

秦始皇帝陵博物院

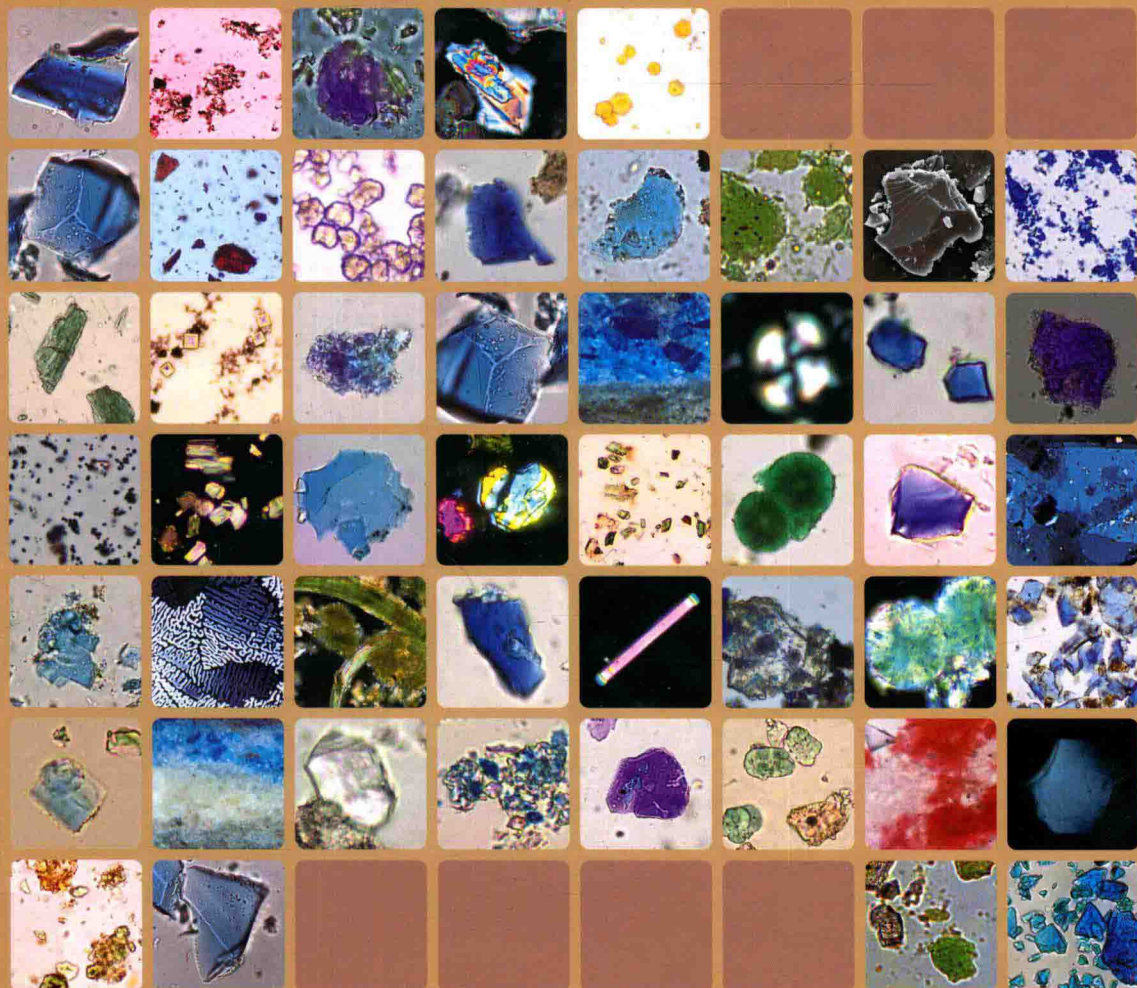
陶质彩绘文物保护国家文物局重点科研基地

Chinese Historical Pigments in Polarized Light Microscope

遗彩寻微

中国古代颜料偏光显微分析研究

夏寅 等 著



科学出版社

秦始皇帝陵博物院

陶质彩绘文物保护国家文物局重点科研基地

遗彩寻微

中国古代颜料偏光显微分析研究

夏寅 等著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书在提供充分的颜料背景信息的同时,系统介绍了偏光显微法鉴定和研究矿物颜料的方法。同时以偏光显微分析法为主要手段,对几种典型颜料,如中国蓝和紫、钴玻璃蓝、氯铜矿等进行了深入研究,并探讨了我国不同胎体彩绘的工艺发展情况。

