

## 古今名钧瓷鉴别的 INAA 和 BP 神经网络研究

李国霞<sup>1</sup>, 梁先华<sup>1</sup>, 李融武<sup>2</sup>, 赵青云<sup>3</sup>, 孙新民<sup>3</sup>, 赵文军<sup>3</sup>, 赵维娟<sup>1</sup>, 孙洪巍<sup>1</sup>,  
郭敏<sup>1</sup>, 谢建忠<sup>1</sup>, 高正耀<sup>1</sup>, 冯松林<sup>4</sup>, 崔鹏飞<sup>1</sup>, 杨大伟<sup>1</sup>

(1. 郑州大学 物理工程学院, 河南 郑州 450052; 2. 北京师范大学 物理系, 北京 100875;  
3. 河南省文物考古研究所, 河南 郑州 450000; 4. 中国科学院 高能物理研究所, 北京 100049)

**摘要:** 为正确鉴别古今名钧瓷, 从古钧台窑和现代孔家钧窑、苗家钧窑、星航钧窑选取钧瓷残片样品 40 个, 用仪器中子活化分析(INAA)测得每个样品胎、釉中 25 种元素的含量, 应用 BP 神经网络对这些样品的 INAA 数据进行了训练和预测。预测结果表明, 训练好的网络能较好鉴别未知古钧官瓷和现代高档钧瓷的胎、釉样本。

**关键词:** 古今名钧瓷; 仪器中子活化分析; 微量元素; BP 神经网络; 鉴别

**中图分类号:** O571.55; TQ174.33 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-6931(2010)03-0372-04

### Distinguish of Famous Jun Porcelain in Ancient and Present Age by INAA and BP Neural Network

LI Guo-xia<sup>1</sup>, LIANG Xian-hua<sup>1</sup>, LI Rong-wu<sup>2</sup>, ZHAO Qing-yun<sup>3</sup>, SUN Xin-min<sup>3</sup>,  
ZHAO Wen-jun<sup>3</sup>, ZHAO Wei-juan<sup>1</sup>, SUN Hong-wei<sup>1</sup>, GUO Min<sup>1</sup>, XIE Jian-zhong<sup>1</sup>,  
GAO Zheng-yao<sup>1</sup>, FENG Song-lin<sup>4</sup>, CUI Peng-fei<sup>1</sup>, YANG Da-wei<sup>1</sup>

(1. *Physical Engineering College, Zhengzhou University, Zhengzhou 450052, China;*  
2. *Department of Physics, Beijing Normal University, Beijing 100875, China;*  
3. *Institute of Cultural Relic and Archaeology of Henan Province, Zhengzhou 450000, China;*  
4. *Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

**Abstract:** Forty samples of Jun porcelain from an ancient Juntai kiln and 3 modern Jun kilns (Kongjia, Miaojia and Xinghang) were selected and analyzed for 25 elements by INAA. The data were trained and forecasted by BP neural network. The results indicate that the network can distinguish unknown body and glaze samples of the official Jun porcelain and the modern top-grade Jun porcelain after proper training.

**Key words:** famous Jun porcelain in ancient and present age; INAA; microelement; BP neural network; distinguish

收稿日期: 2009-02-09; 修回日期: 2009-03-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50772101, 50432010); 河南省自然科学基金资助项目(0611011500); 中国科学院核分析  
技术重点实验室基金资助项目(B0901); 郑州大学历史文化遗址保护研究中心资助项目

作者简介: 李国霞(1952—), 女, 河南驻马店人, 教授, 核技术应用专业

钧瓷是我国古代著名瓷器。钧窑遗址以河南省禹州市神垕镇为中心,共发现窑址 150 多处。其中,禹州市城里钧台附近发现的钧台窑,产品质量为诸窑之冠,被考古学界确认为钧官窑。其造型端庄浑厚、古朴典雅,民间一直流传有“纵有家产万贯,不如钧瓷一件”,可见它的弥足珍贵。一些传世钧瓷被英、美、日等著名博物馆珍藏<sup>[1]</sup>。

现代孔家钧窑、苗家钧窑、星航钧窑是中国钧瓷的重点生产企业,其产品在汲取传统技艺精华的同时,率先将人物、动物造型、陶艺引入到钧瓷作品中,并结合现代艺术,运用浮雕、镂空等技法,丰富了钧瓷的表现形式,为钧瓷行业的振兴和产业化发展做出了贡献,产品远销国内外。作品《伟人尊》、《国泰鼎》、《丰尊》、《小口瓶》、《出荷口碗》等被中国国家博物馆、历史博物馆永久收藏,另有一些产品被作为国礼馈赠国内外嘉宾。

