

新时代文物保护修复技术及应用丛书

# 文物科技分析

高守雷 王恩元 等 编著

前沿分析

实用案例 彩图展示

视频讲解

简明扼要 通俗易懂

上海科学技术出版社

新时代文物保护修复技术及应用丛书

# 文物科技分析

高守雷 王恩元 等 编著

## 内 容 提 要

文物科技分析作为文物保护修复工作中的一个环节，对制订科学的保护修复方案具有重要指导作用。本书既是文物科技分析领域的读本，也可作为文物保护修复技术技能人才培养的教材。

全书分为11章，内容包括化学成分分析、物相结构分析、显微形貌分析、文物成像技术、文物年代分析、产地来源分析、分离分析技术、理化性能分析、数据分析方法、图像分析方法、谱图分析方法等。各章重点介绍分析原理、仪器设备、研究案例，使读者可直接了解各类设备的应用范围和特点，便于快速找到解决某类问题的方法；通过具体案例呈现各类数据、图像的详细处理和分析过程，便于读者学习使用各类分析工具解决实际问题。读者还可扫描封底二维码看视频，了解多种检测仪器设备操作。

本书可供文博行业科研人员与保护修复技术人员参考，亦可供高等院校文物修复与保护等专业师生使用。

### 图书在版编目(CIP)数据

文物科技分析 / 高守雷等编著. -- 上海 : 上海科学技术出版社, 2024. 4

(新时代文物保护修复技术及应用丛书)

ISBN 978-7-5478-6534-7

I. ①文… II. ①高… III. ①文物保护—科学技术—中国 IV. ①K87

中国国家版本馆CIP数据核字(2024)第040570号

---

### 文物科技分析

高守雷 王恩元 等 编著

上海世纪出版(集团)有限公司 出版、发行  
上海科学技术出版社

(上海市闵行区号景路159弄A座9F-10F)

邮政编码201101 www.sstp.cn

上海光扬印务有限公司印刷

开本 787×1092 1/16 印张 17

字数 370千字

2024年4月第1版 2024年4月第1次印刷

ISBN 978-7-5478-6534-7 / K·56

定价: 98.00元

本书如有缺页、错装或坏损等严重质量问题，请向印刷厂联系调换

近年来，随着新科技、新材料、新方法被不断引入文物保护修复行业，文物保护修复的理念和方法均发生了重要变化。文物保护修复技术由传统手工操作向手工操作与新科技、新材料相结合的综合技术转化，文物保护修复行业的主力军将是会分析、懂方案、能修复的高层次技术技能人才。

2022年，教育部发布新版《职业教育专业简介》，将“具有规范操作常用科学仪器设备开展文物样品检测分析和参与解读相关数据信息的能力”作为文物修复与保护高职专科专业的主要专业能力要求之一，将“具有规范操作常用科学仪器设备开展文物样品检测分析和基本的数据解读能力”作为文物修复与保护高职本科专业的专业能力要求之一，并明确将文物检测分析、文物科技分析分别列入文物修复与保护高职本科和专科专业的专业核心课程。由于以前鲜有高职院校开设这类课程，所以尚无针对文物修复与保护高职本科和专科专业学生使用的文物科技分析教材。此外，考古和文物领域的一线工作者也迫切需要一本对口的著作读本，用以学习文物科技分析知识、提升解决实际问题的能力。

文物科技分析的内容涉及数学、物理学、化学、生物学、大气科学、地质学、材料科学与工程等多个学科。虽然这些学科里的分析内容已经非常成熟，如化学组成分析的方法有原子吸收光谱、原子发射光谱、X射线荧光光谱、中子活化分析等，这其中的每一类方法都有专著出版，但是对文物工作者来说，这些专著多属跨学科性质，理论性强、内容繁多、学习难度较大。此外，材料和化学领域的著作内容编排通常是按照光谱学、色谱学、质谱学等来分类，对于文物保护修复领域来说，此编排缺乏针对性。因此，目前亟需一本通俗易懂、简明扼要、重在针对性地解决实际问题的文物科技分析著作。

