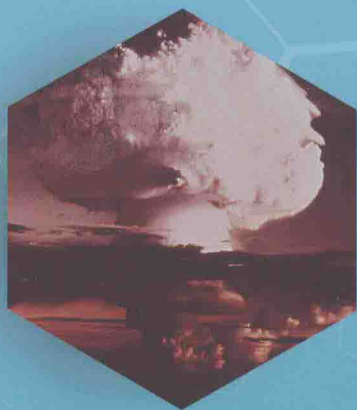


◆ 国家十二五规划图书 · 前沿科技聚焦

丛书顾问 / 谢家麟 刘嘉麒

新型交叉学科 核考古

冯向前 闫灵通 李 丽◎著



科学普及出版社
POPULAR SCIENCE PRESS

国家十二五规划图书·前沿科技聚焦

丛书顾问：谢家麟 刘嘉麒

新型交叉学科

核考古

冯向前 闫灵通 李 丽 著



科学普及出版社

·北 京·

图书在版编目 (CIP) 数据

新型交叉学科——核考古 / 冯向前等著. —北京 :
科学普及出版社, 2015.7

(前沿科技聚焦)

ISBN 978-7-110-08923-1

I. ①新… II. ①冯… III. ①核技术应用—考古技术
IV. ① K854-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 126273 号

策划编辑	赵 晖 付万成
责任编辑	付万成 夏凤金
装帧设计	中文天地
责任校对	何士如
责任印制	张建农

出版发行	科学普及出版社
地 址	北京市海淀区中关村南大街16号
邮 编	100081
发行电话	010-62103130
传 真	010-62179148
网 址	http://www.cspbooks.com.cn

开 本	787mm × 1092mm 1/16
字 数	200千字
印 张	7
版 次	2015年9月第1版
印 次	2015年9月第1次印刷
印 刷	北京凯鑫彩色印刷有限公司
书 号	ISBN 978-7-110-08923-1 / K · 137
定 价	35.00元

(凡购买本社图书, 如有缺页、倒页、脱页者, 本社发行部负责调换)

目录

第一章 放射性同位素测年技术 / 001

第一节 加速器质谱 ^{14}C 测年技术 / 001

第二节 铀系同位素测年技术 / 014

第三节 钾-氩测年技术 / 018

第二章 文物产地研究的利器 / 025

第一节 中子活化分析的原理 / 026

第二节 中子活化分析的样品制备和测量 / 028

第三节 中子活化分析的特点 / 030

第四节 中子活化分析在考古中的应用 / 031

第三章 同步辐射技术在考古中的应用 / 040

第一节 引言 / 040

第二节 同步辐射 -X 射线衍射分析 / 044

第三节 同步辐射 X 射线吸收光谱 / 048

第四节 同步辐射在考古学中的应用 / 051

第四章 透视文物的火眼金睛 / 059

第一节 X 射线成像 / 060

第二节 中子成像 / 071

第五章 给文物消消毒 / 079

第一节 伽马射线辐照 / 080

第二节 电子辐照 / 084

第六章 无损分析技术在考古中的应用 / 090

第一节 X 射线荧光分析 (XRF) / 090

第二节 质子激发的 X 射线荧光分析 (PIXE) / 100

放射性同位素测年技术

第一章

放射性同位素测年法（也指放射性测年法）是根据岩石的放射性元素的衰变估测它们年龄的过程。在自然界中，有某些种类的原子是不稳定的，会自发改变（衰变）成其他种类的原子。例如，铀会通过一系列步骤发生放射性衰变，直到它变成稳定的元素铅。同样地，钾衰变成元素氩。最初的元素是指母元素（铀和钾），最终所得到的元素称为子元素（铅和氩）。

第一节 加速器质谱 ^{14}C 测年技术

碳-14 (^{14}C) 测年法又叫作放射性碳素断代法，该方法是由 1960 年诺贝尔化学奖获得者美国芝加哥大学利比 (Willard Libby) 教授 (图 1-1) 于 1946 年首次提出，并随之得到了快速的发展。该方法对于考古界和地质界具有重要意义。它使多数国家的史前年代学有了统一的时间尺度，被誉为“放射性碳素的革命”。在考古研



