

隐性字迹的快速光谱显现与高光谱分类技术研究

李云鹏, 代雪晶, 王 猛, 王 丹, 高 毅, 王鸣久, 师鑫林, 李明泽

中国刑事警察学院, 辽宁 沈阳 110854

摘 要 擦除、密写、掩盖等隐性字迹的快速、无损显现与检验是法庭科学文件检验领域的研究难点。当前多采用切换多波段光源与滤光片的方法对隐性字迹进行显现,但对隐性字迹显现的光谱学机理分析较少,因此隐性字迹的显现效率与检验成功率均不高。为提高擦除、密写、掩盖三类隐性字迹的显现效率与检验精度,通过测量字迹的激发与荧光光谱、反射与透过光谱、微观形貌,对其显现机理与快速显现方法进行深入研究。并且基于液晶可调谐滤光器(LCTF)的高光谱成像技术与支持向量机(SVM)分类算法,提出一种对隐性字迹同时显现与分类的快速检验方法。晨光与百乐可擦笔字、荧光密写笔、柠檬汁均可在 365 nm 长波紫外光激发下发出较强荧光,其中可擦笔和柠檬汁的荧光波长为 716 nm 左右,荧光密写笔荧光波长为 447 nm。此外,采用 254 或 365 nm 波长对柠檬汁隐性字迹进行紫外反射成像也可有效显现柠檬汁字迹。掩盖字迹的研究中发现,在 700~2 500 nm 红外波段,走珠笔、记号笔、可擦笔字迹透过率在 60% 以上,而中性笔字迹透过率在 20% 以下。因此,采用近红外波段 850 nm 成像有效显现了百乐走珠笔所覆盖的晨光中性笔字迹。同时,采用 LCTF 高光谱相机对三类隐性字迹在 400~720 nm 范围进行步长为 5 nm 的高光谱成像,并通过 SVM 分类算法对图像中不同笔迹成分进行同时显现和分类,分类总精度达 99.284 4%, Kappa 系数达 0.959 1。以 365 nm 波长光源作为激发光进行光致发光成像可有效显现擦除与密写字迹。由于不同墨迹在近红外波段反射率差异较大,近红外成像可以有效显现掩盖字迹。基于 LCTF 高光谱成像的 SVM 分类技术可实现不同类别隐性字迹的同时显现与分类,并且有较高的显现效率与分类精度。

关键词 高光谱成像; 文件检验; 激发光谱; 荧光光谱; SVM

中图分类号: DF794.2 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2021)11-3524-08

引 言

隐性字迹的无损光学显现是司法文件检验鉴定中的难题,其中最典型的三类隐性字迹是擦除、密写、掩盖字迹。隐性字迹显现的一般原理是根据隐性字迹的光致发光特性或在某波段的吸收和反射特性不同,形成字迹与纸张的亮度反差进而显现字迹形态。但当前对不同类别隐性字迹的显现方法研究中^[1-4],大多使用激光、多波段光源入射检材,然后通过切换滤光片进行尝试性显现的方法进行研究。较少通过字迹光谱特性与微观形貌对字迹显现机理进行深入研究,因而实际文件检验工作中隐性字迹显现效率与检验精度均不高。

可擦笔擦除字迹常见于票据等文件的造假。Chayal 等^[5]采用 312~365 nm 紫外波段对支票上的热敏墨水擦除字迹进

行显现,并采用-10℃低温重新使擦除字迹上色恢复擦除字迹。Ghazy 等^[6]比较了可擦墨水和消失墨水之间的差异,对两种墨水的时间稳定性、表面形貌,以及化学成分进行了深入分析。Eldebss 等^[7]研究可擦墨水的形态、成分,及其笔划和线条特点,并采用红外成像的方法对其进行显现;密写字迹主要采用特制的不可见墨水进行书写^[8]。Sushma Upadhyay 等^[9]研究了果汁、蔬菜汁密写字迹的物理和化学显现方法。杨玉柱等^[10]对白色 A4 纸表面遗留的“醋+柠檬”密写字迹、“醋+葱汁”密写字迹、小苏打水密写字迹等隐性字迹进行了无损光学显现,经过一系列实验对比分析,得出采用 445 nm 激光光致发光可以比较广泛的显现隐性字迹;在掩盖与涂抹字迹的显现研究方面, Pandey^[11]采用 VSC-6000 型文检仪,配合 LED 聚光灯和投光灯在掩盖字迹的显现中得到较好的效果,并使用文检仪对擦除字迹和消退字迹的显现

收稿日期: 2021-07-02, 修订日期: 2021-09-18

基金项目: 国家自然科学基金项目(21205139), 辽宁省自然科学基金计划重点项目(20180540048), 中央高校基本科研业务费中国刑事警察学院项目(D2017020), 辽宁省教育厅科学研究经费项目(ZGXJ2020008), 公安部科技强警基础工作专项项目(2020GABJC04), 辽宁省自然科学基金指导计划项目(20180550153)资助