这本《文物科技分析》列入“新时代文物保护修复技术及应用丛书”，较好地解决了上述问题，填补了相关领域的空白。通过学习本书，学习者能直接了解文物科技检测分析中各类方法的基本原理、仪器设备、应用领域和实际案例，掌握数据分析处理的前沿方法，从而具备解决实际问题的专业能力。该书在内容上注重知识传授、价值观塑造和能力培养

的多元统一，呈现了中国文物科技工作者借助各种现代科技分析手段在文物保护修复工作中取得的丰硕成果，让学习者感知到中国古代文明的辉煌成就，以此提升民族自豪感、坚定文化自信。在编著过程中，上海城建职业学院与上海博物馆进行深度合作，并邀请文博行业相关领域的专家共同讨论确定编写大纲、体系结构和具体内容，确保体现文物科技分析领域的发展前沿。

本书可供高等院校、科研机构、企事业单位等从事文物保护修复工作的技术人员作为工作参考用书，或者技术培训教材。



中国文化遗产研究院研究员 詹长法

为满足文物保护修复行业发展、人才培养和一线工作人员的实际需要，上海城建职业学院文物修复与保护专业的高守雷、司红伟、倪皓、王敏，以及上海博物馆的王恩元，通过对自己多年实践经验的总结、归纳和提炼，并参考国内外的相关文献，共同完成了这本《文物科技分析》。编著本书的最主要目的，是希望在考古、文物工作中，当遇到与文物科技分析有关的内容时，相关人员通过本书能直接找到科学的解决方法。本书读者对象主要为考古、文物工作一线的技师、修复师等专业人员，以及高等院校文物修复与保护专业的本、专科学生。

本书内容共 11 章，前 8 章主要包括化学成分分析、物相结构分析、显微形貌分析、文物成像技术、文物年代分析、产地来源分析、分离分析技术、理化性能分析，重点介绍分析原理、仪器设备、研究案例等，便于文物工作者快速找到解决某类问题的方法，直接了解各类设备的应用范围和特点，并且将同类型设备的各自优缺点做了比较，有助于检测人员在实际工作中进行设备选用。后 3 章为文物检测数据、图像和谱图处理的工具和分析方法的介绍，主要通过具体案例呈现各类数据、图像的详细处理和分析过程，便于文物工作者学习使用各类分析工具解决实际问题。全书内容紧紧围绕文物保护修复领域的科技分析工作，注重科学性、先进性和实用性。在内容的选取和编排上，本书有如下特点：

(1) 从各个领域、多本专著、各类方法中，选取与文物科技分析相关的内容，并从便于应用的角度，按照分析类别进行归类。

(2) 从每一个分析类别的多种分析方法中，选取符合文物特点、易于在文物领域应用的方法进行介绍，仪器设备也都选择了近年来使用较多的型号。

(3) 对每一类分析方法，选取近年来最新研究的案例进行阐释，重点讲解使用该方法、该设备能够解决哪些实际问题。

本书具体编写分工如下：第 1 章、第 2 章、第 5~第 7 章由高守雷编写，第 3 章由司红伟编写，第 4 章由倪皓编写，第 8 章由王敏编写，第 9~第 11 章由王恩元编写。在编写

过程中，每位作者都精益求精，反复讨论，几易其稿。在此要特别感谢中国文化遗产研究院詹长法研究员，上海博物馆熊樱菲研究馆员、丁忠明研究馆员，各位专家为本书内容的完善提出了很多宝贵意见。

全书由高守雷统稿。由于作者水平所限，难免以偏概全，存在各种不足之处，敬请读者批评指正。

编者

<hr/>	
第 1 章	
化学成分分析	
1.1	原子发射光谱法 002
1.2	X 射线荧光光谱法 010
1.3	中子活化分析法 018
<hr/>	
第 2 章	
物相结构分析	
2.1	X 射线衍射分析 026
2.2	红外光谱分析 033
2.3	拉曼光谱分析 040
<hr/>	
第 3 章	
显微形貌分析	
3.1	体视显微镜 050
3.2	偏光显微镜 052
3.3	金相显微镜 055
3.4	超景深显微镜 059
3.5	电子显微镜 063
<hr/>	
第 4 章	
文物成像技术	
4.1	X 射线成像 071
4.2	X 射线层析成像 078
4.3	多光谱成像 083
4.4	高光谱成像 087
<hr/>	
第 5 章	
文物年代分析	
5.1	碳十四测年法 097
5.2	热释光测年法 105
5.3	光释光测年法 116

