

河南淅川徐家岭出土中国最早的蜻蜓眼玻璃珠的研究

干福熹^{①②*}, 承焕生^②, 胡永庆^③, 马波^②, 顾冬红^①

① 中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800;

② 复旦大学, 上海 200433;

③ 河南省文物考古研究所, 郑州 450000

* E-mail: fxgan@mail.shcnc.ac.cn

收稿日期: 2008-04-04; 接受日期: 2008-09-04

国家自然科学基金项目(批准号: 50672106)和中国科学院第三期知识创新工程方向性项目(批准号: KJCX3-SYW. No. 12)资助

摘要 研究了河南省淅川徐家岭出土的属战国早期的蜻蜓眼玻璃珠. 利用质子激发 X 光荧光技术(PIXE)和 X 光衍射技术(XRD)等无损分析方法测定了这批蜻蜓眼玻璃珠的结构和化学成分. 确定了蜻蜓眼珠的基质为玻璃态物质, 其化学成分表明该玻璃属于钠钙硅酸盐系统($\text{Na}_2\text{O}-\text{CaO}-\text{SiO}_2$). 通过与古代(古巴比伦和古埃及)的蜻蜓眼玻璃珠的纹饰和化学成分的对比, 认为徐家岭出土的这批玻璃珠可能从西方传入.

关键词

蜻蜓眼玻璃珠
古代中西交流
化学成分分析

中国境内古代玻璃制品的来源有 3 个方面: 1) 玻璃制造技术来自本身, 应用当地的原料制成的玻璃物品, 如中国内地(inner China, 主要指黄河和长江流域)楚墓出土的春秋战国的古剑上的玻璃饰品和玻璃珠^[1]; 2) 引用外来的玻璃制造技术和应用当地原料制成的物品, 如中国“西域”地区(west region, 主要指新疆地区), 如拜城出土的属西周——春秋的玻璃珠^[2]; 3) 玻璃物品由国外引进的. 西方玻璃从两河流域、古埃及、希腊、罗马到伊斯兰玻璃, 它们的玻璃成分比较一致, 即钠钙硅酸盐玻璃, 比较容易识别^[3]. 汉代张骞出使西域之后, 有不少玻璃器皿从西方进来, 各地已有很多出土. 但先秦时期, 特别是在战国早期从西方传入中原的出土样品很少, 有报道的如湖北随县曾侯乙墓^[4], 河南固始侯古堆^[5]和河南淅川县徐家岭等蜻蜓眼珠^[6], 但都只有单个残片的化学成分的分析结果(见文献^[1]). 最近河南省文物考古研究所提供了徐家岭出土的战国早期 11 颗较完整的蜻蜓眼珠文

物样品, 本文用无损分析方法进行了综合测试分析, 获得了十分有意义的结果.

1 古代蜻蜓眼珠样品和出土情况

测量的样品是由河南省文物考古所 1991 年 10 月在河南省淅川县徐家岭发掘的战国早期(公元前 500 年) M10 号古墓地出土的镶嵌珠(inlaid beads), 又称蜻蜓眼珠(eye beads), 总共出土 11 颗, 这些样品的外形相似, 均为天蓝色基体, 深蓝色的眼珠, 并有赭石色圆圈, 白底. 所有样品均为战国早期制造, 对样品的详细描述如表 1 所示. 样品保存完好, 无风化. 其中 6 颗较完整的蜻蜓眼玻璃珠彩色照片如图 1 所示(HNZZ-01, 03, 05, 04, 08, 11).