图 1-1 美国芝加哥大学利比教授

究中, ^{14}C 常规测年方法得到了广泛的应用,然而很多珍贵的文物由于其含碳量有限而使 ^{14}C 常规测年方法无法使用。针对 ^{14}C 常规测年方法的局限性,20 世纪 70 年代末加速器质谱 ^{14}C 计数法以 1987 年在罗切斯特大学召开的第一次国际加速器质谱会议为标志诞生。 ^{14}C 测年技术之所以在国际范围内得到普遍推广,是由于其理论完整,又采用了现代精确测试技术。特别是近年来对一些技术的改进,如利用校正曲线使测量结果直接转换成样品实际年龄;样品制样方法和技术提高;加速器质谱仪和微型计算机的使用更增加了其测定结果的精确性。应用范围予以扩大,它不仅用于考古学中,而且在第四纪晚期地质年代学、古气候、古地理、海洋学等也广泛使用。

一、加速器质谱 ^{14}C 测年技术原理

自然界存在三种碳的同位素: ^{12}C 、 ^{13}C 、 ^{14}C ,前两者比较稳定,而 ^{14}C 属低能量的放射性元素。 ^{14}C 的产生和衰变处于平衡状态,其半衰期为 5730 ± 40 年(现在仍使用 5568 ± 30 年)。宇宙射线同地球大气发生作用产生了中子,当热中子击中 ^{14}N 发生核反应并与氧作用便产生了地球上的 ^{14}C 。在大气环境中新生 ^{14}C 很快与氧结合成 $^{14}\text{CO}_2$,并与原来大气中 CO_2 混合,参加自然界碳的交换循环。植物通过光合作用吸收大气中的 CO_2 ,动物又吃植物,因而所有生物都含有 ^{14}C 。生物死后,尸体分解将 ^{14}C 带进土壤或大气中,大气又与海面接触,其中的 CO_2 又与海水中溶解的碳酸盐和 CO_2 进行交换。可见,凡是和大气中进行过直接、间接交换的含碳物质都含 ^{14}C 。同时 ^{14}C 又以 5730 年的半衰期衰变减小;加上碳在自然界的循环交换中相当快,使得 ^{14}C 在世界各地的水平值基本一致。如果生物体一旦死亡, ^{14}C 得不到补充,其中的 ^{14}C 含量就按放射性衰变规律减少,经过 5730 年减少为原来的一半。因此可以计算出生物与大气停止交换的年代 t ,即推算出生物死亡的年代。所以,一切死亡的生物体中的残存有机物以及未经风化的骨片、贝壳等都可用 ^{14}C 来测定年代。

要说明的是, ^{14}C 测年法基于几个假设条件之上:①假设大气中 ^{14}C 的产生率不变。地球上的交换碳近数万年来基本恒定,但 19 世纪后半叶工业活动的增加,20 世纪原子弹的爆炸形成的工业效应、原子弹效应,已减少了大气中 ^{14}C 的含量。②假定放射性衰变规律不变,不受任何外界环境的影响,生物样品一旦死亡就停

止与碳储存库进行自由交换。半衰期最初为 5568 年，近年来推算应为 5730 年，但这个对研究影响不大。③地球上各交换库中 ^{14}C 的放射性比重不随时间、地点、物质种类而改变，这个假设经检验基本成立。国际公认 ^{14}C 测年中的 BP 起算点是 1950 年（因为之后人工核爆炸产生的大量 ^{14}C 对大气影响很大），1850—1950 年的样品因工业化过程释放的 CO_2 使得 ^{14}C 测年数据稍偏老。

^{14}C 测年技术的基本思想是，若已知一个放射性核素的半衰期，可以利用核衰变规律，建立一个时钟测定过去流逝的时间。在技术上先将待测样品转化为石墨，然后在加速器中将石墨离子化，通过加速器将石墨离子束流中的 ^{12}C 、 ^{13}C 和 ^{14}C 离子分开，并测量它们各自的束流强度，并用粒子探测器对束流中 ^{14}C 离子进行计数探测，从而得到样品相对于现代碳标准物质中 ^{14}C 相对于 ^{12}C 或 ^{13}C 的原子数之比。进而利用放射性核素 ^{14}C 的半衰期来计算样品的年代。

