

数学分析方法在考古学中的应用

陈建立

(北京科技大学冶金与材料史研究所, 北京 100083)

Abstract: Based on the provenance study, this paper discussed several mathematics tools used in archaeology studies, and point out that it has been become one of the useful tools in archaeology studies. The paper points out that the provenance study of the metal artifacts of ancient China should be develop deeply. It is one of important steps in modern archaeology study that archaeologists can apply mathematics practiced.

Key works: mathematics method; archaeology; multivariate analysis; provenance study

摘要: 本文主要以文物产地研究为例, 介绍国内外学者在考古学研究中常用的几种数学方法的原理及应用情况, 指出数学分析方法已经成为考古学研究的热点, 中国金属文物产地研究需进一步开展和深化, 考古学家熟练运用现代数学知识是考古学现代化的重要步骤之一。

关键词: 数学方法; 考古学; 多元统计分析; 产地研究

中图分类号: K854.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-1731(2000)01-0048-05

考古学与自然科学的互相联系, 是考古学快速发展的强大推动力, 应用数学方法将考古资料进行定量分析, 是当今考古学发展的趋势之一。利用数理统计方法对发掘出土器物(特别是陶瓷、自然铜等制品)的产地、墓葬、遗址、古人类学、动物群的分期和分类, 已做了大量的工作。其中, 利用元素组成分析样品产地的研究方兴未艾。

—

考古学较多地应用到有关数学统计方法。在分析时, 一般要首先根据研究目标提出研究的问题, 然后选择相关的样品, 确定用何种分析方法

来获得信息, 最后进行数据分析处理和解释, 这无疑是最重要的。在实际问题中, 多变量问题是经常用到的。如在陶器及青铜器的研究中, 我们需要对它的形制、纹饰、年代、出土地点和元素组成等方面进行分析, 以得出正确的结论。这些形制、纹饰等因素就是我们所说的变量。在多数情况下, 不同变量之间是有一定相关性的。由于变量较多, 变量又有一定相关性, 势必增加了分析问题的复杂性。多元统计分析方法为解决这类难题提供了重要的工具。现在, 计算机应用中适合考古学统计研究的软件比较多, 使用比较方便的有 SPSS、SAS、BMDT 等。下面主要介绍与考

收稿日期: 1999-10-6

基金项目: 高等学校博士学科点专项科研基金资助 (No.9600811)。

作者简介: 陈建立 (1973.3), 男, 河南省虞城县人, 北京科技大学冶金与材料史研究所博士研究生, 师从韩汝玢教授从事冶金与材料史研究。

古学关系比较密切的有关多元统计分析的研究方法。

人类认识世界的一种重要方法是将认识对象进行分类。比如有关世界的时间进程的研究,就形成了历史学和考古学,有关空间地域的研究形成地理学。事实上,分门别类地对事物进行研究,要远比在一个复杂多变的集合体中更清晰、明了和细致,这是因为同一类事物具有更多的近似特性。通常人们可以根据经验和专业知识分类。而聚类分析作为一种定量方法,从数据分析的角度,给出一个更准确、细致的分类工具。特别是引进显著性检验以后,已成为一种比较严格的数学方法。聚类分析的主要思想是,用数量化的方法描述事物之间的相似程度,然后按相似程度大小作出谱系图。

在考古学的研究中,各国学者利用聚类分析在古陶瓷、古钱币及古人类遗存物等方面都进行了大量的研究,现仅举几例分别介绍如下。

古陶瓷的研究。在陶瓷的生产活动中,陶瓷的元素组成不仅与自然条件有关,如原料、气候、浸蚀、传输等,还与社会文化有关,如材料的生产和准备的社会化及个人操作的差别等。利用陶瓷的元素组成进行产地、制作工艺的研究是非常有意义的。R.J.Taylor等人利用中子活化分析(NAA)对4个非洲红釉陶(African Red Slip Ware,简称ARS)生产地出土的陶器进行了成份分析。研究目的是看能否得出一个科学的分类方法,即利用NAA分析来定义一个与某特定生产中心有关的元素组成(化学指纹元素),来判别ARS的产地^①。由于不能预见某一地区生产的陶器中是否出现某种元素,所以尽可能多地测量多种元素含量。但是测量值的准确度和精确度都是很重要的,因为误差较大的数值将会影响那些比较准确的数值,过大的误差将导致判定来源的失误。消除误差较大的数据方法是,将同一样品测量多次,然后看每一测量值的变化情况,舍弃那些变化较大的元素,最后从35个元素中选出24个元素进行统计分析。该项研究的特点是通过多种统计分析方法的综合运用,得出正规化的分析数据,以使每个元素不论含量高低都有相同的作用。然后采用聚类分析对数据进行统计处理。在制作陶瓷过程中,有时可能在原料中混和一些其他材料,这样产生了一个问题,即“稀释效应”,在进行聚类分析时,可能将同一地点的产品分为两类。为此开发了一个软件来解决这一