淅川县位于河南省西南部, 处秦岭山系东南余脉延伸地段, 境内丘陵起伏, 山峦叠嶂, 丹江从其西北向东南流去, 丹江是汉水的主要支流. 自西周以来, 楚族建都丹阳, 雄踞江淮, 饮马黄河、问鼎中原, 成

表 1 河南淅川县徐家岭墓地古代蜻蜓眼玻璃珠样品描述

样品编号	标本号	器名	样品描述(尺寸/cm)	完残情况
HNZZ-01	M10:3	玻璃珠	体近圆柱形, 断面为圆形, 两端近平, 中有一圆形穿孔, 高 1.9, 最大直径 2.1, 孔径 0.52	完整
HNZZ-02	M10:41	玻璃珠	体近圆柱形, 断面为圆形, 两端近平, 中有一圆形穿孔, 高 1.8, 最大直径 2, 孔径 0.52	磕伤
HNZZ-03	M10:4-1	玻璃珠	体近珠形, 断面为圆形, 两端近平, 中有一圆形穿孔, 高 1.5, 最大直径 1.88, 孔径 0.48	完整
HNZZ-04	M10:4-2	玻璃珠	体近珠形, 断面为圆形, 两端近平, 中有一圆形穿孔, 高 1.49, 最大直径 1.87, 孔径 0.38	完整
HNZZ-05	M10:4-3	玻璃珠	体近珠形, 断面为圆形, 两端近平, 中有一圆形穿孔, 高 1.48, 最大直径 1.81, 孔径 0.34	完整
HNZZ-06	M10:4-4	玻璃珠	体近珠形, 断面为圆形, 两端近平, 中有一圆形穿孔, 高 1.42, 最大直径 1.81, 孔径 0.28	残
HNZZ-07	M10:4-5	玻璃珠	体近珠形, 断面为圆形, 两端近平, 中有一圆形穿孔, 高 1.41, 最大直径 1.75, 孔径 0.28	磕伤
HNZZ-08	M10:4-6	玻璃珠	体近珠形, 断面为圆形, 两端近平, 中有一圆形穿孔, 高 1.39, 最大直径 1.79, 孔径 0.25	完整
HNZZ-09	M10:95-1	玻璃珠	体近珠形, 断面为圆形, 两端近平, 中有一圆形穿孔, 高 1.46, 最大直径 1.71, 孔径 0.25	残
HNZZ-10	M10:95-2	玻璃珠	体近珠形, 断面为圆形, 两端近平, 中有一圆形穿孔, 高 1.37, 最大直径 1.61, 孔径 0.22	磕伤
HNZZ-11	M10:95-3	玻璃珠	体近珠形, 断面为圆形, 两端近平, 中有一圆形穿孔, 高 1.15, 最大直径 1.4, 孔径 0.16	完整



图 1 河南淅川县徐家岭墓地古代蜻蜓眼玻璃珠

为春秋五霸、战国七雄之一的泱泱大国。丹江流域是古代楚国活动的主要区域。徐家岭墓地位于丹江冲积平原——顺阳川的西部, 现属于河南淅川县仓房乡沿江行政村。又称“凤凰头”, 西南部为龙山, 东邻丹江, 地势由东向西渐高。M10 号墓地位于西北, 根据青铜器、玉器等随葬品分析, 墓主的身份应相当于大夫级^[7]。

2 实验方法

实验中使用了质子激发 X 荧光分析(PIXE)方法对样品进行成分分析。测量是在复旦大学现代物理研究所加速器实验室进行的。设备为 NEC9SDH-2 串列加速器, 采用外束 PIXE 分析技术。分析使用的质子束是由串列加速器提供 3.0 MeV 左右的高能准质

子束, 真空与大气之间以 7.5 μm 的Kapton膜相隔; 样品置于大气中, 距离Kapton膜 10 mm, 质子束穿过该Kapton膜和空气, 到达样品表面的实际能量为 2.8 MeV, 束斑直径为 1 mm, 束流为 0.1 nA。X射线用Si(Li)探测器测量, 系统对Mn的K α (5.9 keV)的能量分辨率(full width half maximum, FWHM)为 165 eV。根据测得的能谱, 采用GUPIX-96 程序进行解谱分析, 测得样品中元素序数大于12($Z \geq 12$)的各元素的组成。为了要测得玻璃中Na的含量, 样品在测量时用He气包围, 以防止大气吸收损耗。详细的实验过程见文献^[8]。

X射线衍射(XRD)技术是鉴别样品是否是玻璃态最有效的方法。实验采用复旦大学表面化学实验室的 Bruker D8 Advance 型多晶 X 射线衍射仪进行, 测试条件为: 室温, Cu K α 靶, $\lambda=0.115406$ nm, 管电流

40 mA, 管电压 40 kV.

