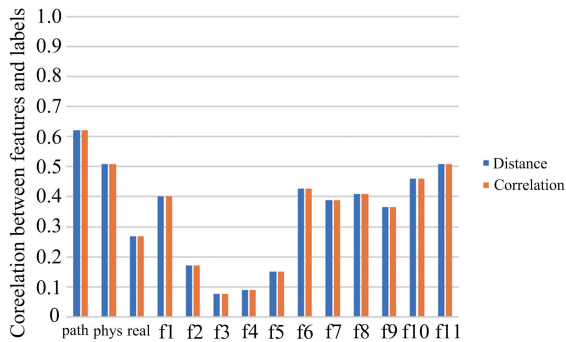


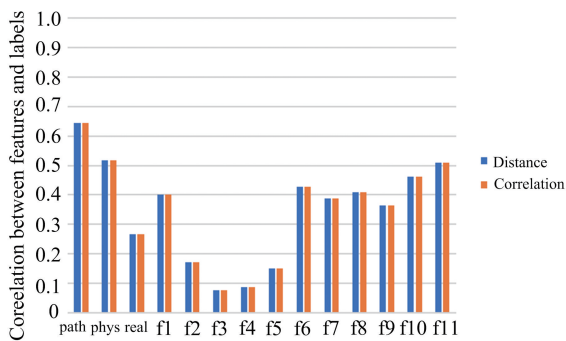
从图 2 可以看出,Path_HeartAge_Estima 算法的估计年龄在 NC 与 HD 之间具有最大差异.在无特征压缩情况下,Path_HeartAge_Estima 算法的 NC 和 HD 平均年龄差为 14.8810, HeartAge_Estima 算法的 NC 和 HD 平均年龄差异为 7.151 8,不考虑年龄检测情况下的 NC 和 HD 的平均年龄差为 5.361 7;在 P_value 特征选择情况下,Path_HeartAge_Estima 算法的 NC 和 HD 的平均年龄差为 11.843 7, HeartAge_Estima 算法的 NC 和 HD 的平均年龄差为 8.103 3,不考虑年龄检测情况下的 NC 和 HD 的平均年龄差 2.617.基于 P_value 特征选择与 PCA 特征压缩具有相似结果.综上所述,Path_HeartAge_Estima 算法比 HeartAge_Estima 算法具有更好的分类能力,且两者均优于实际年龄.

2.5 心脏年龄信息表征能力分析

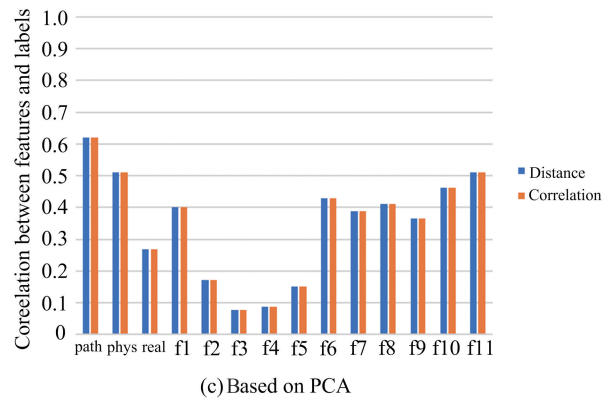
图 3 比较了不同情况下特征与类别之间的相关性,“real”指实际年龄;“phys”指生理年龄;“path”病理年龄;f1~f11 指心脏病数据集 11 个特征.特征与类别间的相关性越强,信息表征能力越好.从图 3 可以看出,对于特征与类别之间的相关性,估计的心脏年龄比实际年龄及其他医学特征都好,且心脏病病理年龄明显优于生理年龄.实验结果表明,心脏病病理年龄和生理年龄具有更好的分类能力,且前者优于后者.P_value 和 PCA 具有相似结论,且两者之间没有明显区别.图中,distance 是指可分度距离准则,correlation 是指相关性准则.



(a) Based on no feature reduction



(b) Based on P_value



(c) Based on PCA

图 3 估计年龄信息表征能力图形比较

Fig.3 Comparisons of information representation capabilities of ages

3 结论

相比于实际年龄,心脏年龄对于心脏健康状态检测和监测都有着极为重要的作用,但目前几乎无公开文献报道如何从心脏医疗数据中提取心脏年龄.本文基于心脏病公共医疗数据,采用封装式偏差回归方法,实现了两种心脏年龄估计算法,分别提取了心脏生理年龄和病理年龄.前者仅基于正常人样本建立回归模型,通过最小化估计年龄和实际年龄差异进行模型训练.后者基于所有类型样本建立回归模型,引入年龄偏差表征实际年龄和病理年龄差异,通过最大化分类准确率来搜索年龄偏差.两种方法均采用了 SVR 作为回归器.实验结果表明,两种估计年龄的分类能力和信息表征能力均优于实际年龄,显著性差异均远小于 0.01.其中,心脏病病理年龄较优于心脏生理年龄.本文研究首次提出了心脏病病理年龄这一新概念,并为心脏健康状态检测和监测提供了有效的标记物,有助于实现高效的心脏健康状态检测和动态监测,为全生命周期下心脏病管理工作奠定一定的技术基础.

