台、工棚和生产品、炼渣、燃料等。现地表大面积地堆积着厚厚的炼渣,炼渣多呈蘑菇状,褐色、坚硬、表面多挂流;遗址内分布、埋藏着许多残废炼炉。炉基系炉渣锤砸而成,炉缸和炉身为红烧土,铁锈色,呈颗粒状集合体,主要成分是石英、赤铁矿粉和粘土,颗粒直径0.1~0.2 cm,厚度10~12 cm。该遗址内文物标本化学成份含量详见表3。

表3 古冶炼遗存标本主要化学成分含量

标本	化学成分质量分数/%				
	Cu	Fe	Sn	Pb	Zn
冰铜锭	38.58	35.77	0.02	0.015	0.002
炼渣	Cu:0.34	FeO:28.92		Fe ₂ O ₃ : 7.39	
矿石	SiO ₂ : 1	Fe ₃ O ₄ : 70		Fe ₂ O ₃ : 20	
残炉壁	主要成分: 石英砂、赤铁矿粉、粘土				

商周时期，我国冶金术高度发展。冶铜炼炉温度可高达1200 以上，并反复经历了高温—冷却—高温的热磁化过程。表1列示炼炉标本的剩余磁化强度 M_r 一般达 $10^{-6} \sim 10^{-5}$ 数量级，磁化率 达 10^{-2} SI。

图5a是该遗址探测高度为1 m的实测 T平面，从中可见其磁场分布特点是磁场变化较大，背景场值较高。相应之下，炼炉遗存反应为一 T负值异常区。通过磁性参数分析知，该遗址内炼渣和围土的磁参数值都远远大于红烧土和工作台（遗存）的磁参数值。大范围的炼渣，造成了较高的背景场值，则炼炉遗存的 T值则表现为负值。在 T负值异常区内可分辨出4个强弱不等的异常，其中G1，G2的异常强度相对较大，其余两个异常强度相对较小。当探测高度为1.5 m时，两个强度较小的异常消失，而在G1，G2异常周围形成两个范围较大的闭合圈。将图5向上延拓2 m，负异常区消失。T负值异常的垂向梯度达100 nT/m，说明其为浅源异常体。

对图5a进行化极处理，校正其位移距离为0.5 m。另外，采用1 m和1.5 m的探测高度，垂向梯度平面图（图5b）清晰地反应出目标文物异常的分布形态。因此认为，G1，G2异常均为炼炉遗存反应。G1炼炉平面为椭圆形，中心位于测网106/116点，范围为1.3 m×0.9 m，长轴NNW走向；G2炼炉平面为圆形，位于101/120点，范围为1.4 m×1.4 m；分别与两炼炉靠近的2个强度较弱异常均为工作台遗存反应。