3 实验结果

3.1 XRD 实验结果

由于这批蜻蜓眼样品是类同的, 选取了样品 HNZZ-01, HNZZ-03 和 HNZZ-05 分别测定了基体、眼珠和眼圈的 XRD 曲线, 实验结果见图 2~4.

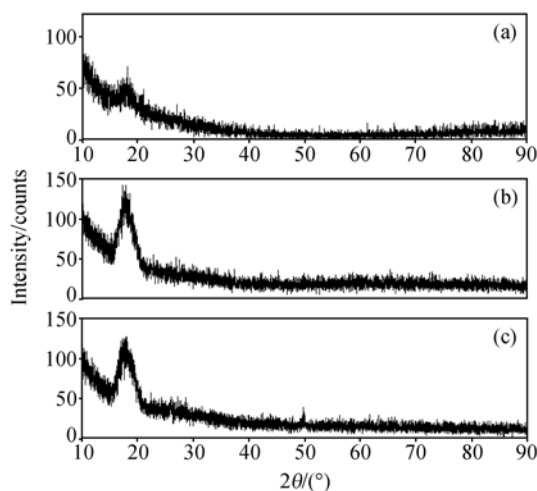


图 2 蜻蜓眼珠淡蓝色基体 X 射线衍射图

(a) HNZZ-01 基体; (b) HNZZ-03 基体; (c) HNZZ-05 基体

靠近 2θ 为 20° 的弥散峰为样品的小角散射, 表示了样品内部的不均匀性. 小角散射峰强度的增加, 表示了样品内部的散射颗粒的尺寸和数量的增加. XRD 图谱中尖锐的衍射峰为所含晶体的特征谱线. 图中标出所含可能的晶体的 XRD 的标志线.

3.2 PIXE 实验结果

用质子激发 X 荧光分析(PIXE)方法对 11 颗蜻蜓眼进行了化学成分的测试, 结果见表 2. 用重量的百分含量表示, 对每一个样品又根据其颜色和部位分别进行测量, 以便比较.

4 结果讨论

根据目前对中原地区最早的玻璃成分演变及其起源的研究表明^[9], 在西周和春秋早期从中原出土的在文博界所称的料器和琉璃, 其实并非玻璃态物品. 由于当时所能获得的炉温不够高, 实质上是石英砂的烧结物, 稍有玻璃相, 表面有玻璃光泽, 我们称之为

为釉砂(faience). 以后随温度逐渐升高, 玻璃相含量增加, 成为石英砂与玻璃的混合物, 称为玻砂(frit)^[10]. 以铅钡硅酸盐玻璃(PbO-BaO-SiO_2)为特征的中国内地自制玻璃约在战国中晚期, 在长江流域地区. 所以从春秋晚至战国早期这段时期的类似玻璃的物品是何物, 又从何处来是古玻璃研究所最关心的. 河南淅川徐家岭出土的这批蜻蜓眼珠正属上述时间段.

根据 XRD 的测量结果(图 2), 这批蜻蜓眼珠的基体显示出玻璃态的特点, X 射线小角散射峰说明玻璃的质地并不均匀, 小角散射峰的强度不同, 表明玻璃体内所含颗粒尺寸大小和数量的不同. 从蜻蜓眼珠的珠眼和眼底 XRD 图可以看到, 存在着明显的晶体的特征衍射峰. 根据矿物 XRD 卡对比, 主要为 α -石英、硅酸钠钙 $\text{Na}_2\text{Ca}(\text{SiO}_4)$ 和硅酸钙 $\text{Ca}_3(\text{SiO}_5)$ 的晶体, 是玻璃未融化好的产物, 可以看成是玻砂与玻璃之间的产物.