参考文献 (References)

[1] BENJAMIN E J, VIRANI S S, CALLAWAY C W, et al. Correction to: Heart disease and stroke statistics-2018 update: A report from the American Heart Association[J]. Circulation, 2017, 135(10):1-2.

[2] DAVIS A. Relationship of age and geographic location to heart disease health beliefs of African American women [D]. Gradworks, Walden University, 2014:1-24.

[3] FINEGOLD J A, ASARIA P, FRANCIS D P. Mortality from ischemic heart disease by country, region, and age: Statistics from World Health

- Organisation and United Nations [J]. *International Journal of Cardiology*, 2013, 168(2): 934-945.
- [4] KOOPMAN C, BOTS M L, VAN D I, et al. Shifts in the age distribution and from acute to chronic coronary heart disease hospitalizations[J]. *European Journal of Preventive Cardiology*, 2016, 23(2):170-177.
- [5] PADUR A A, HAMDAN A B, ABDULLAH T T B I P, et al. Evaluation of cardiovascular disease in patients with systemic arterial hypertension in relation to age and sex: A retrospective study in a south Indian population [J]. *Jornal Vascular Brasileiro*, 2017, 16 (1): 11-15.
- [6] CHANG J, LI B, LI J, et al. The Effects of Age, Period, and Cohort on Mortality from Ischemic Heart Disease in China [J]. *International Journal of Environmental Research & Public Health*, 2017, 14 (1): 1-12.
- [7] WU J R, MOSER D K, DEWALT D A, et al. Health literacy mediates the relationship between age and health outcomes in patients with heart failure [J]. *Circulation Heart Failure*, 2016, 9(1):1-19.
- [8] FRANKEL S, ELWOOD P, SWEETNAM P, et al. Birthweight, body-mass index in middle age, and incident coronary heart disease[J]. *Lancet*, 1996, 348 (9040): 1478-1480.
- [9] MENDES M. Comment on “Trends in age-specific coronary heart disease mortality in the European Union over three decades: 1980-2009” [J]. *Revista Portuguesa De Cardiologia*, 2013, 34(39): 3017-3027.
- [10] LOU Z, ALNAJAR F, ALVAREZ J M, et al. Expression-invariant age estimation using structured learning [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence*, 2018, 40(2): 365-375.
- [11] GUPTA I, KAUR S, SAHNI P, et al. Novel human age estimation system based on DCT features and locality-ordinal information [C]// *International Conference on Inventive Computation Technologies*. Coimbatore, India: IEEE Press, 2017: 1-4.
- [12] PAVLOVIĆ S, PEREIRA C P, RUI F V D S S. Age estimation in Portuguese population: The application of the London atlas of tooth development and eruption [J]. *Forensic Science International*, 2017, 272: 97-103.
- [13] TORRES M T, VALSTAR M F, HENRY C, et al. Small sample deep learning for newborn gestational age estimation [C]// *IEEE International Conference on Automatic Face & Gesture Recognition*. Washington, USA: IEEE Press, 2017: 79-86.
- [14] HERRERA M J, RETAMAL R. Reliability of age estimation from iliac auricular surface in a subactual Chilean sample [J]. *Forensic Science International*, 2017, 275: 317-320.
- [15] GÓMEZMARTÍN B, ESCAMILLAMARTÍNEZ E, FERNÁNDEZSEGUÍN L M, et al. Age estimation based on a radiographic study of the growing foot[J]. *Journal of the American Podiatric Medical Association*, 2017, 107(2):106-111.
- [16] 林岚, 靳聪, 付振荣, 徐小亭, 吴水才. 健康老年人脑年龄预测: 基于尺度子配置模型的大脑连接组分析[J]. *北京工业大学学报*, 2015, (6): 955-960.
- [17] FRANKE K, HAGEMANN G, SCHLEUBNER E, et al. Changes of individual BrainAGE, during the course of the menstrual cycle [J]. *Neuroimage*, 2015, 115: 1-6.
- [18] 赵欣, 张雄, 王伟伟, 刘亚男, 等. 年龄相关的动态功能连接网络特征研究[J]. *生物医学工程学*, 2017 (2): 161-167.
- [19] JI X Y, CHEN Y, YE G H, et al. Detection of RAGE expression and its application to diabetic wound age estimation[J]. *International Journal of Legal Medicine*, 2017, 131(3): 691-698.
- [20] FRANKE K, GASER C, MANOR B, et al. Advanced BrainAGE in older adults with type 2 diabetes mellitus [J]. *Frontiers in Aging Neuroscience*, 2013, 5(1): 90 (1-9).
- [21] HIRANO S, SHINOTOH H, SHIMADA H, et al. Age correlates with cortical acetylcholinesterase decline in Alzheimer's disease patients: A PET study [J]. *Alzheimers & Dementia*, 2012, 8(4): 531-532.
- [22] LÖWE L C, GASER C, FRANKE K. The effect of the APOE genotype on individual BrainAGE in normal aging, mild cognitive impairment, and Alzheimer's disease[J]. *Plos One*, 2016, 11(7): 1-25.
- [23] DIAS P E, BEAINI T L, MELANI R F. Age estimation from dental cementum incremental lines and periodontal disease[J]. *The Journal of forensic Odontostomatology*, 2010, 28(1): 13-21.
- [24] MOYSE E, BASTIN C, SALMON E, et al. Impairment of age estimation from faces in Alzheimer's disease[J]. *Journal of Alzheimers Disease*, 2015, 45 (2): 631-638.
- [25] LI Y, LI F, WANG P, et al. Estimating the brain pathological age of Alzheimer's disease patients from MR image data based on the separability distance criterion [J]. *Physics in Medicine & Biology*, 2016, 61 (19): 7162-7186.
- [26] LI Y, LIU Y, WANG P, et al. Dependency criterion based brain pathological age estimation of Alzheimer's disease patients with MR scans [J]. *Biomedical Engineering Online*, 2017, 16(1): 50-69.
- [27] HAN J S, SANG W L, BIEN Z. Feature subset selection using separability index matrix [J]. *Information Sciences*, 2013, 223(2): 102-118.
- [28] ZHANG Q, HU X, ZHANG B. Comparison of l_1 -norm SVR and sparse coding algorithms for linear regression[J]. *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, 2015, 26(8):1828-1833.