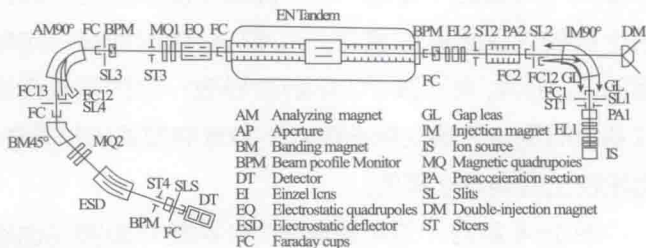


图 1-2 北京大学加速器质谱仪原理图



图 1-3 北京大学加速器质谱 ^{14}C 测年装置

常规 ^{14}C 测年技术的主要缺点是耗费的样品量大和测量时间过长，一般要求样品中至少含有 1g 碳并且测量时间超过一天。加速器质谱 ^{14}C 测年技术是通过直

接测量样品与现代碳标准物质中 ^{14}C 相对于 ^{12}C 或 ^{13}C 的原子数之比来定样品年代的，不必像常规技术那样测量原子的衰变，因而极大地提高了样品的利用率。它主要的优点有：①样品用量少。取样 1mg 甚至更少的量就可以满足测量需求，从而使该技术可以应用于更多的样品。②缩短了测量时间。测量一个样品只需要几十分钟，从而大大地提高了工作效率。

二、 ^{14}C 年龄系统误差的树木年轮校正

^{14}C 测年技术有三个假设，其中前两个假设是最基本的，只有严格成立了才能保证大气有恒定不变的 ^{14}C 同位素丰度和放射性比活度。但是大量研究表明，这两个前提仅仅是近似成立， R_0 和 A_0 随时间有一定幅度的变化和涨落，因此用固定的 R_0 和 A_0 来计算 ^{14}C 年龄会导致一定的系统误差，需要加以校正。校正就是通过系统的测量已建立标准树木年龄宽窄模式的年轮样品的 ^{14}C 年龄，建立 ^{14}C 年龄树轮校正曲线来实现的。

图 1-4 是约 1 万年跨度的 ^{14}C 树轮年龄校正曲线，由图可见曲线有两个明显的特点：①对于公元前的样品， ^{14}C 年龄系统的偏年轻，而且样品年龄越老，偏离越大，对于 BC8500 的样品，实测的 ^{14}C 年龄仅距今约 9700 年，即 ^{14}C 年龄偏年轻约 1000 年，因此 ^{14}C 测年结果必须校正。② ^{14}C 年龄树轮曲线不是一条单调变