作者简介: 李云鹏, 1988 年生, 中国刑事警察学院讲师 e-mail: lypciomp@126.com

进行了研究。侯进令等^[12]分别采用反射光谱成像技术对黑色签字笔涂抹掩盖字迹的提取效率进行了研究。

为提高擦除、密写、掩盖三类隐性字迹的检验效率与分类精度。提出两种方法：(1) 采用荧光分光光度计与紫外-可见-近红外分光光度计对不同种类字迹进行了光谱特性分析，并采用 350 倍光学显微镜对隐性字迹微观形貌进行观测，据此对三类字迹的显现机理进行深入分析，提出一种无损、高效的隐性字迹光学显现方法。(2) 采用基于液晶可调谐滤光器(liquid crystal tunable filter, LCTF)的高光谱成像仪采集字迹高光谱图像，并采用支持向量机(support vector machines, SVM)分类算法分析光谱图像，实现三类不同隐性字迹的同时显现与分类，并得到较高显现效率与分类精度。前者对环境和设备要求低，适合现场临场显现与检验；后者要求暗环境和高光谱成像设备，适合实验室显现与检验。

1 实验部分

1.1 隐性字迹的样品

擦除字迹、密写字迹、掩盖字迹显现方法的样品，详情如表 1 所示。

表 1 三类隐性字迹样品明细

Table 1 List of three kinds of invisible writing samples

擦除字迹	密写字迹	掩盖字迹
晨光热敏可擦笔 AKP61115	昂彩隐形 荧光笔 AS9	晨光中性笔 AGP13608
百乐热敏可擦笔 LFBK-23EF-B	柠檬汁	百乐走珠笔 V5

擦除字迹采用热敏可擦笔进行实验。热敏可擦笔的原理是热敏反应^[13]，字迹经摩擦生热后发生油墨分离，颜色变为透明。分别选用市面常见的两种热敏可擦笔晨光 AKP61115 和百乐 LFBK-23EF-B 进行实验。密写字迹一般采用无色荧光笔或者无色果汁进行密写，本工作采用昂彩隐形荧光笔 AS9 和柠檬汁进行实验。掩盖字迹的样本采用晨光中性笔 AGP13608 涂抹覆盖百乐走珠笔 V5 书写的字迹，进行百乐走珠笔字迹的显现。此外，还准备有宝克中性笔 PC-880、白雪走珠笔 PVN-166、得力记号笔 6824、奥德美可擦笔 GP-3106。

1.2 字迹的荧光光谱与反射光谱测量

采用美国 Agilent 公司生产的 Cary Eclipse 型荧光分光光度计检测字迹的荧光和发射光谱。激发狭缝为 5 nm、发射狭缝为 5 nm，PMT 电压为 550 V。采用 PerkinElmer Lambda1050+ 紫外-可见-近红外分光光度计进行样品的反射和透射光谱测量。

1.3 字迹的显现设备

基于佳能 60D 开发的猎鹰红紫外数码相机 1 台；多波段光源 1 套，光源波段：365, 415, 440, 465, 490, 515, 540, 565, 590 和 615 nm；滤光片中心波长分别是 365, 700, 730,

800, 850 和 950 nm。

1.4 字迹的微观形貌表征

字迹微观形貌的表征采用日本 HIROX 三维数字显微镜 RX-100。

1.5 高光谱成像与分类

采用成像光谱仪对字迹进行光谱成像。成像光谱仪型号：美国 Cambridge Research & Instrumentation, Inc. (CRI) 公司 Nuance Multispectral Imaging System；液晶可调波长滤光镜(LCTF)，波段范围：420~720 nm，最小间隔波长 1 nm；配备有科学级 CCD 数字照相机，具体参数为：140 万像素，像元大小：6.45 μm 。

采用 ENVI 光谱图像处理软件处理光谱图像，采集不同特征点的光谱曲线，并用监督分类方法中支持向量机分类器对擦除字迹、密写字迹、掩盖字迹三类字迹进行显现与分类。

2 隐性字迹显现与光谱分析

2.1 热敏可擦笔字迹的显现与光谱分析

热敏可擦笔的原理是热敏反应，这种笔油墨有三种成分：生色材料、显色剂和变色温度调整剂。常温时，生色材料和显色剂结合，字迹正常显示油墨颜色。当油墨因摩擦温度升高到 40 $^{\circ}\text{C}$ 以上时，温度调整剂会抑制生色材料和显色剂的结合，油墨颜色在生色材料和显色剂分离时消失。如图 1(a)和(d)为擦除前的字迹，经过橡皮摩擦生热后字迹消失，如图 1(b)和(e)所示。

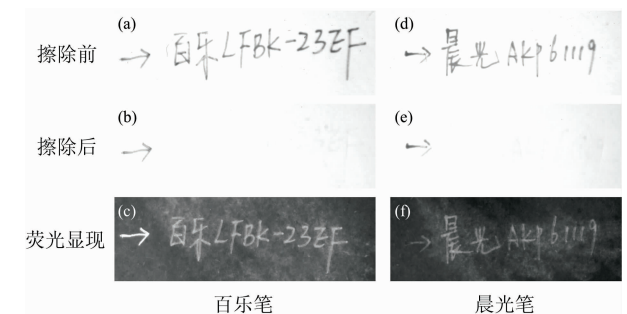


图 1 百乐、晨光热敏可擦笔字迹擦除前(a), (d); 擦除后(b), (e); 荧光显现效果(c), (f)

Fig. 1 Pilot/Chenguang thermosensitive erasable pen writing before erasing (a), (d), after erasing (b), (e), and fluorescent effect (c), (f)