<hr/>	
第 6 章	
产地来源分析	
6.1	铅同位素分析 124
6.2	碳氮稳定同位素分析 135
6.3	锶同位素分析 142
<hr/>	
第 7 章	
分离分析技术	
7.1	气相色谱法 149
7.2	液相色谱法 157
7.3	离子色谱法 164
<hr/>	
第 8 章	
理化性能分析	
8.1	物理性能分析 173
8.2	化学性质分析 186
8.3	力学性质分析 190
<hr/>	
第 9 章	
数据分析方法	
9.1	定性分析 199
9.2	定量分析 201
9.3	成分数据的处理 210
9.4	统计软件的使用 215
<hr/>	
第 10 章	
图像分析方法	
10.1	岩相结构图像分析 227
10.2	层析成像图像分析 237
10.3	电镜图像分析 241
<hr/>	
第 11 章	
谱图分析方法	
11.1	衍射谱图分析 248
11.2	拉曼谱图分析 253
11.3	红外谱图分析 258
<hr/>	
本书配套数字资源使用说明	264

## 第 1 章

# 化学成分分析

目前，对文物本体和修复材料的化学成分分析已经成为保护修复工作的前提，分析方法也成为从事文物保护的工作人员所必备的基础。原子光谱分析技术和核分析技术均是有效的元素分析手段，广泛应用于化学成分分析的各个领域。原子光谱是由原子中的电子在能量变化时所发射或吸收的一系列波长的光组成的光谱，由于人类社会飞速进步和工农业生产的高速发展，促进了原子光谱分析技术的不断创新。根据原子激发方式及光谱的检测方法不同，可将原子光谱法分为原子发射光谱法、原子吸收光谱法、原子荧光光谱法以及 X 射线荧光光谱法等。从功能上来说，核分析技术可分为元素分析和物质结构分析两大类，其中元素分析技术主要有中子活化分析、带电粒子活化分析、X 射线荧光分析、质谱分析等。本章重点介绍在文物科技分析领域应用较多的原子发射光谱法、X 射线荧光光谱法和中子活化分析法。

## 1.1 原子发射光谱法

原子发射光谱 (atomic emission spectroscopy, AES) 分析, 是基于被分析物质在激发光源作用下所发射特征光谱的波长和强度来进行元素定性定量分析的方法。随着各种新型激发光源和电子信息技术的应用, 该方法能够分析 70 多种无机元素。根据激发光源的不同, 原子发射光谱分析法可分为火焰发射光谱分析法、火花放电发射光谱分析法、电弧发射光谱分析法、等离子体原子发射光谱分析法、辉光放电光谱分析法、激光诱导发射光谱分析法等。20 世纪 50 年代, 原子发射光谱就开始在中国推广和普及, 在地质、冶金和机械等领域得到了广泛的应用。70 年代, 迅速兴起的电感耦合等离子体原子发射光谱 (inductively coupled plasma atomic emission spectroscopy, ICP-AES) 法, 既保留了原子发射光谱多元素同时分析的特点, 又具有溶液进样的灵活性与稳定性, 使原子发射光谱分析进入了一个崭新的发展阶段, 其应用领域扩大到各行各业。

### 1.1.1 基本原理

在正常情况下, 物质原子的能级处于能量最低的基态。当原子受到外界能量 (如热能、电能等) 作用时, 原子中的外层电子会从基态跃迁到激发态, 其中能量最低的激发态称为第一激发态。将电子从基态激发至激发态所需要的能量称为激发电位。处于激发态能级的原子是不稳定的, 其外层电子会在极短时间内跃迁至较低能级的激发态或基态而释放出多余的能量, 若这种能量是以辐射一定频率的电磁波形式释放的, 就产生了原子发射光谱。由于原子的各个能级是量子化的, 电子的跃迁是不连续的, 因此原子发射光谱为线状光谱。