问题。为了检验分类的可信度,又利用另一统计方法来检验。研究结果表明,利用聚类分析可以很好地依照取样地点分为4类,并且建立了一个标准来判定产地。

钱币的研究。聚类分析特别适合于钱币的分析,因为所有的钱币的制造年代是已知的,所以元素组成与生产年代之间的关系可以确定,如果制作地点也能确定的话,适用性将更强。希腊的几位学者利用PIXE对来自Nikopolis(Epinus)和Thessaloniki(Macedonia)两处的古希腊铜币进行了成份分析,并对铸币地点、时间与成份之间的关系进行了研究^②。其选择分析元素的标准是,选择了锡、铅、锌、铁、镍、砷、银、铋等8种微量及痕量元素,低原子序数的硫、氯等杂质元素及铜等主要元素被排除。首先将数据对数化以后再进行聚类分析,这样处理是考虑使不同含量的元素对统计均有较大的贡献。通过分析表明,钱币以时间分为两组,但两地之间没有太大的差别,其中锡含量波动较大的发生时间在两地间有所不同,两地在193-217年间有第四种主要元素,即Thessaloniki中有锌,Nikopolis中有铋和锌,可能是锡的替代品。

史前人类粪便化石的研究。从古粪便的数据中可以提出很多问题,它不仅可以从重构成古人类的食谱,而且可以分析营养、健康、技术以及行为方式等方面的问题。对其组分进行统计分析可以发掘其内涵,比如烹调方法、生活方式等。Mark Q.Sutton利用聚类分析研究了美国加利福尼亚州的Coachella Valley北部几处出土的史前人类古粪便化石^③。分析样品来自5个地点共137个。样品中只有20个支持冬季食谱,表明在冬季只有少数的地点存在人类活动,而大部分人已经迁移它方。

此外,利用聚类分析的例子还有L.A.G-linsman等人对意大利文艺复兴时期人像纪念章的研究^④,结果表明16世纪的像章中的杂质远远低于15世纪的,表明在没有运用现代冶金术的情况下,文艺复兴时期的人们已经掌握了大量金属学的有关知识,并制作出许多种合金制品。而P.Meyers等人利用聚类分析对石器制品的NAA分析结果进行的研究则表明:可以利用石器的元素组成来确定其产地^⑤。陆巍在对北辛文化和山东龙山文化陶片化学分析的基础上进行聚类分析,发现了陶器工艺水平的发展规律^⑥。赵维娟等人则利用NAA分析了40件南宋官窑瓷器

的36种元素含量,对数据进行模糊聚类分析,并从36种元素中挑选出9种指纹元素,进行了散布分析,从而得到了一些有关南宋官窑瓷器原料来源的有价值的信息^⑦。苗建民等也进行了古陶瓷痕量元素的聚类分析研究^⑧。另外,中国科学院上海硅酸盐研究所已经开展了大量系统的古陶瓷研究,取得了丰硕成果,在他们的研究中涉及了这方面的内容。利用NAA及多元统计方法寻找陶瓷的产地在英国曼彻斯特大学已有了几篇博士论文,中国科技大学徐安武也完成了陶瓷产地研究的博士论文。目前,有关陶瓷产地的研究论文发表很多,已经成为科技考古的热点。

主成份分析就是设法将原来变量重新组合成一组新的互相独立的几个综合变量(主成份)来代替原来变量,同时根据实际需要从中可以确定几个较少的综合变量(主成份)尽可能多地反映原来变量的信息。也就是说,要在力保数据信息丢失最少的原则下,对高维变量空间进行降维处理。除了降低变量数据系统的维度外,主成份分析同时还简化了变量系统的统计数字特征。主成份分析还可以提供许多重要的系统信息,例如数据群点的重心位置(或称平均水平)、数据变异的最大方向、群点的分布范围等。主成份分析过程实质上是对原坐标系进行平移和旋转变换,使得新坐标的原点与数据群点的重心重合,新坐标系的第一轴与数据变异最大方向对应,新坐标系的第二轴与第一轴标准正交并与数据变异次最大方向对应。第一主份量占样本方差的最大值,第二主份量占方差的次最大量,且与第一主份量无关,其后的主份量逐渐解释样本方差的较小部分,并且所有份量彼此不相关。