为有效显现擦除字迹，采用 Cary Eclipse 型荧光分光光度计对两种品牌字迹的激发和荧光光谱进行测量。如图 2 所示，热敏可擦笔的荧光光谱中心波长主要是 716 nm，采用 716 nm 进行监测，得到的热敏可擦笔激发谱中主要有三个激发波长：255, 335 和 367 nm。从图 2 可以看到，在相同的测试参数下，百乐的激发谱和荧光谱强度均高于晨光，但中心波长峰位一致，说明两种可擦笔油墨的主要成分是一致的，可以采用相同显现方法进行显现。常用的紫外光源主要有 254 和 365 nm 两个波长，本实验选用 365 nm 作为激发光源，红

紫外相机配合 730 nm 滤光片进行成像。得到荧光字迹显现效果如图 1(c)和(f)所示,两个样本均呈现“暗背景、亮字迹”的显现效果,百乐可擦笔由于荧光强度更强,得到字迹反差效果更明显。由于热敏可擦笔的擦除字迹的原理并不是去除有色油墨,而是通过摩擦生热让显色剂失效,所以字迹经过橡皮摩擦变色后,油墨仍渗透于纸张之内,经过 365 nm 紫

外光激发可产生强烈荧光。采用 HIROX 三维数字显微镜观测字迹的擦除位置,如图 3(a)所示为笔迹擦除和未擦除交界位置的显微照片,擦除位置仍可观测到渗透入纸张内未充分变色的油墨,其他擦除油墨已经完全变为透明色。如图 3(b)所示为墨迹完全擦除区域的微观形貌,可见油墨基本变为透明色,局部位置还有没有变色的墨迹点。

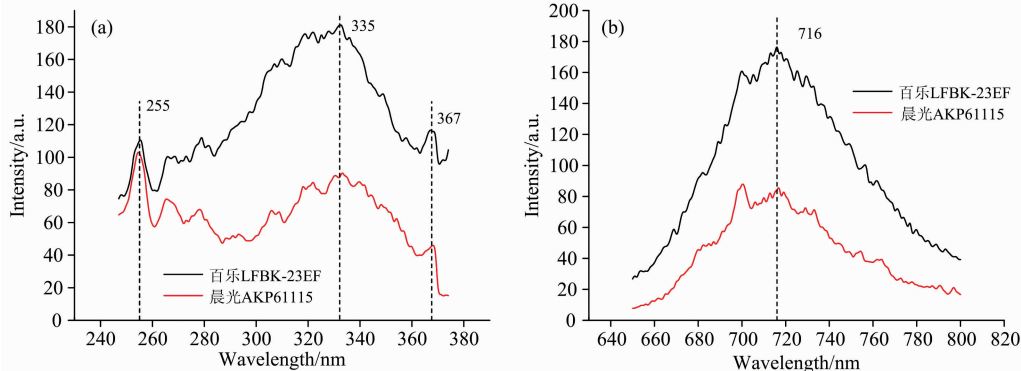


图 2 热敏可擦笔的激发谱与荧光谱,激发谱是在 716 nm 监测下测量的,荧光谱是在 365 nm 光源激发下测量的

Fig. 2 Fluorescence excitation spectra (a, monitoring wavelength: 716 nm) and 716 nm peak intensities (b, exciting wavelength: 365 nm) of erasable pens

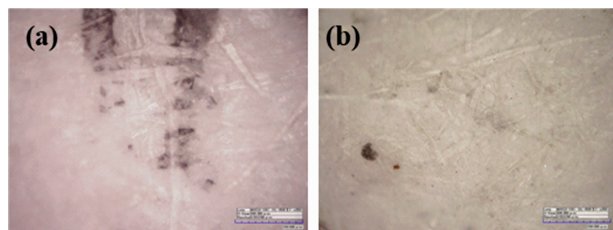


图 3 笔迹后半段被擦除位置微观形貌 (a), 擦除笔迹位置的微观形貌 (b), 显微镜 350 倍放大

Fig. 3 The micromorphology of erasing part of the bottom half handwriting (a), and the micromorphology of the erased handwriting (b), at 350 \times magnification

2.2 密写字迹的显现与光谱分析

常见密写字迹主要使用柠檬汁、葱汁等水果蔬菜汁液,以及荧光笔、小苏打水等化学药剂^[10],这类药剂也叫不可见墨水,被用于情报传递或者赌场中对卡牌进行标记^[11,14]。本工作主要研究柠檬汁和荧光笔两种密写字迹的显现方法。柠檬汁和荧光笔的墨迹在可见光下是透明的,如图 4(a)和(c)分别为昂彩密写笔字迹原貌、柠檬汁字迹原貌,两种字迹用肉眼无法直接观测。

为有效显现密写字迹,采用荧光分光光度计对两种字迹的激发和荧光光谱进行测量。如图 5(a)所示,黑色曲线为昂彩密写笔 447 nm 检测下激发谱,从 300~400 nm 长波紫外波段,都可以产生较强的荧光,红色曲线为 365 nm 激发下密写笔的荧光谱,其荧光范围主要分布在 400~500 nm,荧光中心波长为 447 nm。根据上述光谱曲线研究,选用 365 nm 作为激发光对昂彩 AS9 密写笔进行光学显现,采用 450 nm 滤光片观测,如图 4(b)所示,字迹可以清晰显现出来。