从这些蜻蜓眼珠的化学成分的分析结果可以看到, 基体、珠眼、眼底皆属于钠钙硅酸盐($\text{Na}_2\text{O-CaO-SiO}_2$)系统, Na_2O 的含量在 5%~10%, CaO 在 7%~15%, SiO_2 在 65%~76% 之间, 其中 $\text{K}_2\text{O} < 2.5\%$, Al_2O_3 在 3%~5% 之间, $\text{MgO} < 1.5\%$, 这批玻璃珠的化学成分明显区别于同时代在湖北江陵出土的玻璃珠和剑饰上的玻璃成分(钾钙硅酸盐玻璃)^[11]. 前者 $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O} \leq 0.2$, 而后者 $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O} > 5$. 这批蜻蜓眼玻璃珠的化学成分与古代西方两河流域和埃及地区的玻璃成分相似^[11,12], 即钠钙硅酸盐玻璃, 以泡碱作为主要助熔剂. 只是 Na_2O 的含量较低, 这也是这批蜻蜓眼玻璃珠的珠眼含有熔化不完全的微小晶体的主要原因.

基体玻璃的杂质含量较少, 在制备过程中使用了较纯的原料, Fe_2O_3 的含量小于 1%, CuO 的含量高于 Fe_2O_3 , 在 1.5% 左右, 基体玻璃呈淡蓝色是由于 Cu^{2+} 所产生的. 基体玻璃中不含 CoO , 而在深蓝色的珠眼中含 0.1%~0.3% CoO , Co^{2+} 是作用很强的蓝色着色剂, 这明显是人为设计而添加的. 这是在中国出土的古玻璃和古瓷釉中发现最早的钴蓝(即用 CoO 作蓝色着色剂). 中国古代玻璃中使用 CoO 做着色剂(含量 $\geq 0.1\%$), 大致从东汉开始^[13], 而西方古代两河流域(美索不达米亚)和古埃及使用钴蓝约在公元前 1 千年(1000 BC)^[11]. 所以从以上玻璃的主要化学成分和着色剂的使用来看, 这批蜻蜓眼玻璃珠从西方传入的