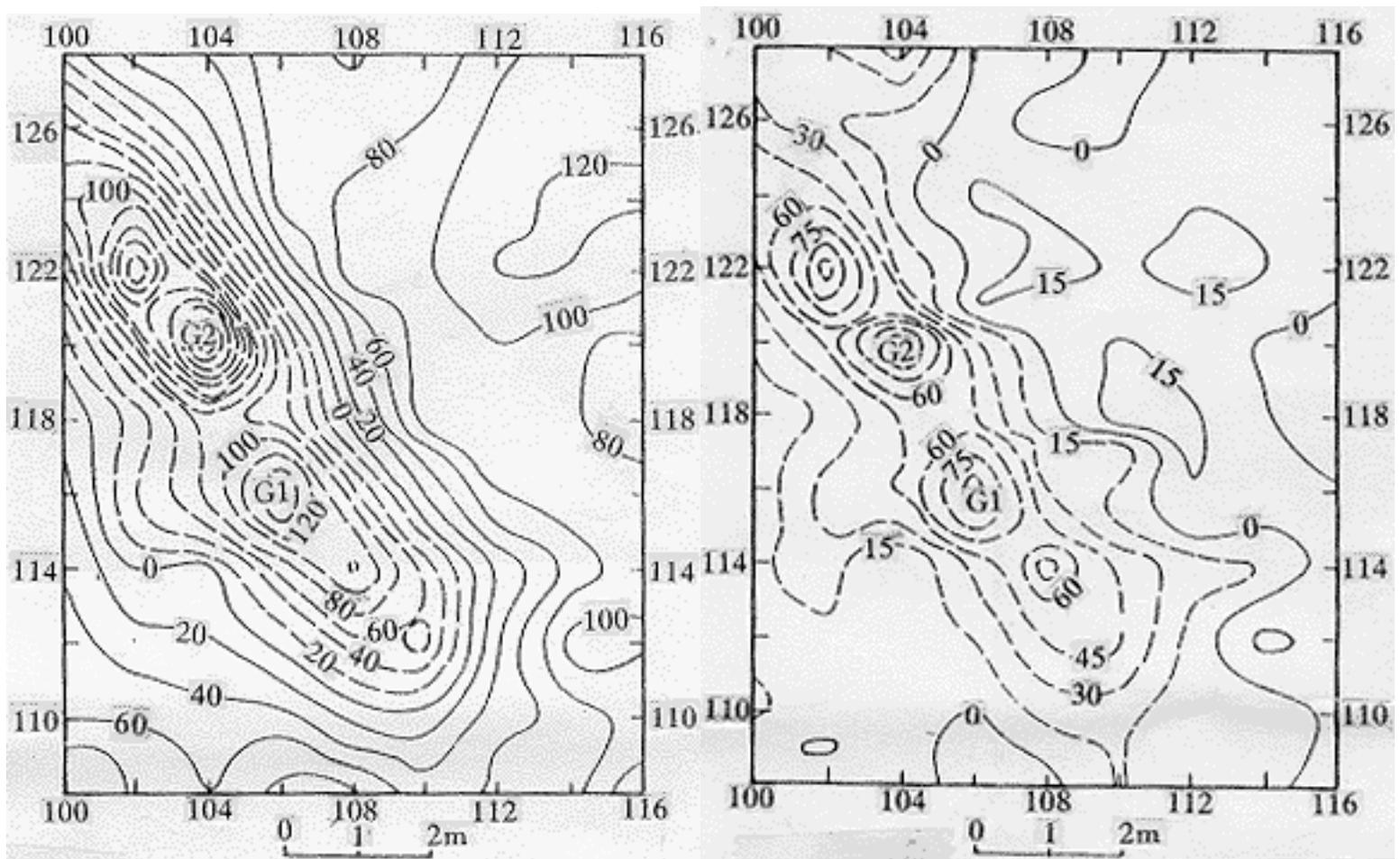


图5 古冶炼遗址磁法勘探及研究成果
a— T等值线平面；b— T垂向梯度等值线平面

考古发掘证实，此测区内发现炼铜炉残基2座。“江马炉4号”的炉基为椭圆形，内壁长径1.2 m，短径0.7 m，炉壁厚0.20~0.25 m，炉基外径为1.4 m×1.0 m左右；“江马炉5号”的炉基呈圆角方形，内壁直径为0.8 m，炉壁厚0.25~0.30 m，外径为1.3~1.4 m；2个炼炉附近均发现工作台遗存，其由直径0.1~0.5 cm的碎炼渣铺成，厚5~15 cm，致密坚硬，似现代砣结构。考古发掘所揭示地下古炼炉遗存的形状、大小、分布等与磁探解释结果基本相同。

3.3 东汉时期地下陵墓勘探

东汉时期的陵墓大多为砖结构、多墓室，且数室相连，其上逐层夯土而成坟冢。墓的平面布局有矩形、方形，也有不规则多边形，一般都有墓道。探测这类砖结构的陵墓，磁法的应用大多获得较为显著的效果。

该墓的探测高度选择为1.0 m，1.5 m。磁测结果获得一“馒头形”的 T正值异常区（图6a），其周边均为 T负值背景。对 T实测数据进行了化极处理（图6b），异常区向北位移，南北边界较为清晰；北界 T化极等值线连续、平直；南界 T化极等值线出现了以70号点为中心，宽约6 m的“开口”，并产生向南延伸的趋势。对此，结合东汉时期的墓葬形制特点分析，此可能为墓道反映。推测墓道于68~72号点间。从图中可见东西边界发生扭曲，其部位与该墓的坍塌洞对应。