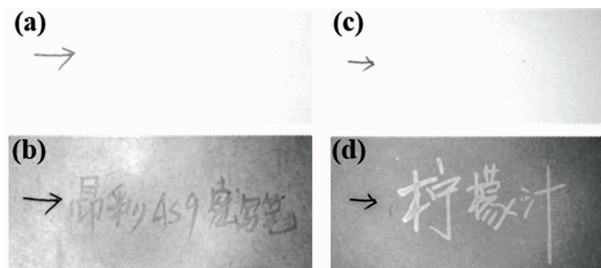


图 4 昂彩笔迹原貌 (a), 昂彩笔迹荧光显现 (b); 柠檬汁字迹原貌 (c), 柠檬汁字迹荧光显现 (d)

Fig. 4 Angcai handwriting (a), fluorescence of Angcai handwriting (b); handwriting of lemon juice (c), fluorescence of lemon juice (d)

值得注意的是,与正常光致发光摄影“暗背景亮字迹”的现象不同,该检材是“亮背景暗字迹”,这是因为白纸在紫外光激发下会产生强烈荧光,如图 5(a)蓝色曲线所示,白纸在 365 nm 激发下在 400~500 nm 产生强烈荧光,且荧光强度是字迹荧光强度的 2.5 倍,因而荧光显现为“亮背景暗字迹”。柠檬汁与白纸在 365 nm 的荧光曲线如图 5(b)所示,柠檬汁在 700~740 nm 有较强的荧光,而白纸在这一波段范围并没有荧光,因此采用 365 nm 紫外光源激发,使用 730 nm 滤光片成像可以有效的对柠檬汁密写字迹进行显现,如图 4(d)所示,“暗背景亮字迹”的“柠檬汁”三个字清晰可见。此外,采用长波紫外反射成像的方式对柠檬汁字迹进行显现也可以得到较好的效果。如图 6(a)所示为柠檬汁和白纸在 250~700 nm 波段的反射谱,可见白纸和柠檬汁在 250~420 nm 波段反射率差异较大,采用 365 nm 长波紫外成像,可以有效显现柠檬汁字迹,如图 6(c)所示,该方法与光致发光方法得到

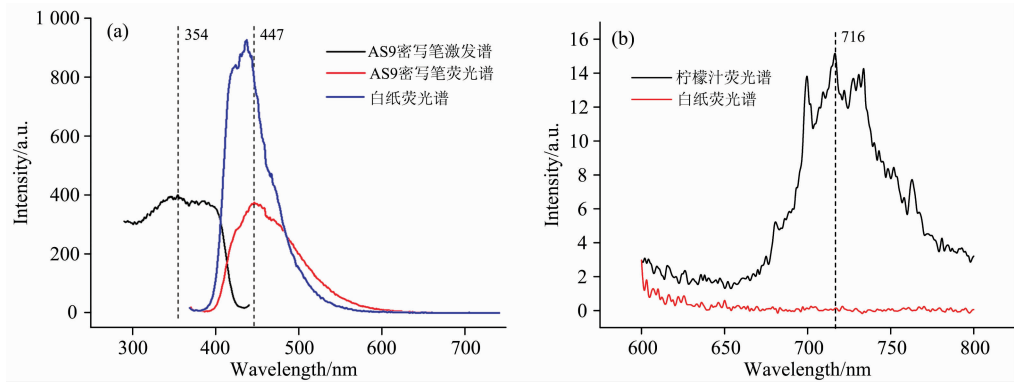


图 5 昂彩密写笔和白纸的荧光激发谱和荧光发射谱 (监测波长 447 nm, 激发波长 365 nm)

Fig. 5 Fluorescence excitation and emission spectra of Angcai pen and white paper with a monitoring wavelength of 447 nm and a exciting wavelength of 365 nm

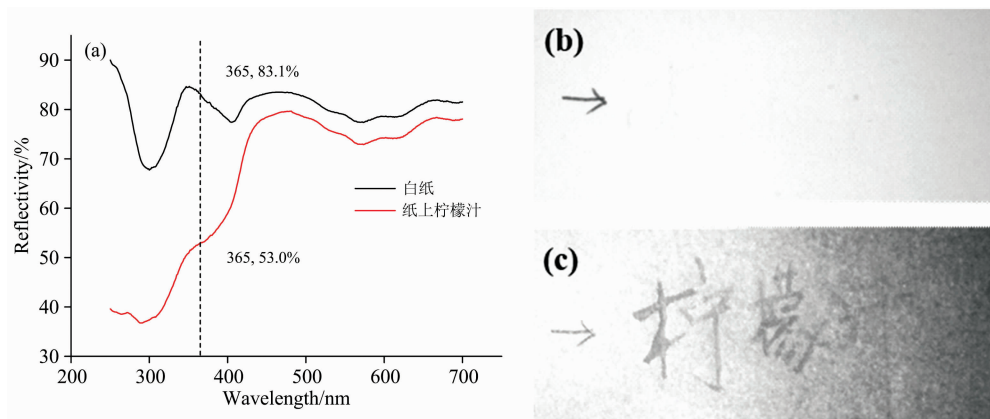


图 6 白纸与柠檬汁的反射光谱 (a), 柠檬汁字迹原貌 (b), 365 nm 波长激发与观测下, 柠檬汁字迹 (c)