古钧官瓷具有极高的历史价值、艺术价值、经济价值和社会价值,深受人们喜爱,是历代瓷窑仿制的对象;现代高档钧瓷也具有较高的艺术价值、经济价值和收藏价值,典型产品和工艺是一些瓷窑模仿的对象(即现代仿现代)。国内外有关学者曾在钧瓷的原料来源、微结构和呈色机理方面做了很多有益的工作<sup>[2-3]</sup>。但有关古钧官瓷和不同窑口现代高档钧瓷原料产地、分类关系和鉴别的研究尚有待深入开展。研究原料产地、分类关系和鉴别的有效方法是微量、痕量元素分析。微量、痕量元素是人工不能控制的,且基本不受工艺过程影响,它主要反映原料产地的特征。本工作从钧台窑和现代孔家钧窑、苗家钧窑、星航钧窑选取天蓝、天青、月白釉色钧瓷残片样品 40 个,用 INAA<sup>[4]</sup>测试这些样品胎和釉中常量、微量和痕量元素含量,并应用 BP 神经网络对这批古钧官瓷和现代高档钧瓷样品的 INAA 数据进行训练和预测<sup>[5]</sup>。

## 1 样品选取和 INAA 实验

从钧台窑考古编号为 H2T7 的碎片坑出土样品中选取古钧官瓷残片样品 24 个,从孔家钧窑、苗家钧窑、星航钧窑选取现代高档钧瓷残片样品 16 个,瓷片釉色有天青、月白、天蓝 3 种,所选择的样品代码、名称、窑口列于表 1。

表 1 样品情况

Table 1 Samples circumstances

代码	名称	窑口
J176,J179-J182,J185-J187,J190, J191,J217,J220,J223,J225,J228, J229,J247,J233,J234,J235,J243, J245,J246,J248	古钧官瓷	钧台窑
J858,J863,J865,J873	现代钧瓷	孔家钧窑
J828,J829,J841,J900-J902	现代钧瓷	苗家钧窑
J854,J855,J857,J897-J899	现代钧瓷	星航钧窑

其中,古钧官瓷样品由河南省文物考古研究所提供,现代高档钧瓷样品由孔家钧窑、苗家钧窑、星航钧窑提供,这些样品均具有一定的代表性。

用 INAA 测得每个钧官瓷和现代高档钧瓷胎、釉样品的 25 种元素含量,其中:稀土元素 8 种,包括 La、Ce、Nd、Sm、Eu、Tb、Yb、Lu;其它元素 17 种,包括 Na、K、Sc、Cr、Fe、Co、As、Rb、Sr、Zr、Cs、Ba、Hf、Ta、W、Th、U,含量单位为  $\mu\text{g/g}$ 。INAA 数据的相对不确定度为  $\pm 10\%$ 。

## 2 人工神经网络

人工神经网络是由大量简单的基本单元——神经元相互连接,通过模拟人的大脑神经处理信息的方式进行信息并行处理和非线性转换的复杂网络系统,具有学习、联想、记忆、综合等能力,可通过学习来获取外部知识并将其存储在网络内,可解决模式识别中一些不易处理的难题。

BP 神经网络是一具有 3 层或 3 层以上神经元的网络,包括输入层、中间层(隐层)和输出层。上下层间实现全连接,而每层神经元间无连接。当训练样本提供给网络后,神经元的激活值从输入层经各中间层向输出层传播,在输出层的各神经元获得网络的输入响应。然后,按照减少目标输出与实际输出间误差的方向,从输出层反向经中间层再回到输入层,从而逐层修正各连接权值,这种算法称为“误差反向传播算法”,即 BP 算法。随着这种误差逆向传播修正的不断进行,网络对输入模式响应的正确率也不断上升。图 1 为 3 层 BP 神经网络的结构。