本书适合从事文物材质分析研究,特别是古代彩绘颜料保护和分析研究的专家、学者及有关院校的师生阅读与参考。

图书在版编目(CIP)数据

遗彩寻微:中国古代颜料偏光显微分析研究/夏寅等著. —北京:科学出版社, 2017.5

ISBN 978-7-03-052717-2

I. 遗… II. ①夏… III. ①偏光显微镜-应用-古器物-颜料-分析-中国 IV. ①K876.04

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第099593号

责任编辑:樊 鑫/责任校对:郭瑞芝

责任印制:肖 兴/装帧设计:金舵手世纪

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京利丰雅高长城印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2017年5月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2017年5月第一次印刷 印张:14 1/2

字数:320 000

定价:220.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

本书出版得到国家文物局重点科研
基地课题（20080216）资助

Key Scientific Research Base of Ancient Polychrome Pottery
Conservation (Emperor Qinshihuang's Mausoleum Site Museum), SACH

Chinese Historical Pigments in Polarized Light Microscope

Xia Yin *et al*

 Science Press

中国历史文化源远流长，遗存的大量地上、地下及可移动和不可移动文物是五千年中华文明的实物见证，我国现存石窟寺、古建筑、古墓葬中大量精美的壁画、彩绘文物是其中重要的组成部分，也是最具艺术价值的部分。这些壁画和彩绘文物不论是用矿物颜料、有机染料还是人工合成颜料绘制，都反映了当时社会的生产力发展水平，具有很高的历史、艺术和科学价值。面对祖先留下来的五彩斑斓的壁画、彩绘文物及赋予它们生命力的颜色，我们急切地想知道这些颜色是怎么来的，它们是什么，想表达什么？要回答这些问题，除了要与当时的时代背景、现实生活结合起来分析研究之外，更重要的还需要对其进行科学认知。

还记得 20 世纪 70 年代末 80 年代初，我所在的单位敦煌研究院曾与化工部兰州涂料研究所合作对敦煌莫高窟十一个朝代的部分壁画颜料采用 X 射线剖析，当时所使用的仪器为 X 射线衍射仪和 X 射线荧光分析仪，那次研究基本明确了常见颜色颜料的矿物组成。20 世纪末，国家文物局立项，由故宫博物院、中国文化遗产研究院（当时的中国文物研究所）、四川省文物考古研究所和敦煌研究院联合承担的重点科研课题“中国古代壁画和彩塑及其保护研究”，对丝绸之路沿线甘肃、新疆段重点石窟的壁画彩塑颜料进行了系统的分析，当时所使用的仪器除了 X 射线衍射仪和 X 射线荧光分析仪外，还使用了偏光显微镜和傅里叶红外分光光度计，基本厘清了颜料的使用规律和时代脉络。随着科学技术的日新月异，“十五”以来，国家启动了“中华文明探源工程”，并列为了科技攻关项目，国际合作也越来越深入，较多的仪器用于古代颜料的分析和解读，尤其是大量无损检测仪器的研发与应用，大大丰富了颜料的认知手段。随着分析方法的不断成熟，在众多的分析仪器当中，显微镜无疑是佼佼者，可以进行颜料颗粒的薄片分析、颜料层的切片分析，除了表征颜料的矿物特征外，还可进行绘画工艺、技法的探究，成为了比较科学、可靠的分析手段。