从胎釉配方工艺探析繁昌窑青白瓷制瓷工艺来源

崔名芳^{1,2}, 朱建华¹, 徐繁³

(1.安徽工业大学马克思主义学院 & 安徽工业大学冶金减排与资源综合利用教育部重点实验室,安徽马鞍山 243000;
2.中国科学技术大学科技史与科技考古系,安徽合肥 230026;3.繁昌县文物局,安徽繁昌 241200)

摘要:运用波长色散X射线荧光光谱法(WDXRF),分析了繁昌窑青白瓷胎、釉的化学组成,结合显微结构分析,并辅助以往的研究资料,与唐至五代时期北方邢窑、定窑、巩义窑白瓷和南方越窑青瓷胎、釉化学组成及配方工艺等方面进行系统的对比,对繁昌窑青白瓷的制瓷工艺来源问题进行了较为深入地探讨。研究显示,繁昌窑受北方定窑白瓷的影响较大,其最初的生产意图是白瓷;釉料配方工艺则延续了南方越窑系的高钙釉传统;繁昌窑青白瓷的生产体现了南北方制瓷工艺的交流。

关键词:繁昌窑;青白瓷;化学组成;显微结构;WDXRF

中图分类号: TQ17, K876.3 **文献标识码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.0253-2778.2018.09.012

引用格式: 崔名芳,朱建华,徐繁.从胎釉配方工艺探析繁昌窑青白瓷制瓷工艺来源[J].中国科学技术大学学报,2018,48(9):770-776.

CUI Mingfang, ZHU Jianhua, XU Fan. Origin of Qingbai porcelain technology of Fanchang kiln from the aspect of body and glaze crafts[J]. Journal of University of Science and Technology of China, 2018, 48(9):770-776.

Origin of Qingbai porcelain technology of Fanchang kiln from the aspect of body and glaze crafts

CUI Mingfang^{1,2}, ZHU Jianhua^{1*}, XU Fan³

(1. Marx's College, Key Laboratory of Emission Reduction & Resources Recycling in Metallurgy (Ministry of Education), Anhui University of Technology, Maanshan 243000, China;

2. Department of Scientific History and Archaeology, University of Science & Technology China, Hefei 230026, China;

3. Fanchang County Bureau of Cultural Relics, Fanchang 241200, China)

Abstract: Wavelength dispersive X-ray fluorescence (WDXRF) was used to determine the elemental abundance patterns of the Qingbai porcelain bodies and glazes from Fanchang kiln. In-depth explorations were conducted on the origin of the Qingbai porcelain technology in Fanchang kiln by combining the analysis of polarized light microscope and previous research, systemically contrasting Fanchang Qingbai porcelain with the Xing, Ding, Gongyi white porcelain and Yue blue porcelain in terms of their chemical compositions of porcelain bodies and glazes, as well as their craft-making. Research showed that the production of the Qingbai porcelain in Fanchang kiln was susceptible to influences of the white porcelain in Ding kiln, and its initial production intent was to produce white porcelain. The glaze composition would benefit from borrowing the traditional high calcium glaze of Yue ware. The production of Qingbai porcelain