把 BP 神经网络应用于模式识别问题分为两个截然不同的阶段:第 1 阶段为网络训练阶段(图 2);第 2 阶段为预测阶段,权值和阈值固

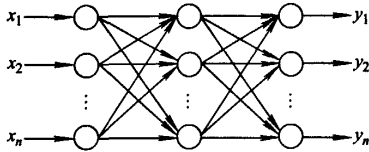


图1 3层BP神经网络结构

Fig.1 Structure of 3-storey BP neural network

定不变,将预测样本的数据输入到网络中,网络自动完成分类(图3)。

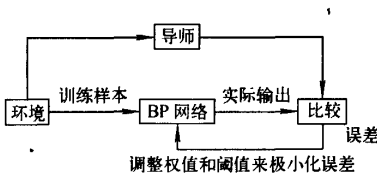


图2 网络训练阶段

Fig.2 Network training stage

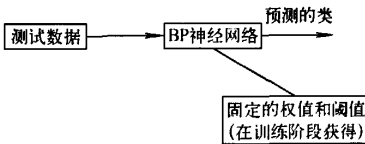


图3 网络预测阶段

Fig.3 Network forecasting stage

### 3 BP神经网络在古今名钧瓷研究中的应用

BP神经网络的学习方式是有导师监督的学习,所以在训练网络前,需知道训练样品的来源和分类情况。为防止病态样本的出现,易于网络训练学习,首先应对样品数据进行归一化。归一化公式为:

$$\hat{x} = \frac{x - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}}$$

对于胎和釉归一化后的 INAA 数据,各自选取 35 个样品作为训练样本,留下 5 个样品作为测试样本。

#### 3.1 胎样本的 BP 神经网络结构与预测结果

每个样品的 INAA 数据有 25 个,所以,输入层的神经元个数取为 25。根据参考公式和训练误差情况,隐层神经元个数取为 10。为区分古钧官瓷和现代高档钧瓷,类别模式取为 2,输出层神经元个数取为 1。根据不同函数的训练误差情况,最后确定的基于胎样本识别的 BP 神经网络结构列于表 2。

应用已设计的网络结构创建 BP 神经网络,首先对 35 个胎训练样本进行训练,古钧官瓷的训练目标为 0,现代高档钧瓷的训练目标为 1。经 4 步训练,误差便能满足要求,训练结果示于图 4。

表 2 基于胎样本的 BP 神经网络结构

Table 2 BP neural network structure for body samples

网络结构	输入层神经元	输出层神经元	隐层神经元	训练函数	隐层传递函数	输出层传递函数
单隐层 BP	25	1	10	trainlm	logsig	logsig

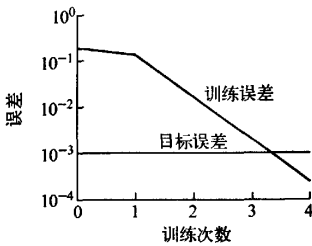


图4 胎样本的BP神经网络训练结果

Fig.4 BP neural network training result of body samples

用 5 个测试样本检验网络对未知样本的预测性能,预测结果列于表 3。

从表3可看出,5个预测样品的预测误差均

表 3 网络对 5 个胎测试样本的预测结果

Table 3 Network forecasting result of five body test samples

测试样本	真实值	预测值	预测误差绝对值
J179b	0	0.043 0	0.043 0
J220b	0	0.020 0	0.020 0
J223b	0	0.018 4	0.018 4
J841b	1	0.988 2	0.011 8
J900b	1	0.996 1	0.003 9

较小,最大的仅为 0.043 0,即 4.3%。可见,该网络对未知胎样本有较好的预测能力。

#### 3.2 釉样本的 BP 神经网络结构与预测结果

与上述方法相似,确定的基于釉样本的 BP 神经网络结构列于表 4。

表 4 基于釉样本的 BP 神经网络结构  
Table 4 BP neural network structure for glaze samples

网络结构	输入层神经元	输出层神经元	隐层神经元	训练函数	隐层传递函数	输出层传递函数
单隐层 BP	25	1	5	trainlm	logsig	logsig

应用已设计的网络结构创建 BP 神经网络。同样先对 35 个釉训练样本进行训练,古钧官瓷釉的训练目标为 0,现代高档钧瓷釉的训练目标为 1。经 2 步训练,网络训练误差便能满足要求,训练结果如图 5 所示。

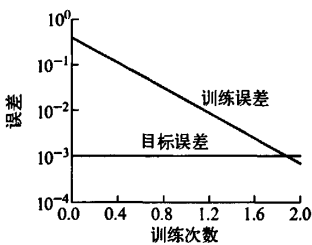


图 5 釉样本的 BP 神经网络训练结果  
Fig. 5 BP neural network training result of glaze samples

用 5 个测试样本检验网络对未知样本的预测性能,预测结果列于表 5。

表 5 网络对 5 个釉测试样本的预测结果  
Table 5 Network forecasting result of five glaze test samples