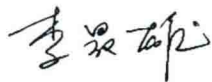
伴随着考古科学的不断深入，越来越多的地下彩绘文物经发掘后出现在

人们的视野中。这对从事彩绘文物保护的工作人员提出了更高的要求：一方面要采用科学的预防性手段保护好出土文物，避免其因环境的变化而出现问题；另一方面要对文物及其承载的信息进行科学解读和价值挖掘，使其更好地得到保护并流传给后人。秦始皇帝陵博物院的夏寅研究员及其团队便是长期从事这一工作的代表，他们编写的《遗彩寻微——中国古代颜料偏光显微分析研究》一书，系统介绍了偏光显微法鉴定和研究矿物颜料的方法，对我国先秦至两汉、魏晋南北朝到清代中期、晚期的彩绘颜料，以偏光显微镜分析方法为主要手段，研究了我国不同时期有代表性的彩绘颜料的使用及制作工艺，探讨了我国不同胎体彩绘的工艺发展情况，包括陶质、泥塑、石刻佛像、殿堂壁画、墓葬壁画、石窟壁画、古建油饰彩画等类型。尤其对中国蓝、中国紫及个别特征颜料的研究是该书的一大亮点，体现出了偏光显微分析的独特优势。

作为年轻一代的文物工作者，夏寅研究员谦虚好学，具备扎实的基本功和良好的科研素养，毕业以来一直在博物馆从事彩绘及相关文物的分析和科技保护等科学研究工作，在“专注、稳定、深入、扩展”四步自身科学研究发展规划的指导下，长期坚持不懈，苦练基本功，先后主持了由国家文物局立项的“中国蓝和中国紫颜料研究”、“拉曼光谱在陶质彩绘文物保护研究中的应用及方法学研究”等科研课题，取得了可喜的成果。该书为作者及其团队十多年彩绘文物颜料分析研究工作的成果，无疑是一本科学严谨且具有较高学术价值的著作。

看到以夏寅研究员为代表的年轻一辈对文物保护事业如此专注和执着，欣慰之余，希望年轻一代能在自己的工作岗位上继续踏踏实实，不断探索，取得更大的成绩！

在该书出版之际，谨以此为序，并致祝贺。



2016年11月于兰州

对于古代颜料的研究，在西方已经建立起较为全面的体系构架。而我国对于古代颜料研究的著作，最初是由从事绘画艺术的学者，为研究颜料在我国传统绘画技法中的应用而撰写的，并未形成颜料使用的历史谱系。我国现存的彩绘文物非常多，而且随着考古工作的进一步的开展，彩绘文物也在不断出土，这就给我们提供了颜料分析研究的课题。

光学显微镜在文物颜料的鉴定研究方面具有经济，快捷，准确，取样量小，信息量大等明显的优势，并且通过光学显微镜大量的分析，能够总结出每个时期颜料的应用及彩绘的工艺特点等。在西方发达国家，光学显微镜特别是偏光显微镜的使用甚至作为文物保护修复专业研究生的基本功和基础性学习课程，而在我国其应用并未得到足够的重视。

秦始皇帝陵博物院的显微分析实验室，采用的光学显微镜包括体视显微镜（Stereomicroscope）、反射偏光显微镜（Reflect light microscope）和透射偏光显微镜（Polarized light microscope），对全国多处的考古工地和文博单位的彩绘文物颜料样品进行了分析和研究，样品时间跨度从新石器时代晚期（Late Neolithic Age）到近现代。通过研究，它们大致呈现出了中国古代颜料应用的历史轮廓：具体分成三部分论述，先秦至两汉、魏晋南北朝到清代中期、清代晚期。

先秦至两汉时期，是以中国蓝（Chinese Blue）中国紫（Chinese Purple）颜料为代表，表现出当时活跃的科技活动，它们的使用从西周一直延续到两汉，尤以战国晚期与两汉时期为盛。根据目前的研究资料，其使用地域包括陕西、河南、甘肃、江苏、河北及山东地区。在甘肃东南部和陕西西北部交界的早期秦人活动区，分析出的含有中国蓝、中国紫成分的器物多为料器；陕西关中西安咸阳地区、河南洛阳地区是中国蓝、中国紫颜料较为集中的发现地，另外还有陕西北部、山东中部和江苏北部徐州地区等。这些地区含有中国蓝紫的文物多为彩绘陶器和壁画。

秦代骨白（Bone White）的应用也是一个有趣的例子，就目前资料，骨

白颜料只在秦代的皇家陵园和宫殿有应用，如秦咸阳宫遗址壁画、阿房宫遗址壁画以及包括秦俑坑的秦陵陪葬坑。

汉代之后的魏晋南北朝一直到清代早中期，是中国颜料应用的平和期。这一时期构建起中国传统颜料的体系，未有太大的变化。其中三种颜料值得讨论：青金石、钴玻璃蓝颜料和人造氯铜矿。