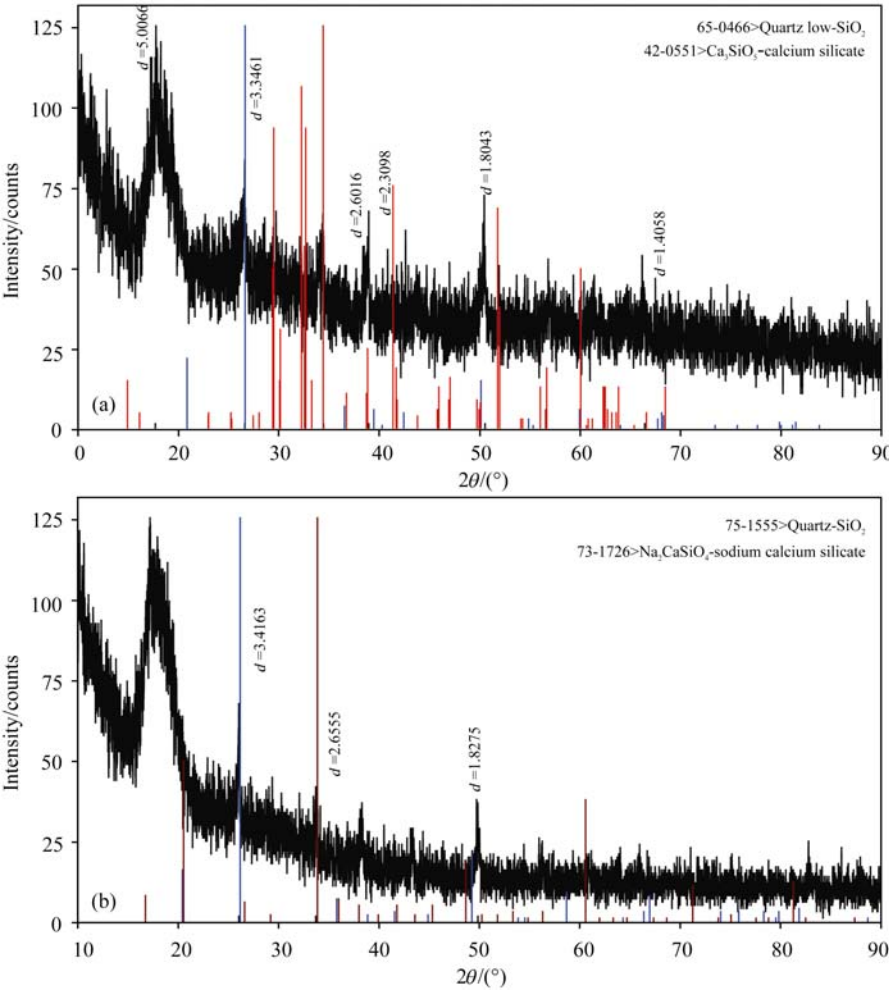


图3 蜻蜓眼珠的深蓝色珠眼 X 射线衍射图

(a) HNZZ-03 蓝色珠眼 X 射线衍射图, 其中蓝色为 α -石英(α -Quartz, SiO_2); 红色为硅酸钙(Calcium Silicate, $\text{Ca}_3(\text{SiO}_5)$);
(b) HNZZ-05b 蓝色珠眼 X 射线衍射图, 其中蓝色为石英(Quartz, SiO_2); 红色为硅酸钠钙(Sodium Calcium Silicate, $\text{Na}_2\text{Ca}(\text{SiO}_4)$)

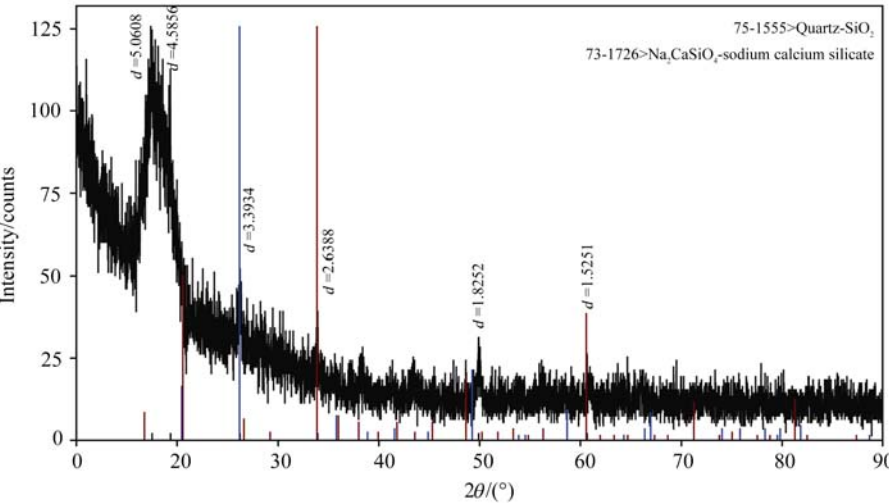


图4 HNZZ-05c 蜻蜓眼珠白色眼底 XRD 图谱

(其中, 蓝色为石英(Quartz, SiO_2); 红色为硅酸钠钙(Sodium Calcium Silicate, $\text{Na}_2\text{Ca}(\text{SiO}_4)$)

表 2 11 个蜻蜓眼样品不同部位的化学成分百分含量表(wt%)