测试样本	真实值	预测值	预测误差绝对值
J176g	0	0.017 0	0.014 6
J233g	0	0.017 0	0.017 0
J248g	0	0.008 8	0.008 8
J865g	1	0.976 1	0.023 9
J873g	1	0.994 9	0.005 1

从表 5 可见,5 个测试样本的预测误差均较小,最大的仅为 0.023 9,即 2.39%。可见,训练好的网络对未知釉样本也有较好的预测结果。

#### 4 结论

应用 BP 神经网络对古今名钧瓷胎、釉的 INAA 数据进行了训练和预测,5 个古钧官瓷和现代高档钧瓷胎预测样品的预测误差较小,最大的仅为 4.30%;5 个古钧官瓷和现代高档钧瓷釉预测样本的预测误差更小,最大的仅为 2.39%。这表明:古钧官瓷和现代高档钧瓷釉

的原料来源和配方的区分度相对于胎较大,更易进行鉴别,所以,预测误差更小。应用训练好的 BP 神经网络对未知古钧官瓷和现代高档钧瓷胎、釉样本进行预测,得到了较好的预测结果。BP 神经网络和模糊聚类分析(或因子分析等方法)相结合,可提高古陶瓷鉴别的正确率。

但 BP 神经网络自身尚存在一些缺陷和不足,如学习速率固定,网络收敛速度慢,需较长的训练时间;若增加学习样本,训练好的网络需从头开始训练,对以前的权值是没有记忆的。

#### 参考文献:

- [1] 河南省文物考古研究所. 禹州钧台窑[M]. 郑州:大象出版社,2008.
- [2] 陈显求,黄瑞福,陈士萍,等. 宋、元钧瓷的中间层、乳光和呈色问题[J]. 硅酸盐学报,1983,11(2):129-140.  
CHEN Xianqiu, HUANG Ruifu, CHEN Shiping, et al. On the interlayer, opalescence and coloration of Jun (Chun) ware in the Song and Yuan dynasties[J]. J Chin Ceram Soc, 1983, 11(2): 129-140(in Chinese).
- [3] 李国霞,赵维娟,李融武,等. 汝官瓷和钧官瓷胎料来源的质子激发 X 射线荧光分析[J]. 中国科学,2006,36(3):239-247.  
LI Guoxia, ZHAO Weijuan, LI Rongwu, et al. Proton induced X-ray emission (PIXE) analysis of sources of porcelain body of Ru Guan and Jun Guan porcelains[J]. Science in China, 2006, 36(3): 239-247(in Chinese).
- [4] 高正耀,赵维娟,李国霞,等. 秦始皇陵兵马俑原料产地的中子活化分析[J]. 中国科学,2002,32(10):900-907.  
GAO Zhengyao, ZHAO Weijuan, LI Guoxia, et al. Neutron activation analysis of sources of raw material of emperor Qin Shi Huang's terracotta warriors and horses[J]. Science in China, 2002, 32(10): 900-907(in Chinese).
- [5] PANDYA A S, MACY R B. 神经网络模式识别及其实现[M]. 徐勇,等,译. 北京:电子工业出版社,1999.

作者: [李国霞](#), [梁先华](#), [李融武](#), [赵青云](#), [孙新民](#), [赵文军](#), [赵维娟](#), [孙洪巍](#), [郭敏](#), [谢建忠](#), [高正耀](#), [冯松林](#), [崔鹏飞](#), [杨大伟](#), [LI Guo-xia](#), [LIANG Xian-hua](#), [LI Rong-wu](#), [ZHAO Qing-yun](#), [SUN Xin-min](#), [ZHAO Wen-jun](#), [ZHAO Wei-juan](#), [SUN Hong-wei](#), [GUO Min](#), [XIE Jian-zhong](#), [GAO Zheng-yao](#), [FENG Song-lin](#), [CUI Peng-fei](#), [YANG Da-wei](#)

作者单位: [李国霞](#), [梁先华](#), [赵维娟](#), [孙洪巍](#), [郭敏](#), [谢建忠](#), [高正耀](#), [崔鹏飞](#), [杨大伟](#), [LI Guo-xia](#), [LIANG Xian-hua](#), [ZHAO Wei-juan](#), [SUN Hong-wei](#), [GUO Min](#), [XIE Jian-zhong](#), [GAO Zheng-yao](#), [CUI Peng-fei](#), [YANG Da-wei](#) (郑州大学物理工程学院, 河南, 郑州, 450052), [李融武](#), [LI Rong-wu](#) (北京师范大学物理系, 北京, 100875), [赵青云](#), [孙新民](#), [赵文军](#), [ZHAO Qing-yun](#), [SUN Xin-min](#), [ZHAO Wen-jun](#) (河南省文物考古研究所, 河南, 郑州, 450000), [冯松林](#), [FENG Song-lin](#) (中国科学院高能物理研究所, 北京, 100049)