东汉及北魏时，青金石（Lapis Lazuli）颜料由阿富汗传入中国，新疆的克孜尔石窟和甘肃的莫高窟等地，有大量的青金石应用。中原应用例子不太多，如近几年发现的大同沙岭北魏壁画墓及陕西潼关税村隋墓，有趣的是，同一个墓葬出土的彩陶俑和装饰漆盒云母片上的青金石颜料质量却有不同，从显微镜下观察，云母片上青金石是非常均一的亮蓝色，而彩陶俑上青金石是较为均一的浅蓝色。至少说明，青金石非常昂贵，人们有意识地在重要器物上使用，另一种推测是隋代已经在使用经过提纯处理的青金石颜料！

关于钴玻璃蓝颜料（Smalt）的使用历史，贝克曼认为欧洲最先制造，是由一位波西米亚玻璃工人（1540~1560年）发明的，但是弗利尔美术馆（Freer Gallery of Art）对一块来自内蒙古（Kara Khoto）的壁画残块的分析结果，甚至已将钴玻璃蓝颜料的使用历史提早到了11~12世纪。另外，从内蒙古呼和浩特市博物馆收藏的大召寺壁画（16~17世纪）也分析出了该颜料。而早至中国唐代，工匠们就已经利用钴矿石制造蓝釉瓷器了。现在存于世的多为清代早期古建彩画和壁画：北京皇家建筑群如先农坛古建彩画、承德避暑山庄殊象寺、山西崇庆寺泥塑、江苏常熟彩衣堂、北京智化寺明代壁画等。相对于西方16世纪到18世纪的使用年代，似乎我国使用的年代更长久一些，至少是从11世纪一直延续到清代早期（17~18世纪）。需要进一步搞清楚的是，国内的钴玻璃蓝颜料是单纯依靠进口还是利用外来技术本地制造的；抑或是与青花瓷器的起源与发展有着某种关联，值得深究。

人造氯铜矿（氯铜矿 Atacamite）的历史相当悠久。最早是在埃及的壁画上分析出了氯铜矿，并且推测为人造；早在唐代，中西方交流物品中也有“铜绿”，由于使用铜制造，故在价格上比天然的石绿要贵。人造氯铜矿晶体，在显微镜下呈现出圆形带深色内核的晶体形态，与块状岩石形态的天然氯铜矿截然不同，具有明显的表征意义。Pique 在云冈石窟分析出氯铜矿（但也同时分析出了石绿）以及 Proudfoot 等人在唐代的两件雕塑上分析

出的氯铜矿均呈现圆形带核颗粒，Fitzhugh 先生在一件 15 世纪伊朗手稿上也分析出了圆形带深色内核的氯铜矿颗粒，他认为其为人工制造的可能性较大。就我们的研究工作来看，其使用年代为元代到清早期：如内蒙古阿尔寨石窟壁画、山西崇庆寺泥塑、陕西蓝田水陆庵、明代成都观音寺壁画、承德避暑山庄殊象寺等。唐代壁画大量染料用到红色茜草（Alizarin）及靛蓝（Indigo）等染料。

清代之前大部分用于传统彩画中的颜料为国产的，且主要由天然矿物组成。清代晚期，许多西方合成颜料传入中国，据文献记载称为巴黎绿或为鸡牌绿、德国绿等，作为一种绿色颜料曾用在皇宫的彩画中。事实上，在清末的一些建筑彩画中及寺庙壁画中的确分析出了巴黎绿颜料（Emerald Green/ Paris Green）。如清晚期故宫贞度门建筑彩画和西藏拉萨布达拉宫西经院清代壁画。研究巴黎绿，对于研究我国近代史具有一定意义。清代晚期人造群青（Ultramarine）开始传入并大量的使用。

通过光学显微镜，不仅可以鉴定颜料，还可以研究彩绘的工艺：东汉卫尉蔡质的《汉官典职》，可以看出汉代宫殿壁画的制作方法，是先将胡粉涂在壁上，再在上面作画。而从已经出土的秦汉宫殿壁画来看，当时宫殿壁画是直接烘烤过的草拌泥层上，根据需要直接以各种颜料为底，再进行绘制，并没有用白粉打底，大量出土的汉代墓葬壁画符合古文献的描述。