国内外研究人员利用主成份分析对考古资料进行统计处理已经做了大量的工作,主要表现在对陶瓷产地的研究上。国外对这方面的研究较多,不再一一介绍。国内学者陈铁梅、何弩对河南省二里头二期至人民公园期陶豆分类的研究,结果总体上与原报告对陶豆的分期一致,并显示出每期段内形态的相似性和三期之间的相异性^⑨。陈铁梅等对商代原始瓷产地的研究,则是首次对我国的原始瓷作微量和痕量元素组成分析,通过主成份分析和判别分析研究的结果表明,商代各遗址出土的原始瓷很可能是由南方某地区生产的,并提出吴城及其附近地区可能是当时原始瓷的生产中心^⑩。

利用主成份分析进行铜制品产地研究国外学

者也做了一定的工作。如法国学者Therry Berthoud及其合作者对美索不达米亚(Mesopotamia)出土的公元前4-前3千纪时期的铜器进行了分析,通过对31种元素的主成份分析,得出了较好的结果^⑪。Pieter Meyers在大量分析安阳殷墟出土青铜器的元素组成之后,利用统计方法包括主成份分析找出了一定的规律性^⑫。Charles Higham^⑬、H.T.Kang^⑭、Einar Matison^⑮等人利用主成份分析分别研究了东南亚地区的青铜器、朝鲜铜币的元素组成及青铜器锈蚀与环境因素的关系等问题,也取得了初步成果。

其他一些多元统计方法在考古学中亦有广泛的应用。

判别分析。特点是根据已掌握每个类别的若干样本的数据信息,总结出客观事物分类的规律性,建立判别公式和判别准则。然后,当遇到新的样本点时,只要根据总结出来的判别公式和判别准则,就能判别该样本点所属的类别。最近,郎惠云等利用判别分析研究了唐三彩的传播与流通问题,指出这种方法对于产地、传播和流通等问题的研究是可行的^⑯。

贝叶斯统计。其主要特点是利用以往对研究对象的认识——先验概率来辅助判断,以得到更精确的分析结论。在年代学的研究中为了提高¹⁴C测年年代判断的可靠性,需要对测量数据进行校正,包括高精度树轮年代——¹⁴C年代校正,最小二乘方数理统计方法校正,和还有近十年来发展起来的贝叶斯数理统计法进行匹配拟合。¹⁴C数据具有统计性质,而样品的¹⁴C年代与真实年代之间已经确定了精确的校正关系(高精度树轮校正曲线),相当于贝叶斯方法所需的条件概率分布(似然函数)。从考古学或其他方面研究提供的有关样品出土信息,可以通过量化处理作为先验分布的依据。有了这些贝叶斯统计方法应用的基本条件,通过贝叶斯数理统计方法计算出后验概率分布,从而对相应的真实年代作出推断,就可以进一步提高¹⁴C测年方法所获得的精度^⑰。除了在¹⁴C年代测定中的应用以外,贝叶斯统计也广泛应用于其他科技考古领域。

多元回归方法是从数量的角度出发,反映要解决的问题和其他有关因素,通过两个或两个以上变量之间的数量方程式来进行判断的一种方法。米同乐等人根据铜戈的援、内和胡的长度,利用多元回归断代法研究了124件铜戈的年代问题,结果基本与考古发掘和类型学结果相同^⑱。

当然, 还有其他一些数学方法, 如神经网络方法等, 限于篇幅不再一一讨论。总之, 多元统计分析在器物的类型、墓葬分期、器物产地、古生物种属等方面都有了较为成熟的应用, 并取得了比较正确的结论。

二

上面介绍了一些数学统计方法在考古学中的应用, 现就利用统计方法进行文物特别是金属文物产地研究的现状作一简单讨论。

产地研究包括文物的制作原材料来源、制作地点及发现地点等方面, 我们一般考虑前两种情况。通过产地研究可以探索技术的发展、经济状况和贸易路线等各方面的问题。

元素组成分析可以用于古代名瓷的真伪鉴别和陶瓷产地的判别, 微量元素也可以作为金属制品矿源的指示剂。地球化学理论指出, 矿物总是带着其出处的特征信息, 如微量元素和痕量元素, 同位素比值及微观结构等。通过这些特征信息的甄别与鉴定, 可以探索它们的来龙去脉。通过铜制品的金相鉴定、成份分析, 特别是微量元素的分析可以确定样品的材质、矿源及判定冶炼流程及产地。