收稿日期:2017-08-02;修回日期:2018-06-05

基金项目:教育部人文社科规划青年基金(16YJC780001),安徽省社科规划基金(AHSKQ2015D76),国家自然科学基金面上项目(21571004),安徽高校人文社会科学研究重点项目(SK2017A0074)资助。

作者简介:崔名芳,女,1980年生,博士生/讲师。研究方向:陶瓷考古、功能陶瓷。E-mail: cuimf@mail.ustc.edu.cn

通讯作者:朱建华,博士/副教授。E-mail: thesea@ustc.edu.cn

in Fanchang kiln embodied an exchange in ceramics technology between the south and the north.

Key words: Fanchang kiln; Qingbai porcelain; chemical composition; microstructure; WDXRF

0 引言

青白瓷是我国唐末、五代时期创烧的重要瓷器品种,至宋元时期(AD 960-1368),已形成以景德镇窑为中心的“景德镇青白瓷窑系”^[1-2],在中国陶瓷发展史上占有重要地位。20 世纪 50 年代以来,专烧或兼烧青白瓷的窑址在我国南方的安徽、湖北、江西、福建、广西和广东等省陆续被发掘和研究^[3],但这些研究资料尚不能对早期青白瓷的烧造历史及其技术来源问题做出判断。繁昌窑是目前已发掘的最早专烧青白瓷的窑口,并作为早期青白瓷的烧造中心,受到学界广泛关注。近几年,学者对繁昌窑发掘出土部分标本的胎、釉化学组成及显微特征进行了分析研究^[4-6],取得了重要的成果,并得出其使用“二元配方”胎料配方工艺的初步推断。本文主要从胎、釉化学组成及显微结构方面对繁昌窑青白瓷样品进行分析,并与唐至五代时期北方盛行的邢窑、定窑、巩义窑白瓷和南方越窑青瓷进行比较,为研究繁昌窑青白瓷的制瓷工艺来源和南北间瓷业技术交流提供有益启示。

1 实验样品与方法

1.1 样品

实验所用青白瓷样品选自 2002 年在繁昌窑遗址发掘出土的标本。我们从 3 个有明确先后顺序的探方(T97, T98, T316)中选择样品,样品数量共计 9 件,如图 1 所示。从外观上看,标本皆为青白瓷残片,器型多属碗类, T97、T98 探方中样品标本胎色洁白,胎质细腻,器表施透明青白釉,釉层较薄,部分釉面“开片”,布满密集裂纹, T316 探方中发掘的样品与上述两个探方不同,釉色白中泛黄,胎质白色略显粗糙,所选样品皆为素面,详细情况见表 1。

表 1 繁昌窑青白瓷样品

Tab.1 Samples of Qingbai porcelain of Fanchang kiln

探方与地层	样品数	胎质	釉色
T97⑦,⑤,②	4	白胎	青白釉,釉面光亮,间有开片
T98②	2	白胎,胎质细腻	青白釉,釉面布满开片纹
T316②-①	3	白胎	青白釉微泛黄,施釉不及底,釉面细开片

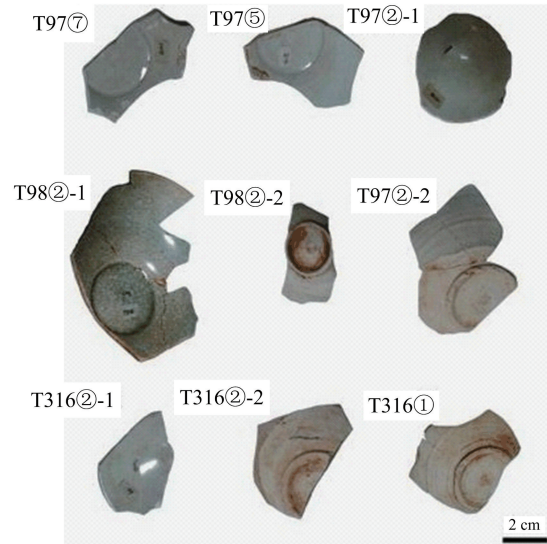


图 1 繁昌窑青白瓷样品

Fig.1 Qingbai samples excavated from Fanchang kiln

虽然所取样品分属不同探方,但是依据地层叠压关系与对探方内残存器物式样分析的划分,从 T97⑦—T97⑤—T97②—T98②—T316②-① 已经形成一个较清晰的年代发展序列,可代表繁昌柯家冲窑五代至北宋时期的青白瓷产品。