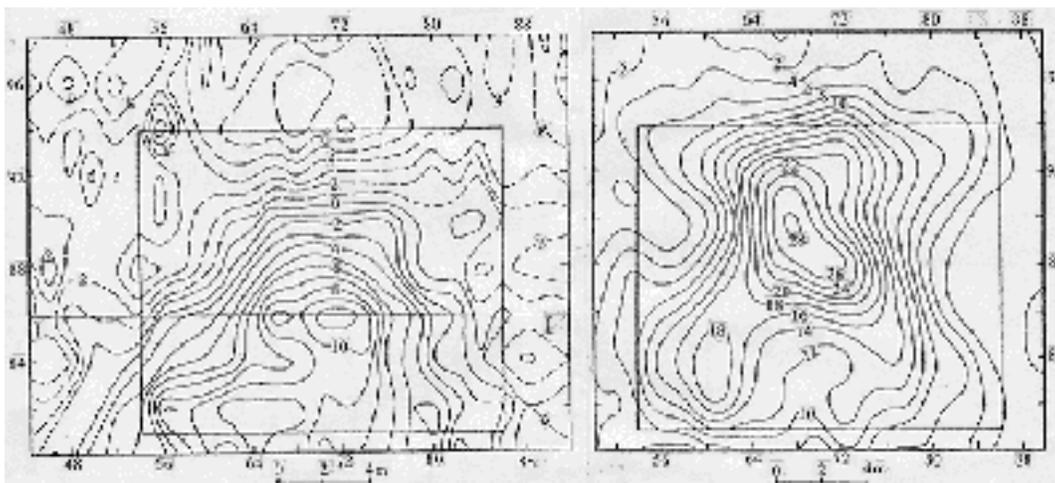


图6 古墓葬遗址磁法勘探及研究成果
a— T等值线平面(探测高度1.5 m)；b— T化极等值线平面

结合电法测量(图7)，在 T异常相应位置出现了 ρ_s 高阻异常反映，异常形态较为清晰地反映了地下墓室的平面趋于矩形。将其与磁探结果综合分析，推断墓的南北界分别位于测网81号线和94号线。

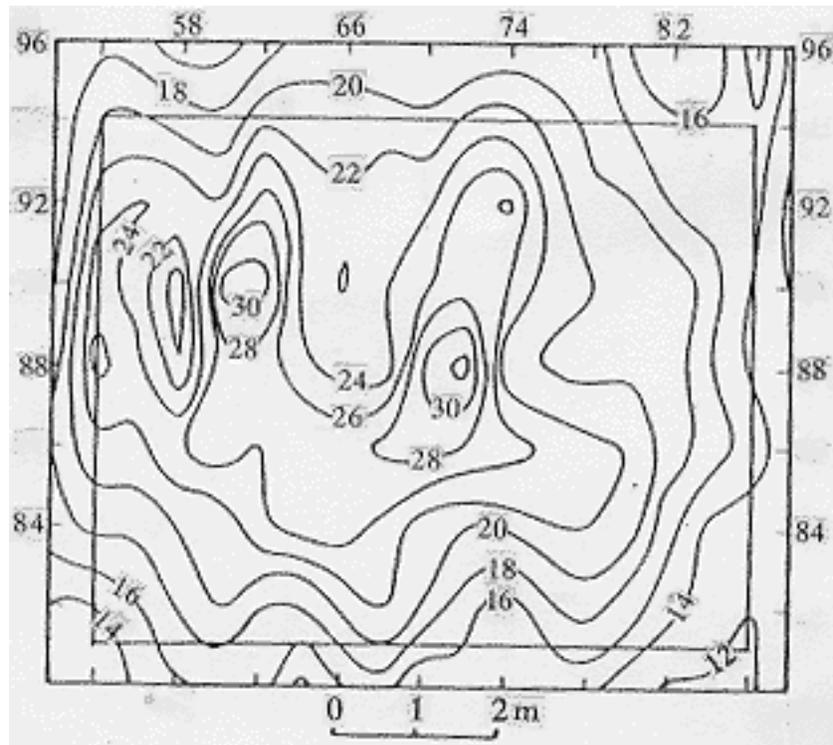


图7 古墓葬遗址 ρ_s 等值线平面

图8为 T 和 ρ_s 综合剖面，图中 A_s ， B_s 为联合剖面曲线， ρ_s 四极对称曲线。从中显见，墓室的東西中心点位于70号点附近，东西界分别推断于54号点和86号点。经切线法推算出墓室顶部埋深为1.5 m。