陕西潼关税村隋墓出土器物彩绘通过剖面分析可知，该墓出土彩绘陶俑的施彩工艺应为：先在烧好的陶俑身上涂一层较薄的细泥土腻子，使表面较为平滑，易于施彩，当然如果陶质表面本身就很平滑，就不一定要上泥土腻子；然后用石灰粉或高岭土整体涂白；最后再施以颜料层。与常见唐墓壁画相比，该壁画表面白色石灰层较薄（ $100\sim 180\mu\text{m}$ ），草拌泥层在下，由经过漂洗过筛的黏土加石灰混合，再加植物碎屑构成。尽管黏土中掺加的石灰有混合不均匀的现象（出现 $1\sim 6\text{mm}$ 直径的团状白灰），但是这种黏土加石灰的工艺增强了整个壁画结构，类似于常见的三合土。

随着我们工作的持续开展，中国古代颜料发展历史的脉络会在我们的脑海中逐渐清晰起来。同时，陶质彩绘文物保护国家文物局重点科研基地（秦始皇帝陵博物院）显微分析室拉曼显微镜、扫描电子显微镜的陆续配备，使得古代颜料的研究工作更加深入和扩展。

偏光显微镜研究古代颜料的确有其突出的优点，但是需要长期的训练和经验的积累。自 2010 年以来，在本实验室进行实验和毕业论文相关科研工

作的研究生已经超过了 15 人，其中大多数经过了偏光显微分析培训，在给他们讲授的同时，我一直在想，要是能有一本书指导他们在颜料研究方面的工作，那就方便多了。于是这本书开始酝酿并开始写作，到现在一直还是觉得不成熟，但总算是出版了。本书分为三个部分：首先介绍了偏光显微镜的结构和使用方法，然后分类介绍常见颜料的使用尤其是鉴定光性；基于此，一方面以特征颜料，如中国蓝、中国紫、钴玻璃蓝颜料、人造氯铜矿颜料和绿土颜料为范例进行研究，另一方面，以彩绘类型不同展开讨论；最后，介绍了显微镜在文物研究过程中在霉菌、金属和陶瓷等方面的应用。

希望本书的出版能够在偏光显微镜研究古代颜料的培训方面起到一定作用，也希望对我们实验室这十年来的颜料分析研究工作做一个小结。

夏 寅

2016 年 6 月 1 日

第一章 绪论	001
1.1 研究目的与意义	001
1.2 国内外研究概况和发展趋势	001
1.3 小结	003
第二章 分析研究方法	007
2.1 总论	007
2.2 剖面和薄层分析研究方法	007
2.3 粉末偏光显微分析研究方法	012
2.4 小结	018
第三章 古代彩绘颜料概述及偏光显微鉴定	020
3.1 红色颜料	020
3.2 黄色颜料	030
3.3 绿色颜料	034
3.4 蓝色颜料	039
3.5 白色颜料	048
第四章 颜料研究专题	058
4.1 中国古代人造硅酸铜钡颜料分析研究	058
4.2 中国古代钴玻璃蓝颜料分析研究	070
4.3 中国古代碱式氯化铜颜料分析研究	081
4.4 中国古代绿土颜料分析研究——以定边郝滩东汉 壁画墓出土样本为例	091
第五章 彩绘研究专题	104
5.1 中国古代陶质彩绘文物彩绘工艺研究	104

5.2	中国古代泥塑彩绘工艺研究	111
5.3	中国古代石刻佛造像彩绘工艺研究——以北周 彩绘石刻佛像彩绘为例	123
5.4	中国古代殿堂壁画彩绘工艺研究	133
5.5	中国古代墓葬壁画彩绘工艺研究	140
5.6	中国古代石窟壁画彩绘工艺研究	147
5.7	中国古建油饰彩画彩绘工艺研究	155
第六章	其他领域的应用	167
6.1	霉菌菌种的显微镜鉴定	167
6.2	青铜器金相分析研究——秦俑坑出土铜镞铤的 金相及电镜能谱初步分析	171
6.3	陶器岩相分析研究	177
附录	185
1.	颜料名录	185
2.	颜料光性表	188
3.	典型案例	189
4.	实验材料	201
5.	研究团队彩绘颜料方面论文目录	204
后记	207
致谢	209
Abstract	211