刊名: [原子能科学技术](#) **ISTIC EI PKU**

英文刊名: [ATOMIC ENERGY SCIENCE AND TECHNOLOGY](#)

年, 卷(期): 2010, 44(3)

### 参考文献(5条)

1. 河南省文物考古研究所 [禹州钧台窑](#) 2008
2. PANDYA A S;MACY R B;徐勇 [神经网络模式识别及其实现](#) 1999
3. 高正耀;赵维娟;李国霞 [秦始皇陵兵马俑原料产地的中子活化分析](#) 2002(10)
4. 李周霞;赵维娟;李融武 [汝官瓷和钧官瓷胎料来源的质子激发X射线荧光分析](#)[期刊论文]-[中国科学A辑](#) 2006(03)
5. 陈显求;黄瑞福;陈士萍 [宋、元钧瓷的中间层、乳光和呈色问题](#) 1983(02)

### 本文读者也读过(10条)

1. [李国霞](#). [孙洪巍](#). [崔鹏飞](#). [赵维娟](#). [李融武](#). [赵青云](#). [孙新民](#). [赵文军](#). [承焕生](#). [郭敏](#) [基于PIXE无损测试数据的古今名瓷判别分析](#)[会议论文]-2010
2. [赵维娟](#). [胥爱军](#). [李融武](#). [高正耀](#). [李国霞](#). [谢建忠](#). [韩国河](#). [张仲立](#). [朱君孝](#). [冯松林](#). [柴之芳](#) [秦始皇陵一号坑兵马俑的指纹元素散布分析](#)[期刊论文]-[华夏考古](#)2003(4)
3. [赵维娟](#). [李融武](#). [高正耀](#). [李国霞](#). [谢建忠](#). [韩国河](#). [冯松林](#). [范东宇](#). [张颖](#). [柴之芳](#). [张仲立](#). [朱君孝](#) [用中子活化分析研究秦始皇陵一号坑兵马俑的原料产地](#)[期刊论文]-[核技术](#)2003, 26(8)
4. [王姣凤](#). [谢保勋](#). [李融武](#) [药房微机管理系统及其应用](#)[期刊论文]-[河南科技](#)2001, 1(2)
5. [刘舜民](#). [杨大伟](#). [李融武](#). [郑炯鑫](#). [陈丽芳](#). [LIU Shun-min](#). [YANG Da-wei](#). [LI Rong-wu](#). [ZHENG Jiong-xin](#). [CHEN Li-fang](#) [德化地区不同窑口青花瓷的质子激发X射线荧光分析](#)[期刊论文]-[河南师范大学学报\(自然科学版\)](#) 2009, 37(4)
6. [肖朋飞](#). [赵红梅](#). [李融武](#). [赵文军](#). [李国霞](#). [赵维娟](#). [承焕生](#). [XIAO Peng-fei](#). [ZHAO Hong-mei](#). [LI Rong-wu](#). [ZHAO Wen-jun](#). [LI Guo-xia](#). [ZHAO Wei-juan](#). [CHENG Huan-sheng](#) [汝官瓷、钧官瓷和刘家门窑青瓷的多元统计分析](#)[期刊论文]-[硅酸盐通报](#)2011, 30(2)
7. [胡耀波](#). [李鹏](#). [熊惟皓](#) [BP神经网络的实现及应用](#)[期刊论文]-[机械工程材料](#)2002, 26(6)
8. [曹柳林](#). [李晓光](#). [王晶](#). [CAO Liulin](#). [LI Xiaoguang](#). [WANG Jing](#) [利用结构逼近式混合神经网络实现间歇反应器的建模](#)[期刊论文]-[化工学报](#)2008, 59(4)
9. [张颖](#). [梁智昊](#). [于一](#) [基于神经网络融合技术的BP算法研究](#)[期刊论文]-[中国管理信息化](#)2011, 14(22)
10. [谢保勋](#). [王姣凤](#). [李融武](#) [药品信息管理系统及其应用](#)[期刊论文]-[医学信息](#)2001, 14(11)