如有的学者把银、砷、铁、铋、铅、锑等 6 个微量元素与矿石类型联系在一起, 提出了一个统计性较强的方法。具体方法是, 每一微量元素含量可以划分为 9 个区, 然后将铜制品中的 6 个微量元素分别对应每种矿石的可能性的积经归一化处理, 作为该铜制品属于此种矿石冶炼产物的总的积累可能性, 最后确定出可能性最大的矿石种类。利用此种方法对 40 件样品的统计处理结果与历史事实也基本相符^⑨。

Jr. Rapp 等人在一系列的文章中研究了大量有关自然铜产地问题。他们根据微量元素谱利用两种统计方法, 即采用结果函数 (Product function) 和最大三重判别方法 (Maximal trinary discriminant), 确定出了美国自然铜的产地^⑩。结果证明进一步地广泛应用这种方法是有意义的。但是必须强调, 基于微量元素的考古学描述依赖于数据的准确度, 所以, 在分析时, 应该尽可能多地选择样品, 特别是所有潜在的矿源都要在数据中有所反映。

J. L. Mauk 及 R. G. V. Hancock 等人指出根据金、砷、锑、银和钴的含量可以区别美国自然铜与欧洲来源的冶炼铜, 因为在自然铜中不能检测

出镍、钨、钨和钴等元素, 而在欧洲铜中可以出现这些元素^⑪。他们处理数据的方法是分别作出金-银、金-砷……等元素含量散点图, 然后加以比较。但是这种方法也有一定的缺点, 因为它不能反映铜器中各种元素的复杂关系。利用这种方法, 对盘龙城等地出土青铜器的元素含量分别作图, 从图中可以看出一定的规律性^⑫。

到目前为止, 对于铁制品矿源的研究几乎是空白。除了分析碳、磷、硫和锰等主要元素以外, 微量元素的分析还没有报道。J. Paskowski 主要考虑磷、锰、镍和硅等 4 个元素来进行矿源产地研究, 并得出了初步结论。他强调不是一个因素是有效的, 而要考虑与之相关的所有证据。有时利用夹杂物成份判定产地要比金属本身好, 有人已作了这方面的研究。瑞典学者测量了砷、镍、钴、铜、钼 (Mo) 和锰等元素后, 按照镍和钴的含量分为 4 组, 然后检查样品落入哪一组, 这样也判定了部分铁器的产地^⑬。这种分类方法有一定优点, 但不能回答所有问题, 必须加强矿石的分析, 所以要选择特定时期、特定地点、特定种类的矿石进行分析。

还有利用铜、硫、铅的同位素比值方法来研究产地及矿石类型的, 应用比较多的是铅同位素比值法, 但其结论还需要进一步检验。总之, 利用数学统计方法来研究矿产来源的工作也有了一定的进展。然而, 由于金属材料的冶炼及制作过程的复杂性, 进行微量元素和痕量元素来判定金属文物的矿料来源工作要比判定陶瓷及石器来源复杂得多。但是, 利用多元统计方法可以获得铜器及矿源之间的特定的关系。因为它不必考虑在冶炼或铸造过程中某种元素的特性、流向等问题, 也不需要假设, 所要做的就是将合理的数据进行统计处理。

三

从上面的讨论中可以看出, 数学方法特别是统计方法在考古学中的应用领域越来越大, 所取得的成果也越来越多。但是, 如何将考古资料数据化以建立数学模型, 或者进行统计分析, 还存在许多问题亟待解决, 现结合我们的工作谈几点想法。

文物中包含着丰富的古代信息, 如何将这些信息尽可能多地发掘出来, 更好地研究古代社会, 是考古学者义不容辞的责任。应该开拓研究的新领域, 包括各种实验方法、实验检测结果的处理方法等, 争取从考古样品的分析中提取出更

多的信息。

产地研究在考古学中有重要意义。陶瓷产地研究已经有了系统的方法,取得了大量成果。而金属文物产地研究在国内外虽做了一些工作,但大部分集中于利用铅同位素比值测定的方法,或利用微量元素来研究自然铜产地,其结论都需实践的检验。利用微量元素和痕量元素进行冶炼铜的产地研究还很不成熟,我们必须加强这方面的工作。在产地研究中,需要分析大量的样品、潜在的矿源、冶炼和铸造遗址、遗物,更应该与制作工艺、艺术风格、考古类型学等各方面因素综合研究,而这恰恰是研究的弱点。能否将制作工艺、艺术风格和考古类型学进行定量化的描述,然后结合化学成份进行综合分析,值得进一步探讨。