样品编号	样品部位 及颜色	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	SO ₃	Cl	K ₂ O	CaO	TiO ₂	MnO	Fe ₂ O ₃	CoO	NiO	CuO	ZnO	PbO	BaO	I	Hg
HNZZ-01	基体:蓝色	9.53	0.19	3.4	72.8	0.31	0.45	0.61	2.15	8.54	0.04	0.03	0.58	0.03	0.00	1.21	0.03	0.00	0.0	0.00	0.00
	珠眼: 蓝色	9.91	0.97	3.5	70.5	0.22	0.56	0.68	1.17	8.62	0.11	0.04	2.86	0.25	0.00	0.48	0.04	0.00	0.0	0.00	0.00
	白底赭石 色眼圈	7.37	1.17	3.8	75.0	0.23	0.67	0.83	1.01	8.73	0.11	0.04	0.76	0.04	0.00	0.13	0.04	0.00	0.0	0.00	0.00
HNZZ-02	基体: 蓝色	10.4	0.56	3.9	72.5	0.11	0.60	0.67	1.62	7.87	0.08	0.00	0.62	0.00	0.00	0.84	0.06	0.00	0.0	0.00	0.00
	珠眼:蓝	7.54	0.42	4.0	71.2	0.29	0.85	0.81	1.12	8.78	0.07	0.05	4.00	0.16	0.00	0.53	0.11	0.00	0.0	0.00	0.00
	珠眼: 蓝色	10.0	0.56	3.4	71.8	0.15	0.50	0.70	0.88	7.89	0.11	0.04	3.15	0.17	0.00	0.50	0.08	0.00	0.0	0.00	0.00
	白底赭石 色眼圈	6.49	0.31	3.5	69.0	0.42	0.93	1.11	0.89	9.85	0.00	0.00	6.08	0.00	0.24	1.16	0.00	0.91	0.0	0.00	0.00
HNZZ-03	基体: 蓝色	8.89	0.35	3.0	76.7	0.69	0.60	0.64	1.06	6.73	0.05	0.00	0.48	0.00	0.00	0.72	0.00	0.00	0.0	0.00	0.00
	珠眼: 蓝色	6.65	0.77	5.7	71.3	0.33	0.54	0.75	1.16	8.21	0.24	0.05	3.27	0.14	0.00	0.72	0.09	0.00	0.0	0.00	0.00
	眼圈: 赭石色	0.73	0.00	3.3	57.5	0.25	0.81	1.19	2.23	26.6	1.27	0.42	3.88	0.55	0.00	0.41	0.00	0.00	0.0	0.00	0.00
	眼底: 白色	6.17	0.33	5.1	67.0	0.54	0.84	0.77	1.05	12.7	0.28	0.09	1.29	0.08	0.00	0.21	0.00	0.00	0.0	3.38	0.00
HNZZ-04	基体: 蓝色	8.87	0.49	3.0	75.8	0.29	0.52	0.59	1.26	7.16	0.07	0.00	0.42	0.00	0.00	1.47	0.00	0.00	0.0	0.00	0.00
	珠眼: 蓝色	7.14	0.15	2.6	72.9	0.00	0.46	0.74	1.34	8.20	0.15	0.00	4.25	0.24	0.00	1.51	0.23	0.00	0.0	0.00	0.00
	白底赭石 色眼圈	6.13	0.00	3.3	70.3	0.78	0.78	0.82	1.19	12.1	0.24	0.15	0.89	0.04	0.00	0.04	0.00	0.00	0.0	2.99	0.00
HNZZ-05	基体: 淡蓝	10.2	0.93	4.5	69.7	0.59	0.25	0.52	1.43	8.63	0.13	0.03	0.88	0.00	0.03	1.83	0.00	0.28	0.0	0.00	0.00
	珠眼: 蓝色	8.03	0.96	3.0	73.3	0.30	0.33	0.88	0.74	8.09	0.07	0.06	3.21	0.28	0.00	0.72	0.05	0.00	0.0	0.00	0.00
	眼底: 白色	4.90	0.33	3.8	68.5	0.45	0.49	0.99	1.43	13.0	0.59	0.10	1.13	0.20	0.10	0.10	0.00	0.00	0.0	3.28	0.00