1.2 测试与表征

1.2.1 样品制备

为准确、清晰地观察到样品瓷片的胎质、釉色与内部包含物的特征,首先,我们去除了样品表面的浮尘,再用去离子水和乙醇分别超声清洗,烘干后,拍照并详细记录了样品切割前的宏观特征;然后,将部分样品沿横界面切割制成厚度为 0.03 mm 的薄片,备显微结构观察。最后,胎、釉常量元素分析,我们选择 WDXRF 熔片法,先取样品底部露胎部分,切割 1 cm×1 cm×1.5 cm 的小块,用碳化硅砂轮磨掉切割小块内部釉层,并将外部锈斑等打磨干净,分别放入无水酒精和去离子水中清洗 2 次;再选择样品釉层较厚处,将釉剥离,制成总重量约 1 g 的样品;将上述制备的胎、釉样品烘干后分别置于玛瑙研钵中磨成 200 目的固体粉末,将研磨好的胎、釉粉末置于烘箱内,110 °C 温度下烘干 2 h,分别称取 0.1 g 胎和釉粉末,0.8 g 无水 Li₂B₄O₇ 和 0.06 g LiF,倒入坩埚内混合均匀,再加入 3 滴 3% LiBr 溶液,烘干后放置于 Shimadzu 熔样机中在 150 °C ~ 1100 °C 温度

下熔融样品,冷却,备 X 荧光光谱分析。

1.2.2 仪器测试

偏光显微结构分析使用德国莱卡偏光显微镜 (LEICA, DM4500)。成分分析采用波长色散 X 射线荧光光谱法 (wave disperse X-ray fluorescence, WDXRF)。WDXRF 定量分析根据样品制备方法分为磨片法、粉末压片法和熔片法 3 种,其中熔片法耗样量少,各种元素的分布均匀性好^[7],能有效降低或消除样品的基体效应,比前两种方法具有更好的精确度和准确度,对熔片样品不同部位的 Si、Al 等主量元素进行面扫描,其分析线强度相对标准偏差均小于 0.3%^[8],是更适宜于测定古陶瓷主次量元素的方法^[9]。本次实验所用仪器为日本岛津扫描型波长色散型 X 射线荧光光谱仪 (SHIMADZU, XRF-1800),实验条件为:管电压 40 kV,管电流 70 mA,束斑直径 3 mm。

2 实验结果与分析

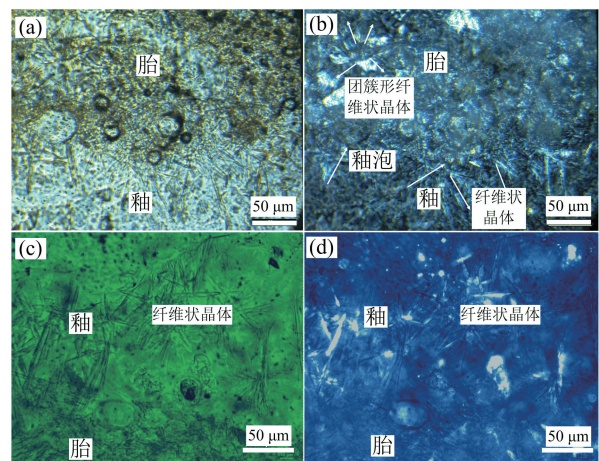
2.1 显微结构

青白瓷样品典型的光学显微图片如图 2 所示。青白釉基本呈现出透明的玻璃态,釉层中有气泡,气泡大且呈圆形,多分布在靠近中间层的区域(图 2(a), 2(b)),个别样品釉内残留有未熔融的石英晶体颗粒。胎釉中间区域有纤维状晶体生成(图 2(a), 2(b)),为团簇状生长的硅酸铝,纤维自釉层延展到胎体内(图 2(c), 2(d)),起到了增强胎釉间结合力的作用,其形成原因是局部氧化铝含量较高及较高的烧制温度。

2.2 瓷胎化学组成分析

我们对繁昌窑青白瓷样品进行了 WDXRF 分析,结果显示该批样品胎体中 Al_2O_3 的含量较高,均在 20% 以上,各样品瓷胎的详细化学组成如表 2

所示。我们对繁昌地区窑址附近的瓷石进行测试了分析,数据显示,窑址附近风化程度较浅的瓷石中 Al_2O_3 的含量分布在 11%~14% 之间,考虑到制瓷工艺中的淘洗环节,该过程中 Al_2O_3 含量有所上升,但对淘洗后样品成分分析显示 Al_2O_3 含量不超过 16%;但对一些风化程度较深的瓷石成分进行分析显示, Al_2O_3 含量较高,淘洗后可达到 24.99%^[10]。以上分析表明,繁昌地区存在富铝类瓷石原料,但普遍分布于窑址附近的风化程度较浅的瓷石不是单独用来制作青白瓷胎体的原料。鉴于瓷器制作所用原料的巨大和市场销售的非暴力利润,古代瓷窑选址时一般采取就近取材的原则,所以繁昌窑青白瓷胎体的配方有两种选择:一是选择采用这种窑址附近风化程度较浅的瓷石中掺入了某种含铝量较高的粘土类原料,混合制作瓷胎;二是选择采用风化程度较深的瓷石单独制胎,相关研究工作正在进行中。