在现代考古学中,必定要用到越来越多的数学方法。考古学者应该知道、熟悉一些常用的数学工具,并在研究中自觉地加以应用。判别及回归分析为有经验的研究者提供了量化研究工具,如果能将一些个人经验转化为数学模型,比如对类型学的研究,然后依据数学规律进行计算、比较等各项研究,对考古学的发展将起到一定的推动作用。

(感谢韩汝珍教授对本文写作的指导和帮助)

- ① R. J. Taylor, V. J. Robinson. Neutron Activation Analysis of Roman African Red Slip Ware Kilns. *Archaeometry* 38 (2), 1996, pp.231 - 243
- ② A. Araventinos et al. Study of Ancient Greek Copper Coins from Nikopolis (Epirus) and Thessaloniki (Macedonia). *Archaeometry* 35 (2), 1993, pp.265 - 278
- ③ Mark Q. Sutton. Cluster Analysis of Paleofecal Data Sets: A Test of Late Prehistory Settlement and Subsistence Patterns in the Northern Coachella Valley, California. *American Antiquity*, 1998, pp.86 - 107
- ④ L. A. Glinsman, L. C. Hayek. A Multivariate Analysis of Renaissance Portrait Medals: An Expanded Nomenclature for Defining Alloy Composition. *Archaeometry*, 35 (1), 1993, pp.49 - 67
- ⑤ P. Meyers, L. Van Zelst. Neutron Analysis of Limestone Lbjects: A Pilot Study. *Radiochimica Acta* 24, 1977, pp.197 - 204
- ⑥ 陆巍:《北辛文化和龙山文化陶器成分的聚类分析》,《考古》1997年第11期。
- ⑦ 赵维娟等:《南宋官窑瓷器原料来源的中子活化分析》,《考古》1998年第7期。
- ⑧ 苗建民等:《古陶瓷中痕量元素的模糊聚类分析》,《科学通报》1993年第4期。
- ⑨ 陈铁梅、何弩:《计算机技术对河南省二里头二期至人民公园期陶豆分类的尝试》,《考古学文化论集》(2),文物出版社,1989年。
- ⑩ 陈铁梅、Rapp G. Jr. 等:《中子活化分析对商时期原始瓷产地的研究》,《考古》1997年第7期。
- ⑪ Pieter Meyers. The Use of Scientific Teachnique in Provenance Studies of Ancient bronzes, *Bronze*, pp.237 - 252
- ⑫ Pieter Meyers. Characteristics of Casting Revealed by the Study of Ancient Chinese Bronze, *The Second International Conference on the Beginning of the Use on Metals and Alloys (BUMA - II)*, October 21 - 26, 1986, Zhengzhon, China
- ⑬ Charles Highnam. Prehistoric Metallurgy in Southeast Asia: Some New Information from the Excavation of Ban Na Di, *The Second International Conference on the Beginning of the Use on Metals and Alloys (BUMA - II)*, October 21 - 26, 1986, Zhengzhou, China
- ⑭ H. T. Kang, et al. Compositional Classification of Coins by Pattern Recognition Method, *The Fouth International Conference on the Beginning of the Use on Metals and Alloys (BUMA - IV)*, May 25 - 27, 1998, Matsue, Shimane, Japan
- ⑮ Einar Matison, et al. Deterioration of Archaeological Bronze in Soil, *The Fouth International Conference on the Beginning of the Use on Metals and Alloys (BUMA - IV)*, May 25 - 27, 1998, Matsue, Shimane, Japan
- ⑯ 郎惠云等:《从成份分析探讨唐三彩的传播与流通》,《考古》1998年第7期。
- ⑰ 蔡莲珍、仇士华:《贝叶斯统计用于碳十四系列样品年代的树轮校正》,《考古》1999年第3期。
- ⑱ 米同乐、戴乐田:《有胡铜戈的回归断代》,河北省文物研究所编:《河北省考古文集》,东方出版社,1998年。
- ⑲ A. M. Friedman et al. *Science*, 152, 1966, pp.1504
- ⑳ Rapp G. Jr. et al. Trace-Element Fingerprinting as a Guide to the Geographic Sources of Native Copper, *Journal of Metals*, 32 (1), 1980, pp.35 - 45
- ㉑ J. L. Mauk, R. G. V. Hancock. Trace Element Geochemistry of Native Copper from the White Pine Mine. Michigan (USA): Implications for Sourcing Artefacts, *Archaeometry*, 40 (1), 1998, pp.97 - 107
- ㉒ 北京科技大学冶金与材料史研究所,待发表。
- ㉓ R. F. Tylecote. The Composition of Metal Artifacts: a Guide to Provenance? *Antiquity*, 44, 1970, pp.19 - 25

(责任编辑:张得水)