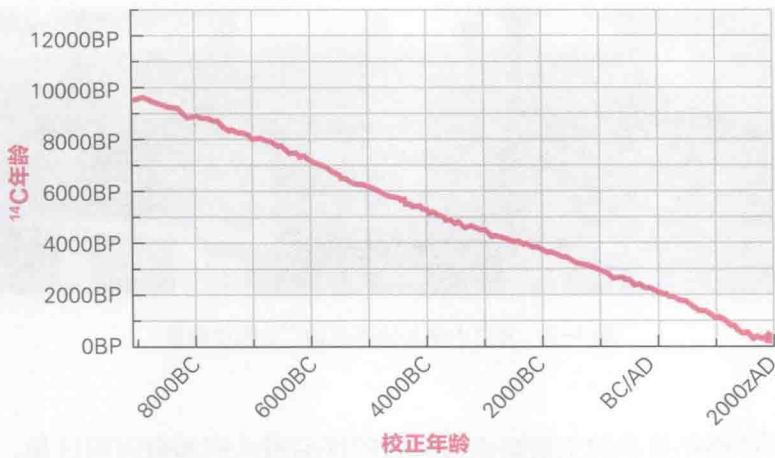


图 1-4 1 万年以来 ^{14}C 年龄树轮校正曲线

化的曲线，而是有很多幅度的起伏。将图 1-4 放大后（如图 1-5 所示），可以看到起伏还是很明显的。

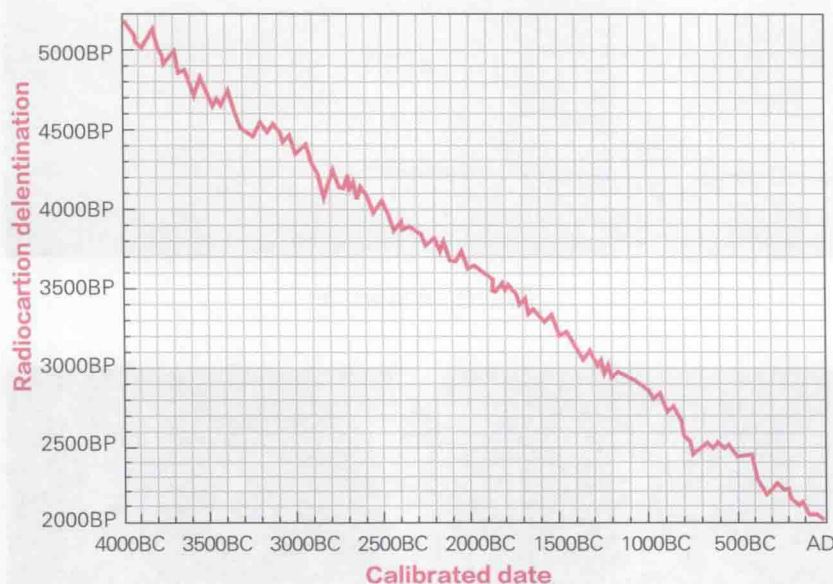


图 1-5 放大后的 ^{14}C 年龄树轮校正曲线

三、加速器质谱 ^{14}C 测年技术典型应用

1. 耶稣裹尸布之谜

在意大利西北部的城市都灵，从 16 世纪起就有一件镇市之宝保存在约翰大教堂附属的小礼拜堂里，世代承受着基督教信徒的顶礼膜拜，这件被誉为基督教的圣物，就是举世闻名的“都灵裹尸布”，又称作“耶稣裹尸布”（图 1-6）。

据《圣经·新约》记载：耶稣在十字架上被钉死后，门徒四散逃亡，尸体无人收殓（图 1-7）。幸好“有一个人名叫约瑟的义士，为人善良公正。这人去见彼拉多，求耶稣的身体获准就取下来用细麻布裹好，安放在石头凿成的坟墓里。”想不到第七天，耶稣神奇地“复活”了，墓穴洞开，不见了踪影。他的门徒彼得听