Fig. 6 Reflectance spectra of white paper and lemon juice (a), original appearance of lemon juice handwriting (b) and appearance of lemon juice handwriting irradiated by 365 nm beam (c)

的图 4(d)比较, 紫外反射成像字迹反差效果略逊于光致发光摄影。此外, 图 6(c)右侧略暗是因为光源在检材一侧照射造成的, 检材近光源的一侧光强会较强, 远光源的一侧会暗一些。

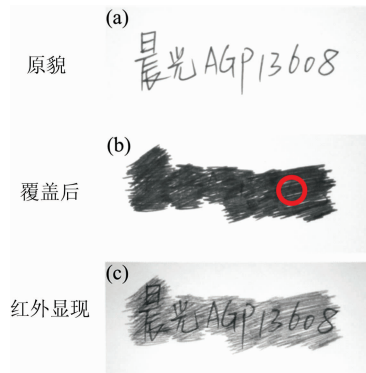


图 7 晨光字迹原貌 (a), 百乐遮盖后 (b), 红外 850 nm 显现 (c)

Fig. 7 Original appearance of the chenguang handwriting (a), being covered by Pilot (b), the infrared 850 nm appearance (c)

2.3 掩盖字迹的显现与光谱分析

对于同色涂抹掩盖字迹, 由于不同字迹的颜色、成分、理化特性较为接近, 所以该类字迹的检验鉴定一直是文件检验领域的难题, 国内外学者对不同品牌涂抹字迹的光谱显现进行了深入研究^[15], 但较少通过分析字迹光谱特性来研究掩盖字迹的显现机理。本工作对晨光中性笔 AGP13608 和百乐走珠笔 V5 两种黑色签字笔进行了研究。图 7(a)为晨光中性笔 AGP13608 所书写字迹原貌, 采用百乐走珠笔 V5 进行涂抹掩盖, 掩盖后字迹如图 7(b)所示, 字迹覆盖后肉眼对字迹完全无法分辨。采用 HIROX 三维数字显微镜对图 7(b)红色圈所标记位置进行观测, 如图 8 所示, 两种字迹完全混合在一起渗入纸纤维中无法分辨, 常规方法很难将两种字迹分离。

采用分光光度计对晨光中性笔、百乐走珠笔等 6 种不同品牌黑色签字笔墨迹进行了 250~2 500 nm 透过率测试。图 9(a)为不同墨迹涂抹在玻璃片上的样品所测得的通过率曲线, 如图 9(a)所示, 6 种笔在 250~700 nm 透过率均在 10% 以下, 所以在可见光范围内所有笔的墨迹均呈现黑色。但在 700~2 500 nm 红外波段, 百乐走珠笔、白雪走珠笔、得力记

号笔、奥德美可擦笔透过率均在 60%，百乐走珠笔在该波段的透过率甚至接近 100%，说明上述墨迹对于 700~2 500 nm 红外线来说是透明或半透明的。而晨光中性笔与宝克中性笔在 700~2 500 nm 波段透过率均在 20% 以下，晨光中性笔在 250~2 500 nm 的透过率甚至接近 0%，说明中性笔墨迹对 250~2 500 nm 波段范围内的光均强烈吸收。

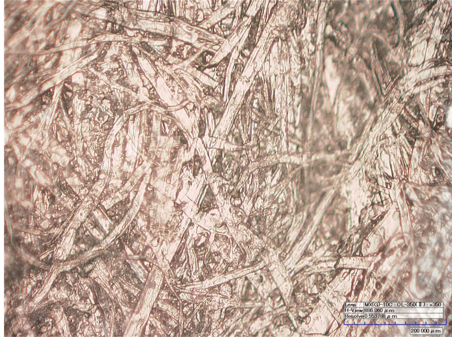


图 8 掩盖字迹显微镜×350 倍局部放大

Fig. 8 Microscope image of covered handwriting at 350× magnification

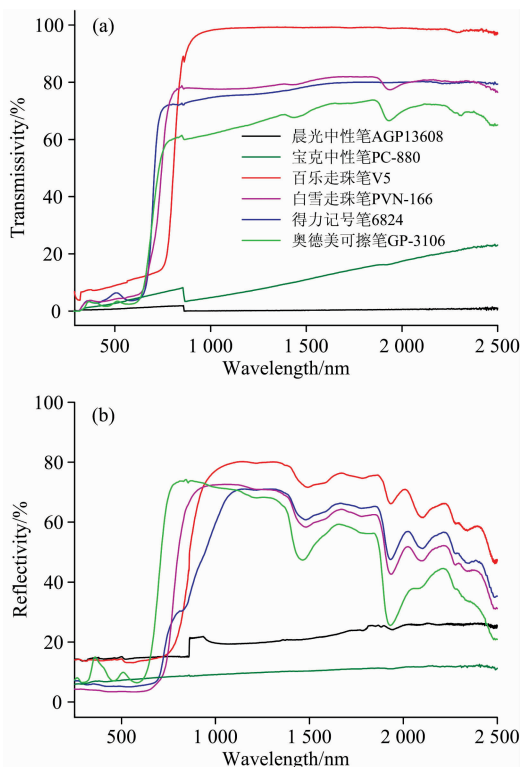


图 9 玻璃上不同品牌笔墨迹样品透过率曲线(a)，纸上不同品牌笔墨迹样品反射率曲线(b)