1 Introduction	001
1.1 Advantage	001
1.2 Development in Pigment Research	001
1.3 Summary	003
2 Methodolgy	007
2.1 General Introduction	007
2.2 Cross-section and Thin-section	007
2.3 Powdering Polarized Light Microscopy	012
2.4 Summary	018
3 Introduction to Ancient Pigments and PLM Identification	020
3.1 Red Pigments	020
3.2 Yellow Pigments	030
3.3 Green Pigments	034
3.4 Blue Pigments	039
3.5 White Pigments	048
4 Some Important Pigments	058
4.1 Raman Spectroscopy and PLM Study on Man-made Chinese Barium Copper Silicate Series Pigments	058
4.2 Smalt, An Unfamiliar Pigment Commonly Used in Ancient China: Raman Spectroscopy and SEM-EDS Studies	070
4.3 Raman Spectroscopy and PLM Study on Man-made Copper Trihydroxychlorides Pigment in Ancient China	081
4.4 Green Earth Pigment: Case Study on The Pigment From Eastern Han Dynasty Mural Tomb, Hao Tan Ding Bian County, Shaanxi	091

5 Polychromy Technique	104
5.1 Study on Material and Painting Technique of Chinese Ancient Pottery Polychrome	104
5.2 Study on Material and Painting Technique of Chinese Ancient Clay Sculpture Polychrome	111
5.3 Study on Material and Painting Technique of Chinese Ancient Stone Polychrome	123
5.4 Study on Material and Painting Technique of Murals Polychrome in Chinese Ancient Architecture	133
5.5 Study on Material and Painting Technique of Tomb Murals Polychrome in China	140
5.6 Study on Material and Painting Technique of Grottoes Mural Polychrome in China	147
5.7 Study on Material and Painting Technique of Poly- chrome on Chinese Ancient Wooden Architecture	155
6 Other Applications	167
6.1 Fungi Microscopic Identification	167
6.2 Case Study in Bronze Metallographic Microscopy	171
6.3 Ceramic Petrography	177
Appendix	185
1. Pigments List	185
2. Optical Properties of Pigments	188
3. Some Cases	189
4. Instruments and Materials in Laboratory	201
5. Paper Catalog of Research Team on Polychromy and Pigments	204
Afterword	207
Acknowledgement	209
Abstract	211

第一章 绪 论

1.1 研究目的与意义

对古代器物和绘画作品的颜料鉴定，可以使考古工作者了解当时当地的经贸、文化及科技发展等情况，也可以帮助文物保护修复人员选择恰当的保护修复材料。尽管目前已经有 XRD、SEM (EDX)、XRF、FT-IR 等分析方法，可以较为准确地分析出颜料的成分与结构，但对于大多数的文博单位来说，置办这些昂贵的仪器设备是不太现实的。而将样品直接送到研究院所中，如果具体分析人员对于文物了解不够的话，很可能会漏掉样品中考古和保护工作者感兴趣的一些重要信息。利用偏光显微镜鉴定和研究颜料恰恰可以避免这一情况的发生，借助它稍微有条件的博物馆即可以完成颜料的采样、制样、分析和数据输出等全过程，从而同样达到颜料研究分析的目的。事实上，相对于衍射等方法，偏光显微粉末法对样品的需要量是很小的，理论上甚至可以达到皮克 ($1\text{pg}=10^{-12}\text{g}$) 和纳克 ($1\text{ng}=10^{-9}\text{g}$) 级^[1]。该方法还可以在岩石、陶瓷、锈蚀物等分析方面得到广泛的应用，应该被文博单位所重视。

偏光显微镜作为分析和研究颜料的基础手段，使古代颜料分析得更准确、更科学和更方便快捷，其分析成本为一般仪器分析的几十分之一，在此之前，由于经费问题，大量考古出土的彩绘没有进行科学的分析，而使得大量的信息白白流失，该方法经过优化后使得对大批量考古出土的古代彩绘进行分析成为可能，有利于系统普查中国颜料使用的历史，迅速掌握中国古代彩绘技术发展脉络。