当外加的能量足够大时, 原子会发生电离形成离子, 原子电离所需的最小能量称为电离电位。离子中的外层电子也能被激发, 其所需的能量即为相应离子的激发电位。原子失去一个电子时, 称为一次电离, 再失去一个电子时, 称为二次电离, 以此类推。由被激发离子形成的发射光谱, 称为离子线。在原子谱线表中, 每条谱线元素符号后以罗马数字 I、II、III 依次表示中性原子、一次离子、二次离子所发射的谱线。如 Na I 589.0 nm 是钠原子线, Mg II 280.3 nm 是镁的一次电离的离子线。由于原子和离子具有不同的能级, 因而原子发射的光谱和离子发射的光谱是不同的。

由于原子的能级很多，原子在被激发后，其外层电子可有不同的跃迁方式，但这些跃迁均遵循一定的规则（即“光谱选律”），因此对特定元素的原子可产生一系列不同波长的特征光谱线，这些谱线按一定的顺序排列，并保持一定的强度比例。原子从高能态直接跃迁至基态产生的辐射线称作共振发射线（简称“共振线”）；从最低激发态跃迁到基态所发射的谱线称为第一共振线。第一共振线的激发电位最小，最容易被激发，也是该元素的最强谱线（也称“最灵敏线”）。

不同元素的原子结构不同，原子的能级状态不同，发射谱线的波长不同，每种元素都有其特征谱线，这是光谱定性分析的依据。试样中待测元素含量越高，对应的谱线强度就越强，故谱线强度是光谱定量分析的基础。影响谱线强度的因素主要有原子的激发电位、跃迁概率、激发温度和基态原子数等。激发电位越低，谱线强度越强。某元素激发电位最低的共振线通常是该元素所有谱线中最强的谱线。不同元素的不同谱线各有其最佳激发温度，在此温度下谱线的强度最大。基态原子数与试样中该元素的含量成正比，所以谱线的强度与待测元素的含量成正比。

## 1.1.2 仪器设备

原子发射光谱仪主要由光源、进样系统、光学系统、检测系统和计算机系统等组成。图 1-1 为电感耦合等离子体原子发射光谱仪外观形貌，其结构如图 1-2 所示。

### 1.1.2.1 光源

光源的主要作用是为试样的蒸发、解离、原子化和激发提供所需要的能量，使其发射光谱。光源特性对光谱分析的检出限、精密度和准确度都有很大的影响。原子发射光谱仪的光源分为等离子体和非等离子体两大类，前者常见的是电感耦合等离子体光源，是现代原子发射光谱仪的首选光源。非等离子体光源包括火焰、直流电弧、交流电弧、电火花和激光等。电感耦合等离子体光源是指高频电能通过电感（感应线圈）耦合到等离子体所得



图 1-1 电感耦合等离子体原子发射光谱仪 (Agilent 5800)