Fig. 9 Transmissivity curves of different brand pen ink on glass (a), reflectivity curves of different brand pen ink on paper (b)

图 9(b) 为上述 6 个不同品牌笔的墨迹在纸样品上的反射率曲线，该曲线和图 9(a) 玻璃上透过率曲线规律十分相似。6 种笔在 250~700 nm 的反射率均较低。700~2 500 nm

红外线穿过百乐走珠笔、白雪走珠笔、得力记号笔、奥德美可擦笔 4 种笔的字迹后到纸上几乎完全反射回来，因此这四种笔在 700~2 500 nm 红外波段有较高的反射率，在 1 500 nm 之后反射率有所波动和下降是因为白纸对大于 1 500 nm 波段的光波有所吸收。晨光和宝克中性笔依然在 250~2 500 nm 波段反射率低于 20%。其中晨光中性笔在纸上反射率相对于在玻璃上透过率有所提升，这是因为晨光中性笔在纸上涂抹没有完全覆盖白纸所致。

综上所述，中性笔墨迹强烈吸收远紫外-可见光-近红外波段光线，而走珠笔、记号笔、可擦笔等黑色签字笔在近红外波段有“透明窗口”。因此基于中性笔和其他笔在近红外波段的吸收和反射性能不同，可以对不同类型的掩盖字迹进行近红外波段成像显现。对百乐走珠笔所掩盖的晨光中性笔字迹，采用 700~2 500 nm 波段的红外成像均可以有效显现。如图 7(c) 所示，采用钨丝灯光源，配合 850 nm 滤光片成像，晨光中性笔字迹得以有效显现。此外，如果同种笔掩盖的字迹，被掩盖字迹和掩盖字迹对红外线的吸收反射是一样的，因此无法有效显现被掩盖的字迹。

3 基于高光谱成像的隐性字迹分类

第 2 节中所述擦除、密写、掩盖三类隐性字迹的显现主要是采用“多波段光源+干涉滤光片”的摄影方法，这种方法经济、实用，对现场环境要求不高，适合现场当场显现与检验。但是对不同字迹需要切换不同的摄影方法，无法用一种方法实现不同类别隐性字迹的同时显现，效率较低。为解决这一问题，采用基于 LCTF 的高光谱成像技术配合 SVM 分类算法对可擦笔擦出字迹、荧光密写笔、柠檬汁三种不可见字迹进行同时显现与分类。

3.1 隐性字迹光谱图像采集与光谱曲线提取

高光谱技术由于获得的物质光谱信息更为丰富，常用于指纹等痕迹物证的检验^[16-17]。本工作将高光谱技术用于隐性字迹的检验，如图 10(a) 所示为 LCTF 成像光谱仪与控制终端，配备光源为 4 个钨丝灯，并配备一个紫外光源补充紫外光。图 11(a) 所示三个箭头所指示位置分别为晨光可擦笔擦出字迹、昂彩密写笔字迹、柠檬汁字迹的原貌。采用成像光谱仪对该区域隐性字迹进行光谱图像采集，400~720 nm 每隔 5 nm 采集 1 张光谱图像，共采集 65 张光谱图像。根据样品的高光谱图像数据，采集不同字迹位置的光谱亮度曲线，如图 10(b) 所示，白纸、昂彩密写笔、柠檬汁光谱曲线重合度较高、差异较小，晨光可擦笔与写指示箭头的碳素笔光谱差异较大。

3.2 隐性字迹光谱分类

采用 ENVI 光谱数据分析软件对光谱图像进行分析，以对不同隐性字迹进行分类显现。文献^[18]采用 ENVI 软件通过主成分分析等分类算法实现了对篡改字迹的检测。本文采用监督分类—支持向量机算法(SVM)对三类隐性字迹进行显现与分类。首先，将 3.1 中采集的高光谱图像作为样本导入，根据图像光谱特征，通过人工判读把图像中的区域分为晨光可擦笔、昂彩密写笔、柠檬汁、碳素笔、白纸 5 个类别。

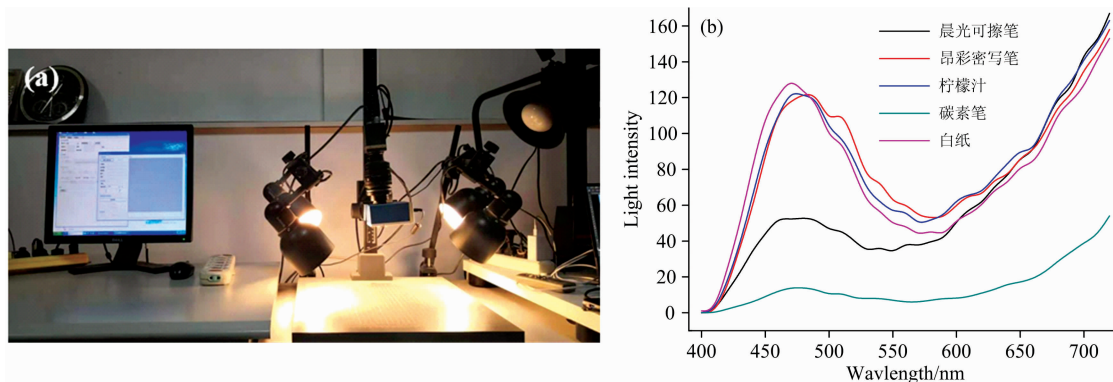


图 10 LCTF 成像光谱仪 (a), 不同种类字迹的光谱曲线 (b)