(a), (b) 为样品 T97⑦ 的光学和偏光显微结构图, (c), (d) 为样品 T98②-1 的光学和偏光显微结构图

图 2 胎、釉光学(a), (c) 和偏光(b), (d) 显微结构图

Fig.2 Optical (a), (c) and polarized (b), (d) microscopic images of sample body and glaze

表 2 繁昌窑青白瓷样品瓷胎化学组成(%)

Tab.2 The chemical composition of porcelain body of Fangchang kiln (wt %)

编号	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	TiO_2	CaO	MgO	K_2O	Na_2O	MnO	P_2O_5
T97⑦-1	73.87	21.78	0.71	0.19	0.7	0.79	1.26	0.28	0.04	0.04
T97⑦-2	72.32	22.17	0.97	0.20	0.46	0.80	1.37	0.26	0.05	0.03
T97⑤	72.69	22.91	0.89	0.19	1.24	0.97	1.36	0.15	0.04	0.04
T97②	72.28	22.90	0.80	0.19	0.8	0.81	1.31	0.18	0.04	0.04
T98②-1	71.83	23.71	1.05	0.18	0.49	0.75	1.19	0.73	0.04	0.04
T98②-2	71.53	23.80	1.07	0.18	0.50	0.78	1.17	0.76	0.04	0.04
T316①	73.54	21.07	0.74	0.21	1.01	0.76	1.83	1.14	0.05	0.06
T316②-1	71.54	22.15	0.78	0.20	1.12	0.79	1.86	1.15	0.04	0.05
T316②-2	72.64	21.87	0.72	0.19	1.08	0.72	1.78	1.24	0.05	0.06

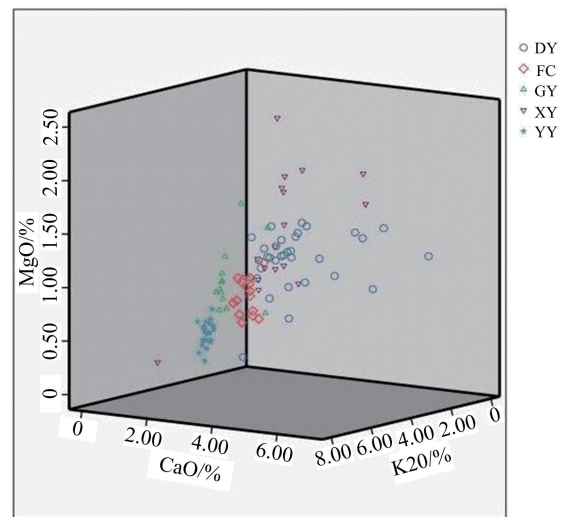
胎体中 Fe_2O_3 和 TiO_2 是主要呈色因素,低含量(1%左右)表明胎质较白,这与瓷器表现一致(模拟烧制过程也发现用这些风化程度较深的“瓷土”烧制的瓷胎,胎质洁白、细腻).该批次样品中主要助熔剂 CaO 的含量在 1% 左右, MgO 的含量在 1% 以下, K_2O 的含量在 1%~2% 之间.上述分析表明,该批次样品主要元素的数据大都介于白瓷和青瓷之间.

为更详细地说明问题,我们将繁昌窑青白瓷与南、北方具有代表性的邢窑、定窑、巩义窑白瓷和越窑青瓷胎体中部分常量元素的化学组成 (MgO - CaO - K_2O - Fe_2O_3 - TiO_2) 做散点图进行比较研究,为增加对比的可靠性,邢窑、定窑、巩义窑白瓷数据和越窑青瓷数据皆选自文献中唐至五代时期的样品数据.

图 3 是繁昌窑和北方邢窑、定窑、巩义窑与南方越窑样品中 MgO - CaO - K_2O 元素的 3 维比较图.由图 3 可以看出,繁昌窑和北方白瓷窑口尤其是定窑、邢窑白瓷样品中的元素含量最为接近,有交叉重叠.唐、五代时期,为了增加胎体烧结的致密度,定窑和邢窑部分白瓷的胎料配方中都更多地添加了钙类原料作为助熔剂,很大一部分样品胎体中 CaO 的含量超过 2%,部分甚至超过 5%,已接近或达到釉中 CaO 的含量^[11].繁昌窑瓷胎中 CaO 含量低于邢、定窑,高于巩义窑白瓷和越窑青瓷胎体中的含量.经对繁昌窑附近原材料进行分析,我们发现瓷石中 CaO 含量低于 3%,高岭土中 CaO 含量更低,大都在 0.5% 以下,单一瓷石制胎或者两者按比例混合制胎都会导致胎体中 CaO 含量在 1% 左右.据此可推断繁昌窑中 CaO 含量与原材料及配方工艺有关,且尽可能多的增加了胎体中 CaO 的含量,这种工艺特征增加了繁昌窑瓷器胎体烧结的致密度.