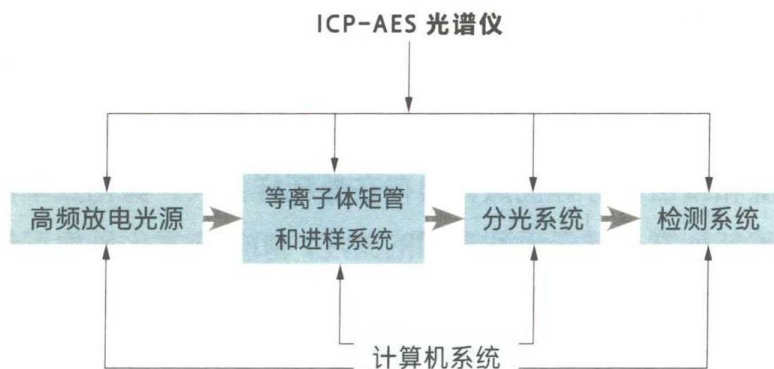


图 1-2 电感耦合等离子体原子发射光谱仪结构示意图

到的外观上类似火焰的高频放电光源，主要由高频发生器和等离子体炬管组成。

### 1) 高频发生器

在电感耦合等离子体原子发射光谱分析中，高频发生器功率输出的稳定性直接影响分析的检出限与分析精度。这是发生器的重要指标，它的波动将增大测量的误差。一般要求输出功率波动不大于 0.1%。常用的高频发生器有两种类型：自激式高频发生器和它激式高频发生器。它们都能满足提供电感耦合等离子体火焰的能源及光谱分析的要求。

### 2) 等离子体炬管

等离子体炬管由三层同心石英管组成。外管通冷却气氩气，使等离子体离开外层石英管内壁，以避免它烧毁石英管。采用切向进气，其目的是利用离心作用在炬管中心产生低气压通道，以利于进样。中层石英管出口做成喇叭形，通入氩气维持等离子体的作用，有时也可以不通氩气。内层石英管内径为 1~2 mm，载气氩气携带试样气溶胶由内管注入等离子体内。试样气溶胶由气动雾化器或超声雾化器产生。用氩气作工作气的优点是，氩气为单原子惰性气体，既不会与试样组分形成难解离的稳定化合物，也不会像分子那样因解离而消耗能量，有良好的激发性能，本身的光谱简单。

电感耦合等离子体光源具有十分突出的优点：光源温度高，样品原子化完全且易被激发，惰性气氛中激发产生的光谱背景低且波动小，因此其检出限低。光源基体效应小，可获得低干扰水平和高准确度的分析结果。光源的稳定性好，相对标准偏差一般小于 1%。具有“趋肤效应”，外层电流密度大温度高，中心轴线密度小温度低，样品从中心通道通过并保持等离子体的稳定性，有利于样品充分蒸发、原子化和激发，发射出特征谱线，也可有效消除自吸和自蚀现象，因此分析校正曲线的线性范围宽。其适用于高、低、微含量金属和难激发元素的分析测定，同一份试液可用于从常量至痕量元素的分析，而且容易实现多元素同时或顺序式测定。不足之处是测定非金属元素的灵敏度低，仪器昂贵，操作费用高。

#### 1.1.2.2 进样系统

原子发射光谱仪有固体、液体和气体形式的进样系统。电感耦合等离子体原子发射光谱仪的进样系统有多种形式，常用的主要有溶液雾化、悬浮体雾化、氢化物发生、激光剥蚀、电热蒸发等。

#### 1) 溶液雾化

溶液雾化 (solution atomization, SA) 进样虽然具有装置简单、操作方便、价格低廉和精密度好等优点，但存在着耗样量大、雾化效率低、雾化器易堵塞等问题。因此，发展新型雾化器已受到人们的关注。如超声雾化是根据超声波振动作用将溶液进行破碎的一种进样技术，其具有雾滴均匀细小、雾化效率高、不易堵塞等优点，已被成功应用于痕量分析。

#### 2) 悬浮体雾化

悬浮体雾化 (slurry nebulization, SN) 进样是将超细固体粉末试样通过适当方法制成悬浮体，或者试样经预消化将待测物浸取到悬浮体液中，然后按溶液进样方式将其引入分

析系统的一种进样方法。悬浮体进样具有制样简便、污染小、适合固体分析以及可采用溶液标准进行校正等优点，已成为用于固体粉末试样分析的进样技术之一。

### 3) 氢化物发生

气体 / 蒸气发生进样是通过不同方式将试样中的待测组分转变为气态形式，并由载气导入分析系统的一种进样方法。迄今为止，氢化物发生 (hydride generation, HG) 仍然是其中研究最多、应用最广的一种气体进样技术。该方法的优点是灵敏度高、检出限低，待测元素以气态形式从基体溶液中分离出来，不仅降低了干扰，还达到了分离富集的目的。氢化物发生技术存在的一个显著缺点就是待测元素的数量有限，一般局限于 Ge、Sn、Pb、As、Sb、Bi、Se、Te、Hg；对于 In 和 Ti 的测定，该方法的灵敏度较低。