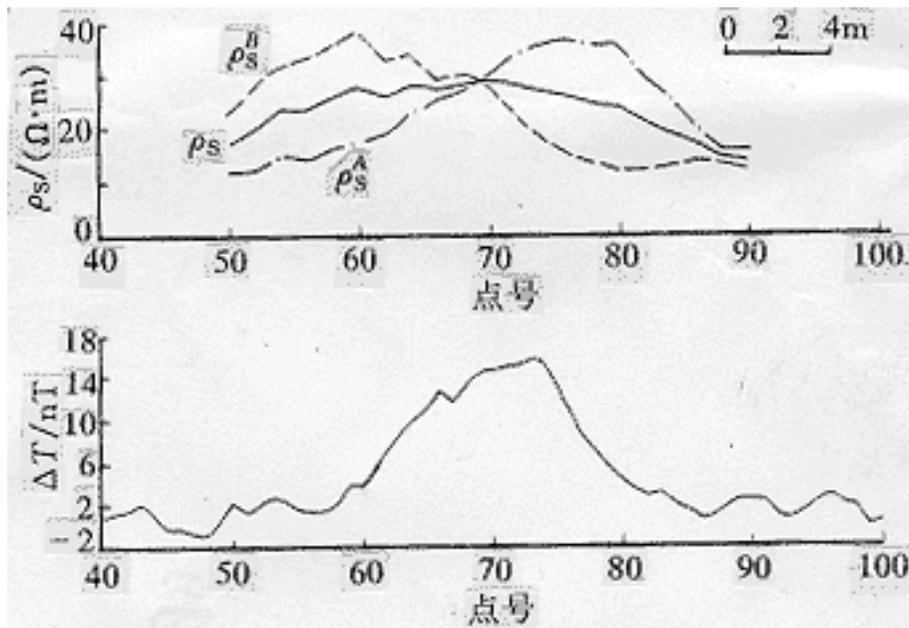


图8 古墓葬遗址 — 线综合剖面

综上分析解释，该墓平面布局为矩形，东西长16 m，南北宽13 m；墓室坐北朝南，南边有一墓道，经考古得以验证。

4 成果的分析 and 认识

通过磁法考古应用机制理论分析、模拟实验、实际应用和考古发掘验证，较系统地研究了磁法考古应用的前提、方法、特点和效果，客观地评价了磁法考古应用的可行性和有效性，从野外工作方法和资料解释处理阐述以下几点认识。

1. 磁法勘探网密度的确定要考虑考古对象的磁场强度大小。对于 T 异常幅度大于70%的考古对象，测网可适当放稀，测点间距控制在考古对象剖面长度的1/3左右；对于 T 异常幅度小于30%的考古对象，测网密度需适当加密，测点间距不大于考古对象剖面长度的1/4。

2. 磁测探头高度的选择在文物勘探中尤显重要，直接影响着能否准确地测出考古对象的异常反映。对于规模较小的炉、灶、窖、窟一类古代遗存，应倍加重视正确探高的试验选择。

3. T 剩余异常是磁法考古应用中较为合适的成果参数。它可以灵活地设置背景场，削弱某些强背景磁场的掩饰影响，较为直观地表现考古目标所产生的磁异常。

4. 对磁测数据处理或异常转换进行化极、求导、梯度和位场延拓等方法，较为有效地修正斜磁化造成的异常位移；压抑了浅源磁性体的干扰，突出浅部文物磁性体反映；区分水平方向的迭加异常，更为准确、完整地表现文物异常形态；消除或辨别地表不均匀性的磁干扰信号。

5. 每一种物探方法都不是唯一有效的，要根据考古对象所具备的物性条件配合其他物探资料进行综合分析。

5 结束语

物探在考古研究工作中起到了积极的作用，但物探仅是一种间接地探测方法，可完成考古普查阶段的勘探任务。

物探考古应用研究工作还在继续发展，层出不穷的成功实例充分证明，此项研究前景是广阔的。它不仅为物探方法开拓了一个新的应用领域，也为野外考古勘探工作的科学化和现代化开创新局面，并还将有力地推动水下考古和航空考古事业的向前发展。

作者简介：张寅生，男，1950年7月生，江苏省南京市人。1976年毕业于合肥工业大学物探专业。现就职于安徽省滁州市文物保护科学技术研究所，所长，高级工程师。自1980年以来，专门从事于物探考古应用研究工作；主持、参加完成了电法应用和磁法应用方面的研究课题数项，研究成果多次获奖；现已在国家、省级物探和文物考古类专业刊物上发表论文10多篇。

作者单位：安徽省滁州市文物保护研究所，滁州 239001

6 参考文献

1张寅生.物探在考古勘探中的应用初探.物探与化探，1990(6)

- 2董平波.高精度磁测在勘察古墓上的应用.工程勘察, 1991(2)
- 3阎桂林.考古磁学—磁学在考古中的应用.物探与化探, 1996(2)
- 4日)奈良国立文物研究所.杨晶译.遗址的探查法, 北方文物, 1996(4)
- 5张维喜.考古地磁学及其在考古学中的应用.考古, 1989(10)

1998年1月19日收稿, 同年3月4日收修改稿。