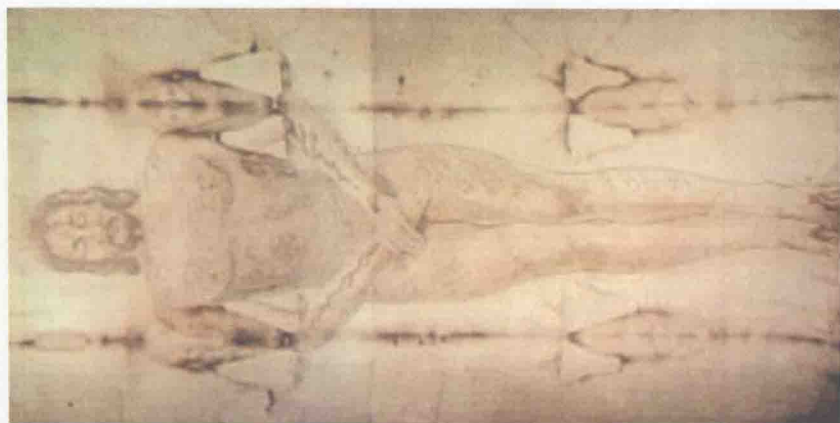


图 1-6 耶稣裹尸布

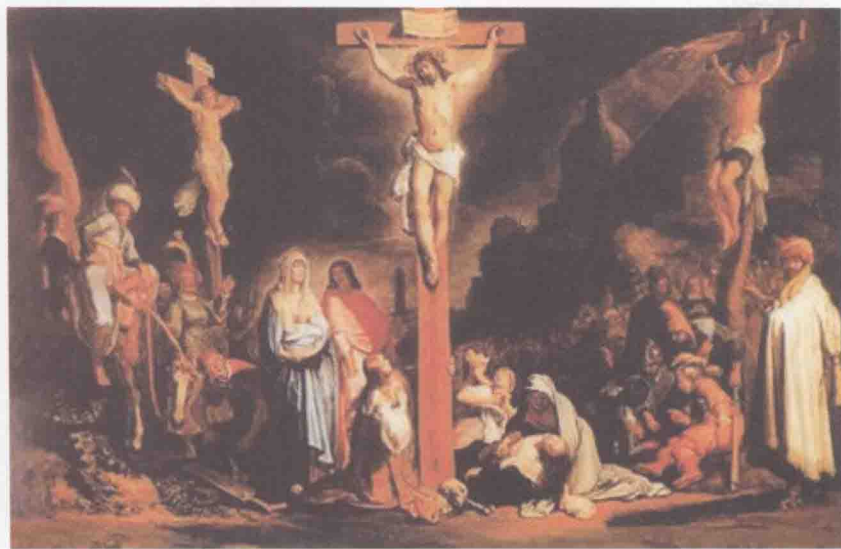


图 1-7 耶稣受难图

闻此事，连忙“跑到坟墓前，低头往里看，只见细麻布独在一处……”这便是西方复活节的由来。

对于这块细麻布的下落，《圣经》没有再作交代，直到 1353 年，裹尸布到了法国巴黎沙尔尼伯爵手中，并曾于 1357 年在其领地的利雷教堂公开展出。1432 年，裹尸布又到了萨夫瓦公爵的手中，不久公爵府中不慎起火，殃及裹尸

布，所幸此布只是稍微受损。之后，裹尸布被转移到意大利都灵大教堂公爵住的地方。1983年，这块布被郑重地保存在一个银盒中，供奉在都灵天主教堂的祭台上。

耶稣裹尸布长 4.35 米，宽 1.09 米，上面有一个遭鞭答和被钉在十字架上的人的血迹影像。影像身高 1.8 米，长发垂肩，双手交叉放置于腹部，在头部、手部、肋部与脚部有清晰的红色血渍状色块，正与《圣经》上所记载的耶稣被钉死时的状态相同。

这块裹尸布真的是耶稣基督受难的遗物吗？几百年来，历史学家、宗教学家、科学家围绕着它的真伪众说纷纭，争论不休。迫于各方面的压力以及人类好奇的天性，1986 年 9 月 29 日，在意大利都灵召开了一次由教皇科学院院长主持的专题技术讨论会，出席会议的有都灵大主教的代表、教皇科学院以及来自法国、瑞士、英国等有关科学家共 22 人。会议达成协议，同意剪取邮票大小的样品，由世界先进的、有超高灵敏度的加速器质谱计（AMS）进行测定（图 1-8）。

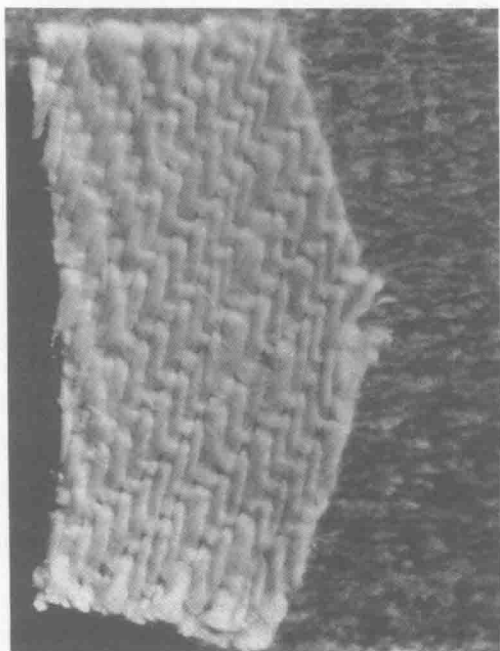


图 1-8 剪取的布条

1998 年 4 月 21 日，不列颠博物馆的考古权威和大主教一起来到都灵大教堂，把传说中耶稣当年受难时的

裹尸布剪下长 7cm、宽 1cm 的布条，分成三小块，在对方不知情的情况下，分别寄往美国亚利桑那大学、英国牛津大学和瑞士苏黎世联邦理工学院 AMS 测年实验室检测。实验表明，三家实验室达到了极佳的一致性，各个结果的差异在 120 年以内。裹尸布在 1260—1380 年之间制成的可能性为 95%，而有 100% 的肯定性表明决不会早于公元 1200 年。1998 年 10 月 13 日，都灵大主教、红衣主教巴莱斯斯特雷罗在召开的记者招待会上正式宣布，这件几个世纪以来被基督徒奉为圣品的耶稣基督裹尸布，并非耶稣受难时所用，而是中古时期织出的一件赝品。至