### 4) 激光剥蚀

激光剥蚀 (laser ablation, LA) 是将激光聚焦在样品表面，利用激光的高强度能量使样品汽化，然后用载气将其引入分析体系的一种固体进样方法。激光剥蚀进样系统具有耗样量少、检出限较低、能进行微区分析、无需或仅需很少的样品预处理以及可直接分析导体和非导体等优点，在光谱分析领域备受人们的关注。激光技术的不断改进，也促进了激光剥蚀进样技术的发展。

### 5) 电热蒸发

电热蒸发 (electrothermal vaporization, EV) 进样是将微升或毫克级试样沉积在金属或石墨蒸发器中，通过电加热试样，用载气将产生的干气溶胶引入电感耦合等离子体 (ICP) 中进行分析。与常规溶液雾化相比，电热蒸发进样效率大大提高，检出限得到显著的改善；避免了大量溶剂进入 ICP 导致激发能降低；能降低或消除光谱干扰和非光谱干扰；可直接分析固体试样，简化了繁杂的样品预处理过程，避免了待测物污染和损失。该方法在光谱分析界颇受青睐，获得了广泛的应用。

#### 1.1.2.3 光学系统

光学系统主要由光路系统、狭缝和色散元件等组成，其功能是接收待测试样激发出的各种特征辐射光谱并用色散元件分光以获得按波长顺序排列的光谱。现代光谱仪的主要色散元件是光栅。光栅是利用光的衍射效应进行分光的器件，主要有平面光栅、凹面光栅和中阶梯光栅等类型。其中，中阶梯光栅是目前较高水平光谱仪所用的分光系统，配合电感耦合器件 (CCD) 和电荷注入器件 (CID) 检测器可以实现“全谱”多元素“同时”分析。

#### 1.1.2.4 检测系统

原子发射光谱仪中采用的检测器主要有光电倍增管 (PMT) 和固体检测器。固体检测器包括 CCD、CID 等，具有多谱线同时检测能力，借助计算机系统快速处理光谱信息的能力，可极大地提高发射光谱分析的速度。如采用 CCD 检测器设计的全谱直读等离子体原子发射光谱仪，可在 1 min 内完成样品中多达 70 种元素的测定。此外，它的动态响应范围和灵敏度均有可能达到甚至超过光电倍增管，加之其性能稳定、体积小，比光电倍增管更结实耐用。

### 1.1.2.5 计算机系统

计算机系统用于完成程序控制、实时控制、数据处理等工作，由软件和硬件组成，软件主要是仪器控制软件和数据处理软件，硬件主要是计算机。目前各个厂家开发的计算机系统都已经非常完善，对于用户不仅易学易用，而且功能强大，有些具有数理统计的功能，大大提高了工作效率。

### 1.1.3 特点分析

原子发射光谱仪具有可检测元素种类多、检出限低、分析精度高、基体效应低、可多元素同时测定、动态线性范围宽、自吸收效应低等优点，在文物科技分析领域得到了广泛应用。与其他方法相比，电感耦合等离子体原子发射光谱（ICP-AES）法具有以下特点：

#### 1) 测定范围广

据不完全统计，截至 20 世纪 80 年代初 ICP-AES 法就已测定过 70 多种元素，几乎涵盖所有紫外和可见光区的谱线，而且能在不改变分析条件的情况下，同时进行多元素的测定，或有顺序地进行主量、微量及痕量浓度的元素定量分析，金属元素分析与非金属元素分析也可同时进行，可以采用有机溶剂直接进样。这些都是原子吸收光谱仪、原子荧光光度计所达不到的。

#### 2) 检出限低

对大部分元素的检出限为（1~10）ppb（1 ppb，即  $10^{-9}$ ），一些元素在洁净的试样中也可得到低于 ppb 级的检出限，如果通过富集处理，相对灵敏度可以达到  $\text{ng/g}^*$ ，绝对灵敏度可达  $10^{-11} \text{g}^*$ （光灵敏度单位  $\text{g}^*$ ，是指用来衡量光敏元件对于不同波长光的响应能力的指标）。