Fig. 10 LCTF imaging spectrometer (a), spectral curves of different kinds of handwriting (b)

然后, 通过绘制多边形 ROI 区域进行训练样本的选取, 并对不同成分 ROI 区域进行颜色定义。最后, 采用 SVM 算法对高光谱图像进行分类, 如图 11(b), 三种隐性字迹得以同时显现。计算出不同样本的可分离度, 这个参数的取值范围在 0~2.0 之间, 大于 1.9 说明样本可分离性好, 1.8~1.9 范围说明样本可分离性合格, 小于 1.8 说明样本可分离性不

高。如表 2 所示, 图像中不同字迹得成对成分分离度均大于 1.8, 除白纸与晨光可擦笔擦出字迹外其他材质的成分分离度均接近 2, 说明所采用的基于 LCTF 光谱仪的字迹分类方法可以对隐性字迹进行高效显现与分类。

表 2 成对成分分离度

Table 2 Separation degree of pair component

	昂彩	柠檬汁	碳素笔	白纸
晨光	1.999 95	1.995 94	2.000 00	1.812 44
昂彩	—	1.972 96	2.000 00	1.999 38
柠檬汁	—	—	2.000 00	1.920 65
碳素笔	—	—	—	2.000 00

3.3 结果精度分析

为定量分析“高光谱图像+SVM 算法”对隐性字迹的分类精度, 要对分类结果进行验证。结果验证时选择验证样本 ROI 样本位置要重新选择, 不可与分类样本重合, 再采用混淆矩阵的方法验证本分类精度。混淆矩阵以矩阵的形式罗列出对各个成分分类结果的精度, 如表 3 所示。用户精度指图像像素被正确分到 A 类的总数(对角线值)与分类器将整个图像的像素分为 A 类的像素总数(混淆矩阵中 A 类行的总和)之比, 本方法得到的用户精度中只有晨光字迹的分类精度较低 85.66%, 其中 310 像素被错误分类到白纸, 其余成分分类精度都在 95% 以上。生产者精度是指分类器将整个图像的像素正确分为 A 类的像素数(对角线值)与 A 类真实参考总数(混淆矩阵中 A 类列的总和)之比, 生产者精度中柠檬汁、晨光可擦笔的分类精度较低为 92% 左右, 其余成分均在 98% 以上。从图 10(b)中不同种类字迹的光谱曲线即可看出, 晨光可擦笔、柠檬汁、白纸的光谱曲线重合较多, 因而这三类成分的分类精度略低。总精度等于被正确分类的像素数与总像素数之比, 经计算可得本方法的分类总精度为 99.284 4%。Kappa 系数反映了真实像素与分类像素的一致程度, 本方法分类的 Kappa 系数为 0.959 1。因此, 所提出的“高光谱图像+SVM 算法”可以对不同种类隐性字迹进行同时显现和高精度区分。

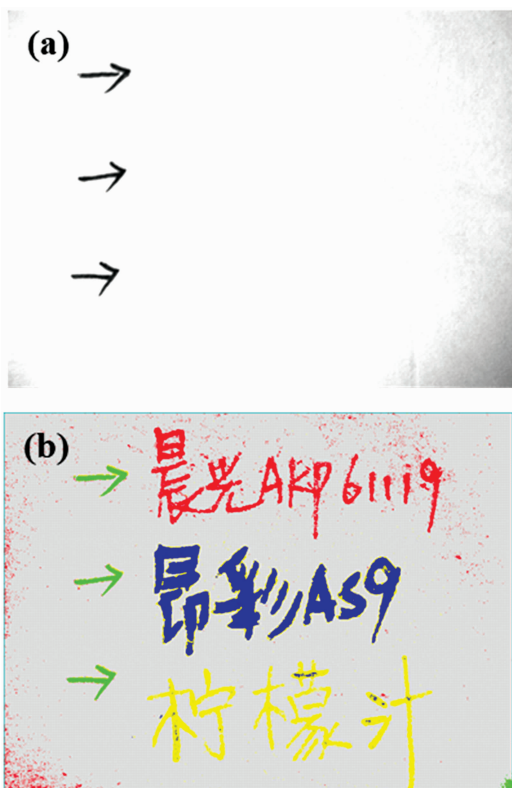


图 11 晨光可擦笔擦出字迹、昂彩密写笔字迹、柠檬汁字迹 (a), 基于高光谱图像的分类结果 (b)

Fig. 11 Chenguang erasable pen erasing handwriting, Angcai steganography pen handwriting, lemon juice handwriting (a), and classification result based on hyperspectral image (b)

表 3 精度评价
Table 3 Accuracy evaluation

真实类别	晨光	昂彩	柠檬汁	碳素笔	白纸	合计	用户精度/%
分 类 类 别	晨光	1 858	0	1	0	310	85.66
	昂彩	0	5 116	18	0	5 134	99.65
	柠檬汁	0	78	2 608	0	2 736	95.32
	碳素笔	0	0	0	643	643	100.00
	白纸	178	0	183	0	103 263	99.65
合计	2 036	5 194	2 810	643	103 623	114 306	
生产者精度	91.26%	98.50%	92.81%	100.00%	99.65%		
总精度: 99.284 4%				Kappa 系数: 0.959 1			