同时,繁昌窑青白瓷胎体中 K_2O 的含量普遍集中在 1%~2% 之间,与邢、定窑晚唐、五代时期细白瓷胎中 K_2O 的含量接近,低于巩义窑白瓷和越窑青瓷样品中的含量.我们对繁昌窑制瓷原料进行成分分析,发现高岭土中 K_2O 的含量较高(>3%),有的甚至达到 8%;风化程度较浅瓷石中 K_2O 的含量相对较低(<1%),而风化程度较深的瓷石中含量在 2% 以上.根据繁昌窑青白瓷器的低钾特征,可推断其应为原料选择和人为配比所致.

成分分析还显示青白瓷样品中 MgO (0.6-



(DY—定窑白瓷,XY—邢窑白瓷,GY—巩义窑白瓷,FC—繁昌窑青白瓷,YY—越窑青瓷)^[11-13]

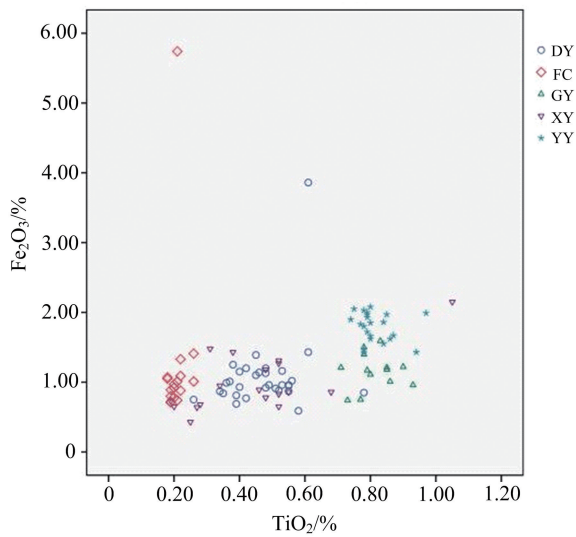
图 3 胎体 MgO - CaO - K_2O 3 维散点图

Fig.3 3D plot of MgO - CaO - K_2O in sample bodies

1.1%) 的含量高于南方越窑样品中的含量,但低于邢窑和定窑中 MgO 的含量.对繁昌地区高岭土分析显示, MgO 的含量都在 1% 以上,有些风化程度较深的瓷石中 MgO 的含量也在 2%~3% 之间,因此,样品中的 MgO 可能主要是由这种镁质粘土或风化程度较深的瓷石带入坯料中,与胎体中 SiO_2 和 Al_2O_3 反应,生成熔点较低的堇青石 ($2\text{MgO} \cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{SiO}_2$),起着较强的助熔作用,能降低青白瓷的烧成温度,并提高制品的白度.由此可见,繁昌窑青白瓷在生产过程中,胎体配方工艺方面体现为有意地选择接近邢窑、定窑,而不是巩义窑和越窑.

图 4 显示繁昌窑瓷胎中 Fe_2O_3 和 TiO_2 含量较低,最接近邢窑和定窑,有重叠;瓷胎的成分最接近原材料,繁昌窑青白瓷样品胎体中的低铁含量表明其拥有生产细白瓷的先决条件.

我们通过对当地的瓷石原料进行分析,验证了繁昌窑附近风化程度较浅的瓷石不能单独用来制作青白瓷胎体原料的研究推断^[4],应是选择了铝含量较高的瓷石原料单独制胎或者采用风化程度较浅的瓷石添加高岭土的“二元配方”制胎,这都有待实验进一步验证.无论选择上述哪种方法,都是为了增加胎体中 Al_2O_3 的含量,增强胎体的硬度,提高烧制温度.在五代时期南方越窑青瓷系占据主导地位的情况下,这是一种技术性选择.结合据上述元素散点图分析结果(图 3,4),繁昌窑青白瓷的胎体配方工艺更接近邢、定窑白瓷.