此，所谓的耶稣裹尸布真相大白。

牛津大学鉴定裹尸布的加速器质谱计的主体部件之后免费送给北京大学重新组装应用。这是我国第一套加速器质谱 ^{14}C 测年系统。该系统是由北京大学核物理学家刘克新、鲁向阳等人组装起来的（机身全长达120余米）。

不过，此事后来又出现了反复，据说有科学家使用“微化学法”重新对裹尸布进行了取样分析后，惊人地发现：在1998年的实验中，三家实验室的化验样品只不过是都灵裹尸布的一块补丁，而新的鉴定认为，主体部分要比这块补丁早得多。这块补丁是因为失火受损后补上去的，因当时补得非常仔细，加上年代久远，看上去与其他部分没有什么区别，然而，检测试验恰恰剪到了补丁部位。采用“微化学法”试验表明，裹尸布的主体部分要比补丁的年代早很多。

2. 夏、商、周断代工程

中华文明具有悠久的历史，然而真正有文献记载年代的“信史”却开始于西周共和元年（公元前841年，见于《史记·十二诸侯年表》），此前的历史年代都是模糊不清的。司马迁在《史记》里说过，他看过有关黄帝以来的许多文献，虽然其中也有年代记载，但这些年代都十分模糊而又不一致，所以他便弃而不用，在《史记·三代世表》中仅记录了夏商周各王的世系而无具体在位年代。因此共和元年以前的中国历史，事实上一直没有一个公认的年表。

第一个对共和元年以前中国历史的年代学作系统研究工作的学者是西汉晚期的刘歆。刘歆的推算和研究结果体现在他撰写的《世经》中，《世经》的主要内容后被收录于《汉书·律历志》。从刘歆以后一直到清代中叶，又有许多学者对共和元年以前中国历史的年代进行了推算和研究。这些工作都有一定的局限性，因为他们推算所用的文献基本上不超过司马迁所见到的文献，所以很难有所突破。晚清以后情况有些变化，学者开始根据青铜器的铭文做年代学研究，这就扩大了资料的来源。1899年甲骨文的发现又为年代学研究提供了新的材料来源。进入20世纪后，中国考古学的发展又为研究夏商周年代学积累了大量的材料。

1995年秋，国家科委（今科技部）主任宋健邀请在北京的部分学者召开了一个座谈会，会上宋健提出并与大家讨论建立夏商周断代工程这一设想。

1995年底国务院召开会议，成立了夏商周断代工程的领导小组，领导小组由国家科委、自然科学基金会、科学院、社科院、国家教委（今教育部）、国家文物

局、中国科协共七个单位的领导组成，会议聘请了历史学家李学勤、 ^{14}C 专家仇士华、考古学家李伯谦、天文学家席泽宗作为工程的首席科学家。

1996 年春，夏商周断代工程组织了一个由不同学科的 21 位专家形成的专家组，并拟定了夏商周断代工程可行性论证报告。可行性论证报告在 1996 年 5 月得到了通过。

1996 年 5 月 16 日国务院召开了会议正式宣布夏商周断代工程开始启动。这一科研项目，涉及历史学、考古学、天文学、科技测年等学科，共分 9 个课题，44 个专题，直接参与的专家学者达 200 人。

夏商周断代工程对传世的古代文献和出土的甲骨文、金文等材料进行了搜集、整理、鉴定和研究；对其中有关的天文现象和历法记录通过现代天文学给予计算从而推定其年代；同时对有典型意义的考古遗址和墓葬材料进行了整理和分期研究，并进行了必要的发掘，获取样品后进行 ^{14}C 测年。

2000 年 11 月 9 日，夏商周断代工程正式公布了《夏商周年表》。《夏商周年表》定夏朝约开始于公元前 2070 年，夏商分界大约在公元前 1600 年（有学者列出更具体年代前 1556 年，但仍有争议）；盘庚迁都约在公元前 1300 年，商周分界（武王伐纣之年）定为公元前 1046 年。依据武王伐纣之年和懿王的元年的确立，建立了商王武丁以来的年表和西周诸王年表。如果该工程结论顺利为学术界接纳的话，将为研究中国古代文明的起源和发展提出一个全新的历史新年表。