HNZZ-06	基体: 蓝色	10.3	0.55	2.9	71.9	0.22	0.47	0.62	1.37	8.58	0.08	0.00	0.68	0.00	0.00	2.26	0.00	0.00	0.0	0.00	0.00
	珠眼: 蓝色	10.7	0.63	2.9	70.9	0.80	0.36	0.44	1.51	8.74	0.10	0.04	2.17	0.11	0.00	0.44	0.11	0.00	0.0	0.00	0.00
	眼圈: 赭色	6.59	0.00	2.8	69.7	0.44	0.55	0.72	1.45	13.5	0.24	0.08	0.85	0.05	0.02	0.06	0.03	0.00	0.0	2.68	0.00
	眼底: 白色	7.79	0.00	3.4	69.6	0.73	0.58	0.72	1.31	11.9	0.19	0.07	0.77	0.02	0.00	0.04	0.02	0.00	0.0	2.58	0.00
HNZZ-07	基体: 蓝色	10.6	0.75	3.6	73.1	0.36	0.40	0.57	1.32	7.41	0.07	0.00	0.49	0.00	0.00	1.16	0.03	0.00	0.0	0.00	0.00
	珠眼: 蓝色	9.85	0.38	3.6	72.0	0.21	0.23	0.50	1.69	7.81	0.08	0.00	2.72	0.12	0.00	0.62	0.11	0.00	0.0	0.00	0.00
	眼底: 白色	2.23	0.00	3.0	72.7	0.29	1.11	1.02	1.00	12.6	0.32	0.16	1.36	0.16	0.00	0.00	0.00	0.00	0.0	3.82	0.00
HNZZ-08	基体: 蓝色	5.51	0.69	3.0	77.6	0.41	0.59	0.71	1.21	7.63	0.00	0.00	0.93	0.00	0.00	1.56	0.00	0.00	0.0	0.00	0.00
	珠眼: 蓝色	8.78	0.46	3.3	72.2	0.48	0.35	0.62	1.17	8.06	0.12	0.00	3.27	0.18	0.00	0.87	0.17	0.00	0.0	0.00	0.00
	眼底: 白色	6.54	0.00	3.3	65.4	0.19	1.03	0.99	0.99	14.5	0.55	0.11	1.41	0.10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.0	4.69	0.00
HNZZ-09	基体: 蓝色	4.63	0.84	3.2	78.4	0.13	0.42	0.62	1.49	8.04	0.00	0.00	0.56	0.00	0.00	1.55	0.07	0.00	0.0	0.00	0.00
	珠眼: 蓝色	7.26	0.57	2.9	74.8	0.30	0.65	0.60	0.83	7.66	0.07	0.06	3.14	0.27	0.00	0.86	0.00	0.00	0.0	0.00	0.00
	眼底: 白色	3.98	0.00	3.3	69.9	0.42	0.91	0.91	1.20	12.9	0.30	0.12	1.36	0.06	0.00	0.06	0.00	0.00	0.0	4.27	0.00
HNZZ-10	基体: 蓝色	10.5	0.44	2.9	73.9	0.53	0.36	0.52	0.91	7.58	0.05	0.00	0.54	0.04	0.00	1.67	0.00	0.00	0.0	0.00	0.00
	珠眼: 蓝色	5.46	1.01	3.1	69.0	0.00	0.51	0.81	0.98	7.66	0.00	0.00	6.95	0.52	0.00	3.55	0.25	0.00	0.0	0.00	0.00
	眼底: 白色	5.03	0.00	2.6	66.1	0.00	0.74	0.89	0.93	15.7	0.59	0.15	1.27	0.23	0.00	0.07	0.00	0.00	0.0	5.28	0.00
HNZZ-11	基体: 蓝色	10.5	0.70	2.9	72.9	0.24	0.39	0.71	1.30	8.84	0.09	0.03	0.45	0.03	0.00	0.82	0.00	0.00	0.0	0.00	0.00
	珠眼: 蓝色	10.5	0.73	2.9	72.1	0.40	0.51	0.61	1.05	8.54	0.10	0.00	1.75	0.26	0.00	0.26	0.18	0.00	0.0	0.00	0.00
	眼底: 白色	4.40	0.12	3.2	67.1	0.49	0.53	1.35	1.41	14.0	0.41	0.05	1.17	0.23	0.00	0.09	0.04	0.00	0.0	5.01	0.00