1.2 国内外研究概况和发展趋势

国外文博系统在利用偏光显微镜研究颜料比较成熟，有关的论著不少：如 McCrone 的 *The Particles Atlas* 论述范围较广，包括医药、环境、化工、无机、有机、高分子等多个方面，但对于古代颜料论述和图谱不多，

可操作性不强；而 Stefan Wuelfert 的 *Der Blick ins Bild* 主要论述了偏光显微镜的技术，论及古代颜料的图谱不多，只有事例和说明，对于大多数只有少量颜料学基础知识的文博工作者来说，也不具有可操作性。

在国外采用 PLM 方法分析颜料的文献很多，如 FitzHugh 采用了 PLM、化学显微法（CM）、XRD、SEM-EDAX 分析了五百余幅日本浮世绘颜料^[2]；Duffy 对五个西藏风格的佛像表面的颜料，用 FTIR、PLM、EPMA 进行了分析研究^[3]；Richter 采用了 CM、PLM、XRD 和 TRXFA 对北欧哥特晚期和文艺复兴早期的未知颜料——萤石，进行了分析和研究^[4]；Khandekar 采用了 PLM、SEM-EDX 和 GC-MS 对一件 17 世纪彩塑进行了研究^[5]；Gasol 采用了 PLM、SEM-EDAX 和 FTIR 分析了西班牙西耶拿壁画的颜料^[6]；Kakouli 采用了 PLM、SEM-EDAX、XRD 分析了塞浦路斯罗马时代的壁画颜料^[7]；Corbeil 采用了 SEM-EDX、XRD、PLM、FTIR 对约旦阿巴斯王朝壁画颜料进行了分析研究^[8]；Tomkiewicz 采用了 PLM、FTIR、SEM-EDX、GC-MS、XRD 等分析方法对纽约布鲁克林博物馆西班牙殖民时代的绘画进行了研究^[9]；McCrone 对于 SEM 和 PLM 两种方法的配合使用进行了探讨^[10]；McCrone 利用 PLM 和 SEM-EDXRA 方法用于鉴定文物的真伪^[11]；Seward 探讨了 PLM 在颜料、花粉、微化石以及纤维等考古出土鉴定方面的应用^[12]；Feller 论述了 PLM 的方法和步骤^[13]；Giaccai 采用了 XRF、PLM、FTIR 分析了泰国 18 世纪末和 19 世纪两个横幅绘画的颜料成分^[14]；Grundmann 采用了 PLM、SEM 结合 EDX、WDX 和 XRD 对人造雌黄颜料进行分析，对湿法和干法人造雌黄进行分析并鉴定^[15]；Scott 采用了 FT-IR、PLM 对早期罗马时期第三中期的埃及木乃伊盒的颜料进行分析^[16]；Joanna 采用了 PLM、SEM-EDS、RS、FTIR 对青铜时代（第六期）陶罐黑色覆盖层的涂料进行了分析和鉴定^[17]；Maria 采用了 VMP、AFM、TEM、SED-EDX、ATR-FTIR、PLM、LM 等方法，对后古典时期玛雅壁画中的玛雅蓝颜料进行分析和研究，首次证明了该颜料在当时的使用情况^[18]；Piovesan 采用了 RL-OM、PLM、PPL、XPL、ESEM、EDS、EPMA、XRD 对古代不同时期庞贝维纳斯神庙的壁画颜料及绘画技法进行分析^[19]；Vânia 采用 XRF、XRD、PLM、RS 对 16~17 世纪的波斯手稿中的颜料进行了研究^[20]；Russell 等人采用了 PLM、FTIR、GC-MS、PY-GC-MS 和 SEM-EDX 对弗朗西斯·培根的 38 幅画作的颜料进行了分析^[21]；Kalinina 采用了 SEM-EDX 和 PLM 对国家冬宫博物馆收藏（俄罗斯圣彼得堡）的四幅画的颜料进行了分析，从而研究意大利文艺复兴时期洛伦佐乐透的绘画技术^[22]。