2001 年 11 月 9 日正式公布了夏商周年表，把我国的历史记年由公元前 841 年向前延伸了 1200 年（图 1-9）。

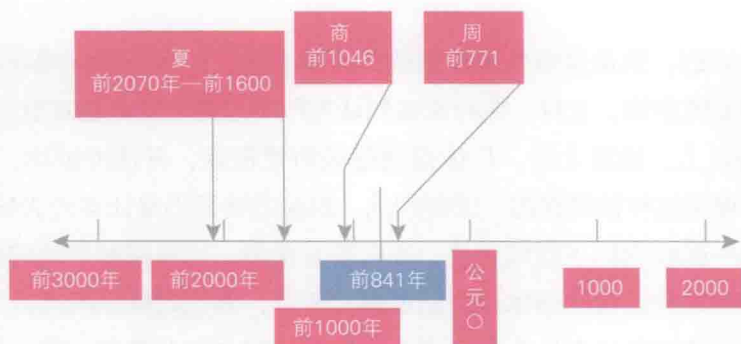


图 1-9 夏商周年表

然而，在2003年8月底召开的讨论《繁本》的专家会议上，不少与会学者采取了慎重的态度，他们要求对每个学术上有争论的问题都应列出各种不同之意见，由于学者们的这一主张，已大致写好的《繁本》未能获得通过。不过以考古学的研究态度来说，学者们这样的态度是合理而负责的要求，符合学术规范。今后会有更多的文物出现，支持或否定夏商周断代工程的结论。

3. 神秘冰人

阿尔卑斯山3000米雪域冰谷，白雪皑皑，人迹罕至。冰人奥茨（因其发现地位于奥茨）便长眠于此，直到1991年9月，一对德国徒步探险的夫妇发现了他的遗体，从此宁静不再（图1-10）。



图1-10 神秘冰人（左）及其复原图（右）

发现冰人时，他全身被包裹在透明的冰凌之中，俯卧，脸深埋在冰中，身边隐约散落着他的衣物、工具。探险家夫妇认为他不过是个普通遇难登山者的遗体。通常在雪线以上，遇难之后，尸体很快便被新雪覆盖，并速冻成冰，少有腐烂。很多的干尸便是这样被发现的。即便如此，眼前的情景仍是让这对夫妇感到惊惧。他们用最后一张胶卷拍下现场全景，遂向警方报案。当局深知当地的冰川已渐融化，一些失踪的登山者的遗体也开始显露。所以，他们同样揣测冰人不过死于登山事故。这也就解释了为什么救援者在挖掘尸体时会如此疏忽大意。他们并没有尽可能地保护尸体免受损害，而只是设法把他从冰凌中“救”出来。他们顺手拿

过旁边的一根棍子（实为他的弓）用来撬冰。有人抓住他露在外面的衣服一角猛拽，衣服被一撕而碎。一位性急的救援人员甚至动用了手提钻，在冰人的右臀上留下一个永久的洞。一番忙碌之后，冰人终于自冰枢而出，却又被裹在黑色油布里塞进一副棺材里时折断了左臂。当摄影师被获准拍照的时候，冰人躺在附近的一家殡仪馆里，全身的皮肤已经开始发霉。

两日之后，他被运往法医部；次日又转往解剖部，在那里取了骨骼和臀部肌肉 20~30mg，用加速器质谱计测量 ^{14}C 的含量，结果令人震惊：他不是一名现代登山者，而是来自远古时代的先人，冰人生活年代在公元前 3350—前 3300 年的概率为 56%，在公元前 3210—前 3160 年的概率为 36%，在公元前 3140—前 3120 年的概率为 8%。那时埃及的金字塔还未建成，欧洲仍处于原始农业社会。迄今为止，他是世界上年代最久远的一具干尸，保存情况之良好，甚至留存着细胞组织的分子结构。

4. 陶器溯源

中国是世界著名的文明古国之一。华夏民族在世界科学史上和文化史上，都曾写下过光辉灿烂的篇章，其中陶瓷的制作工艺及其发展，更是绚丽多彩，鲜艳夺目的一页。

在旧石器时代，中国古人们只能对木、石、骨等天然材料进行加工，将其制作成器具。当古人们经过长期的观察和实践后，把黏土用水湿润，塑制成型，再经高温焙烧，使之成为胎体坚固的器具，这样便产生了陶器。陶器的出现，标志着新石器时代的开端。陶器的发明，也大大改善了人类的生活条件，在人类发展史上开辟了新纪元（图 1-11）。