可能性极大.

5 结论

应用质子激发的 X 射线发光和 X 射线衍射技术

对河南淅川县徐家岭墓地出土的 11 颗蜻蜓眼珠进行了综合分析. 这批蜻蜓眼珠的基体主要为玻璃态. 珠眼部分含有少量微小晶粒, 有明显的晶体特征散射

峰, 晶体主要为石英、硅酸钠钙和硅酸钙。蜻蜓眼玻璃珠的主要化学成分属钠钙硅酸盐($\text{Na}_2\text{O}-\text{CaO}-\text{SiO}_2$), 为西方古玻璃的成分。蜻蜓眼玻璃珠的深蓝色珠眼用氧化钴着色(CoO), 这是中国出土文物中迄今为止

发现最早使用钴蓝的例子。古代西亚和埃及早于古代中国使用钴蓝近千年。这些实验结果说明浙川徐家岭出土的战国早期的蜻蜓眼玻璃珠属于西方传入中国中原地区最早的古代玻璃。

参考文献

- 1 干福熹, 承焕生, 李青会. 中国古代玻璃的起源——中国最早的古代玻璃研究. 中国科学 E 辑: 技术科学, 2007, 37(3): 382—391
- 2 干福熹, 李青会, 顾冬红, 等. 新疆拜城和塔城出土的早期玻璃珠的研究. 硅酸盐学报, 2003, 31(7): 663—668
- 3 干福熹. 西方古代玻璃的技术发展. 干福熹, 等著. 中国古代玻璃技术的发展. 第四章. 上海: 上海科学技术出版社, 2005. 38—52
- 4 湖北省博物馆, 编. 曾侯乙墓. 北京: 文物出版社, 1989. 658
- 5 张福康, 程朱海, 张志刚. 中国古玻璃的研究. 硅酸盐学报, 1983, 11(1): 70—71
- 6 李青会, 李飞, 干福熹. 中国出土的一批战国古玻璃样品化学成分的检测. 文物保护与考古科学, 2006, 18(2): 8—13
- 7 河南省文物考古所, 南阳市文物考古研究所, 淅川县博物馆. 淅川和尚岭与徐家岭楚墓. 郑州: 郑州大学出版社, 2004. 1—2
- 8 承焕生, 张斌, 朱丹, 等. 外束质子激发 X 荧光分析在文物研究与考古中的应用. 干福熹, 主编. 丝绸之路上的古代玻璃研究. 上海: 复旦大学出版社, 2007. 91—95
- 9 干福熹. 中国古代玻璃的起源和发展. 自然杂志, 2006, 28(8): 187—193
- 10 伏修峰, 干福熹. 中国古代釉砂和玻砂. 硅酸盐学报, 2006, 34(4): 427—431
- 11 Brill R H. Chemical Analyses of Early Glasses. New York: The Corning Museum of Glass, 1999. 29—55
- 12 Brill R H. Ancient glass. Sci Am, 1963, 209: 120—131
- 13 干福熹, 等著. 中国古代玻璃技术的发展. 附录二. 上海: 上海科学技术出版社, 2005. 292—295