(DY—定窑白瓷,XY—邢窑白瓷,GY—巩义窑白瓷,FC—繁昌窑青白瓷,YY—越窑青瓷)^[11-13]

图 4 胎体 TiO_2 - Fe_2O_3 散点图

Fig.4 Bivariate plots of TiO_2 - Fe_2O_3 in bodies

2.3 瓷釉化学组成分析

与胎料相比,釉料的使用量较小,但配方中人为的技术因素起更大的作用,而且对瓷器的呈色起决定作用,因此在讨论青白瓷配方技术传统及来源问题时,瓷釉的化学组成更受到关注,本文各样品瓷釉

的详细化学组成如表 3 所示.成分分析显示,该批青白瓷样品釉中 K_2O 的含量在 1%~2.5% 之间, Fe_2O_3 和 TiO_2 的含量较低,都在 1% 以下, P_2O_5 的含量大都在 1% 左右,个别较高达到 1% 以上, CaO 的含量大部分在 10% 以上,有的接近 15%. K_2O 在瓷釉中能降低釉的熔融温度和高温粘度,使釉具有良好的透明度和光泽度,繁昌窑青白瓷釉中 K_2O 的含量都比较低,所以釉面失透性相对较弱,使得釉料白度值较高.较高含量的 P_2O_5 说明这些釉配制时使用的灰料应该是草木灰,而非石灰^[11]. P_2O_5 的散射作用可使瓷釉表面光泽趋柔^[14],如果瓷器胎体是白色,瓷釉中混有 0.5% 以下的 P_2O_5 时即可显示这种作用,但随着釉中 P_2O_5 含量的增加,釉面乳浊效果会增强,助长其失透作用,从而有利于增强釉的显色效果^[15],这应是繁昌窑一些样品外观清澈透明,一些略带乳浊感的重要原因.繁昌窑青白釉属于南方钙釉系统中的高钙石灰釉,釉中氧化钙应主要来自于石灰石和草木灰,与南方钙釉基本一致^[16],瓷石也能提供一部分,但不是主要来源(瓷石原料中 CaO 的含量 < 3%),在釉中增加 CaO 的含量能增加熔融度, CaO 的用量愈多,釉的熔融温度愈低,釉面透明度、光泽度也越好.

表 3 繁昌窑青白瓷样品瓷釉化学组成(%)

Tab.3 The chemical composition of porcelain glaze of Fangchang kiln(wt %)

编号	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	TiO_2	CaO	MgO	K_2O	Na_2O	MnO	P_2O_5
T97⑦-1	67.63	15.37	0.72	0.20	12.12	1.96	0.95	0.26	0.16	1.33
T97⑦-2	68.99	14.76	0.83	0.19	11.48	1.58	1.20	0.22	0.14	0.41
T97⑤	66.42	14.89	0.97	0.15	12.87	1.50	1.33	0.51	0.20	0.51
T97②	66.72	14.69	0.90	0.16	12.67	1.52	1.35	0.56	0.19	0.49
T98②-1	67.18	12.60	0.85	0.22	13.71	1.61	1.10	0.77	0.12	0.45
T98②-2	66.78	12.68	0.88	0.20	13.78	1.58	1.16	0.67	0.11	0.56
T316①	65.32	14.44	0.97	0.17	12.53	1.55	2.16	1.12	0.13	0.45
T316②-1	65.16	14.51	0.87	0.19	12.76	1.51	2.06	1.26	0.12	0.48
T316②-2	67.36	13.88	0.77	0.18	12.48	1.53	2.11	1.02	0.14	0.52

散点图分布显示(见图 5),繁昌窑青白瓷釉中 K_2O 、 MgO 和 CaO 的含量总体上介于白瓷釉和青瓷釉之间,更接近白瓷釉中的含量.繁昌地区原材料测试分析显示,瓷石原矿中 K_2O 和 MgO 的含量大都低于样品釉中的含量,因此繁昌窑瓷釉中应引入了钾长石以增加 K_2O 的含量,同时使用了 MgO 含量高的草木灰以提高镁含量,样品中高含量的 P_2O_5 也是釉中引入草木灰的一个证据.

北方邢、定、巩窑白瓷釉除个别外, CaO 的含量大都在 10% 以下,越窑青瓷釉中 CaO 的含量都在 12% 以上,有的超过 20%.繁昌窑 CaO 的含量大都

在 10%~15% 之间,更接近于越窑青瓷.釉中灰量愈高,釉色愈偏青黄.通过控制釉灰用量,可避免 CaO 含量高时出现白中泛青或泛黄的釉色,增加釉面的白度值^[11].鉴于繁昌地区瓷石原矿中 CaO 含量在 3% 以下,推测繁昌窑窑工们借鉴了越窑青瓷高钙釉配方工艺,刻意增加了釉中 CaO 的含量,这是瓷釉配方工艺的技术选择.

从瓷釉中的着色元素 Fe_2O_3 和 TiO_2 含量分布来看(见图 6),繁昌窑青白瓷釉和邢、定窑白瓷釉中两种元素的含量接近,而与越窑青瓷釉中的含量相差甚远.繁昌地区具有优质低铁瓷土,这是生产白釉