陶器究竟是怎样发明的，目前还缺乏可靠的材料予以详尽地说明。但可以明确的一点是，陶器的产生

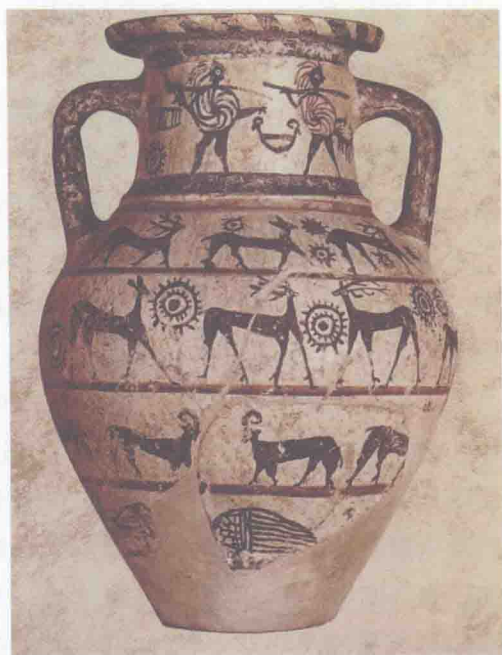


图 1-11 早期的陶器

是和农业经济的发展联系在一起的，一般是先有了农业，然后才出现了陶器。在人类进入新石器时代，由于农业和牧畜业的出现，开始了定居、半定居的生活。特别是农业的发生和发展，为人类提供了比较可靠而稳定的可供食用的谷物。谷物都是颗粒状的淀粉物质，不像野兽的肉体便于在火上烧烤食用。同时，剩余的食物需要储藏起来。正因为如此，随着农业经济的发展和定居生活的需要，人们对于烹调、盛放和储存食物及汲水器皿的需要越来越迫切。从而促使人们在生活实践中，创造出与人类生活息息相关的陶器。陶器的产生和发展，是中国劳动人民几千年来在生产斗争中辛勤劳动的结果。从民族学和考古学上都可以得到充分的物证。

中国最早的陶器出现于何时呢？中国古代有着“黄帝以宁封为陶正”（黄帝命宁封为制陶的官）、“舜陶于水滨”（舜在水滨制陶）等传说。然而，从近几十年考古发掘的情况来看，目前发现的最早陶器实物，要比传说中的“黄帝”时代早上三四千年。距今八九千年以前新石器时代开始出现，几千年来一直是人类的主要生活用具。这时的陶器由于烧造工艺的不同，还出现了红陶、灰陶和黑陶等不同品种的陶器。与此同时，人们为防止陶器经火烧或水浸泡断裂，而在泥土中加入砂子，烧制成泥质夹砂灰陶和夹砂红陶。此类陶器多用于烹调器、汲水器和大型容器。故又有泥质陶和夹砂陶之分。

陶器的出现，给人类的生活带来很大的变化，具有重要的意义，陶制的纺轮、弹子及陶刀之类的工具，也陆续在生产中发挥作用。因此陶器迅速成为生活必需品，受到了应有的重视，于是制陶业很快发展成为新石器时代一项重要的手工业。

考古发掘充分表明，在我国新石器时代一开始，许多地区就开始了陶器的制作，这从原始母系氏族社会、原始父系氏族社会和奴隶社会的出土古文化遗址中得到明证。

仰韶文化距今五六千年，彩陶是仰韶文化的主要特征，根据 ^{14}C 测定，年代距今约7000~5000年（图1-12）。这时期的陶器以红陶为主，灰陶、黑陶次之，红陶分细泥红陶和夹砂红陶两种，主要原料是黏土，有些器皿根据其用途不同而掺杂少量砂粒。陶器皿种类主要有盆、罐、钵和小口尖底瓶等，质地有泥质陶和夹砂陶。如炊饪器，原料中往往有意识地掺杂少量的砂粒，以便改变陶土的成型性能和成品的耐热急变性能，砂粒的这些作用，相当于现代陶瓷工业中使用的“熟料”，这说明当时对原料性能已有相当认识。