#### 3) 动态线性范围宽

标准曲线的线性范围可达 4~6 个数量级，可满足同时测定含量相差较大的元素的要求，且可分析浓度为 10%~30% 的溶液。原子吸收光谱仪的动态线性范围一般为 2~3 个数量级，原子荧光光度计的动态线性范围一般为 3~5 个数量级。

#### 4) 检测速度快

检测速度为 2~6 min/ 个样品，直读型的 ICP 可达到 2 min/ 个样品，每个样品可检测其中的几种至几十种元素，分析速度快，而原子吸收光谱仪属单元素检测技术，每次只能检测一种元素，需 3~4 min/ 次。

#### 5) 仪器操作与维护简便

技术比较成熟，操作简便、容易，对实验室环境条件及人员的要求不高，采用惰性气体氦气作为载气，非常安全，且检测结果稳定，一般情况下其相对标准偏差为 10%；当分析物浓度超过 100 倍检出限时，相对标准偏差为 1%。

需要指出的是，电感耦合等离子体原子发射光谱仪在进行检测时会对样品表面产生一定的破坏，即留下测试痕迹，因此在珍贵文物的测试分析中应用相对较少。

### ■ 古陶瓷胎釉成分分析

崔剑锋等用激光剥蚀电感耦合等离子体原子发射光谱(LA-ICP-AES)法对四川茂县营盘山遗址和波西遗址的彩陶、素面陶残片样品进行了化学成分分析。选取陶片样品37片,其中营盘山29片、波西8片,共分析了Ba、Ce、Co、Cr、Cu、La、Mn、Nd、Ni、Pb、Sc、Sr、V、Y、Zn、Zr、Na、Mg、Ca、Fe、Al、P、K、Ti等24种元素。研究表明,营盘山彩陶与营盘山素面陶、波西素面陶的化学成分完全不同(图1-3)。

两个遗址素面陶陶片的数据点混杂在一起,说明化学成分近似。根据对各元素平均含量的统计分析发现,营盘山彩陶与营盘山素面陶、波西素面陶的Ba、Co、Nd、Ni、Pb、Sr、P、Zr等微量元素以及Na、Mg、Ca、Fe、K、Ti等主量元素的含量都存在统计学意义上的显著差异,而两个遗址素面陶的元素统计差别不明显。经过分析,认为彩陶的化学成分更接近黄土高原马家窑文化腹地出土的彩陶器物化学成分,而素面陶的化学特征则显示出本地黏土特征,说明素面陶都为本地自产。

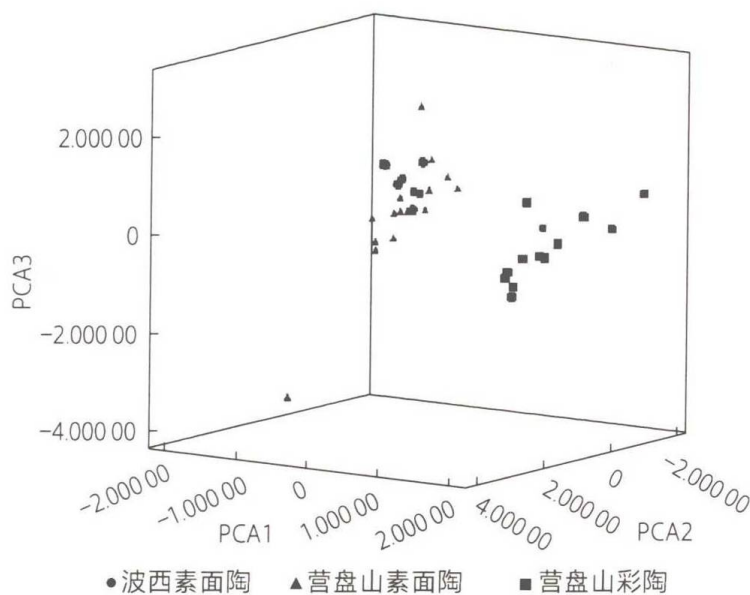


图 1-3 陶片化学成分的主成分三维散点图

### ■ 古代玻璃成分分析

温睿等运用激光剥蚀电感耦合等离子体原子发射光谱(LA-ICP-AES)法对新疆宋元时期也木勒遗址出土的9件玻璃样品进行了成分分析,每个样品测试2~4个不同的部位,最后对检测的各元素氧化物进行归一化处理,共分析了20种元素氧化物的百分比含量。结果显示(表1-1),样品间化学成分相近,变化范围不大,均不含PbO, BaO含量低于0.1%,属于钠钙玻璃。9个样品的K<sub>2</sub>O、MgO含量均超过1.5%,6件样品出现K<sub>2</sub>O含量接近或大于5%的现象,且含有P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>,两方面可佐证这批玻璃的助熔剂含有植物性碱,但是K<sub>2</sub>O的含量高,Na<sub>2</sub>O/K<sub>2</sub>O比例较低、为1.57~3.01,所以样品可能利用了含有植物灰的混合碱作为助熔剂。为了消除杂质元素引起的颜色,古代在玻璃生产过程中会有意添加脱色剂和澄清剂MnO<sub>2</sub>。样品中MnO<sub>2</sub>含量只有0.03%~0.35%,应该是原料中的杂质引入,而非有意添加,其他过渡金属元素含量低、化学成分相近,说明它们应该是一个区域生产的初次加工而成的玻璃品。由于样品中CuO含量低于0.2%,Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>的含量为0.40%~1.30%,这或许是文物样品呈现不同程度绿色的主要原因。经分析,认为检测的玻璃样品与中亚地区、中国新疆当地生产的玻璃十分相似。

### ■ 绿松石成分分析

先怡衡等采用激光剥蚀电感耦合等离子体原子发射光谱(LA-ICP-AES)法对新疆加依、西沟两处墓地出土的17枚绿松石样品(加依9枚、西沟8枚)进行了化学成分分析,得到SiO<sub>2</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、

表 1-1 也木勒遗址玻璃样品的化学组成

单位: %

样品编号	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	MnO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	TiO <sub>2</sub>	Sb <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CuO	BaO	SnO <sub>2</sub>	SrO	ZnO	B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>
YML-G-1	67.79	6.35	0.54	4.18	5.44	9.05	5.77	0.05	0.43	0.19	0.01	0.01	0.03	0.02	0.03	0.02	0.04	0.02
YML-G-2	70.43	2.26	0.40	4.89	6.96	10.69	3.55	0.05	0.45	0.09	0.01	0.01	0.05	0.03	0.05	0	0.05	0.02
YML-G-3	76.80	3.54	0.64	3.21	4.15	7.23	3.83	0.06	0.25	0.10	0.01	0.01	0.03	0.06	0.03	0.01	0.04	0.03
YML-G-4	65.23	5.26	0.90	5.03	6.26	10.70	5.81	0.03	0.38	0.18	0	0	0.07	0.01	0.04	0	0.04	0.01
YML-G-5	72.67	4.45	0.67	3.83	4.88	8.03	4.81	0.04	0.21	0.13	0.02	0.01	0.04	0.06	0.04	0.01	0.04	0.03
YML-G-6	66.34	4.70	0.46	4.09	6.60	11.41	5.52	0.05	0.50	0.12	0.01	0	0.04	0.01	0.05	0.01	0.04	0.01
YML-G-7	63.35	6.35	0.63	4.29	4.73	12.65	6.99	0.05	0.56	0.21	0	0	0.04	0.02	0.03	0.01	0.05	0.01
YML-G-8	67.29	3.90	0.53	4.44	5.82	10.80	6.30	0.05	0.60	0.18	0	0.01	0.03	0.02	0.03	0.01	0.03	0.01
YML-G-9	70.39	7.07	1.30	1.80	2.64	10.81	4.29	0.35	0.21	0.25	0.27	0.18	0.03	0.01	0.05	0.01	0.05	0.01