4 结 论

对可擦笔擦除字迹、密写字迹、掩盖字迹三类隐性字迹的光谱特性、显现与分类的研究, 结论如下:

(1) 可擦笔擦除字迹的研究中, 晨光、百乐等可擦笔热敏可擦笔的激发谱主要有三个激发波长 255, 335 和 367 nm, 荧光谱中心波长主要是 716 nm, 故选用 365 nm 作为激发光源, 配合 730 nm 滤光片进行成像, 可有效显现晨光和百乐可擦笔的擦除字迹, 百乐笔由于荧光强度更强, 得到字迹反差效果更明显。

(2) 荧光笔、柠檬汁等密写字迹的研究中, 昂彩密写笔激发波长为 354 nm, 荧光波长为 447 nm, 选用 365 nm 作为激发光源, 采用 450 nm 滤光片观测, 字迹可以有效显现, 但白纸在紫外光激发下会产生强烈荧光, 所以最终显现为“亮背景暗字迹”。柠檬汁在 365 nm 激发下, 产生荧光的中心波长为 716 nm。此外, 由于柠檬汁对 200~400 nm 紫外线有较强的吸收, 采用 365 nm 进行长波紫外摄影也可以有效显现柠檬汁密写字迹。

(3) 掩盖字迹的研究中, 在 700~2 500 nm 红外波段, 走珠笔、记号笔、可擦笔字迹透过率在 60% 以上, 中性笔字迹

透过率在 20% 以下。因此, 可以根据不同笔迹在近红外波段的透射和反射率差异, 实现掩盖字迹显现。采用近红外波段 850 nm 成像有效显现了百乐走珠笔所覆盖的晨光中性笔字迹。

(4) 基于 LCTF 的高光谱成像技术对可擦笔擦出字迹、荧光密写笔、柠檬汁三种不可见字迹在 400~720 nm 范围进行光谱图像采集, 通过 SVM 分类算法对图像中不同笔迹成分进行同时显现与分类, 本方法的分类总精度为 99.284 4%, Kappa 系数为 0.959 1。

综上所述, 在隐性字迹的显现研究中, 对于可擦签字笔、荧光笔、柠檬汁等不可见字迹采用 365 nm 长波紫外线进行检验是首选方法, 而对于掩盖字迹采用近红外成像的方式进行显现效果显著。在隐性字迹的分类研究中, 本文所提出的基于高光谱成像的 SVM 分类方法可以对可擦笔擦出字迹、荧光密写笔、柠檬汁三种隐性字迹实现同时显现与分类, 该方法可以快速、高效的对隐性字迹进行显现, 并且有较高的分类精度, 在未来有广阔的应用前景。但由于时间有限, 本文所采集的隐性字迹样本还不够丰富, 后续工作中, 会进一步建立隐性字迹样本光谱库, 实现隐性字迹的智能化显现与分类识别。

References

- [1] Deviterne-Lapeyre C M. Forensic Science International; Synergy, 2020, 2: 429.
- [2] Asicioglu F, Tekin T, Ozbek N, et al. Journal of Forensic Sciences, 2019, 64(6): 1898.
- [3] Anamika D, Kumar S. Journal of University of Shanghai for Science and Technology, 2020, 22(10): 500.
- [4] ZHAO Xue-jun, HUANG Xiao-chun, WANG Chang-liang, et al(赵雪珺, 黄晓春, 王长亮, 等). Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析), 2020, 40(3): 674.
- [5] Chayal V M, Handa D R, Singh J, et al. Australian Journal of Forensic Sciences, 2015, 48(5): 601.
- [6] Gazy M B, Eldebss T, El-Zawawy W K, et al. Nature and Science, 2015, 13(12): 16.
- [7] Eldebss T M A, El-Zawawy W K, Gazy M B, et al. Journal of American Science, 2015, 11(11): 30.
- [8] Lee J, Kong S G, Kang T Y, et al. Forensic Science International, 2014, 236: 77.
- [9] Upadhyay S, F Fatima. Research Journal of Pharmacy & Technology, 2017, 10(12): 4209.
- [10] YANG Yu-zhu (杨玉柱). Journal of Criminal Investigation Police University of China(中国刑警学院学报), 2019, 151: 86.
- [11] Pandey R K, Sankhla M S, Kumar R. Galore International Journal of Applied Sciences & Humanities, 2018; 2(1): 46.
- [12] HOU Jin-ling, ZHANG Jian(侯进令, 张 剑). Forensic Science and Technology(刑事技术), 2015, 40(2): 135.
- [13] ZHANG Ling-yan, WANG Lu-xin(张凌燕, 王璐鑫). Journal of People's Public Security University of China • Science and Technology (中国人民公安大学学报 • 自然科学版), 2020, 26(3): 1.
- [14] Nora M. Hilal, Rania H Twfiq. Egyptian Journal of Chemistry, 2020, 63(2), 653.

- [15] LIAN Yuan-yuan, LI Wei, WANG Gui-qiang, et al(连园园, 李 伟, 王桂强, 等). Forensic Science and Technology(刑事技术), 2011, 1: 23.
- [16] SUI Chun-lai, TAN Yong, ZHANG Ye, et al(隋春来, 谭 勇, 张 烨, 等). Acta Optica Sinica(光学学报), 2021, 1-16(网络首发). <http://kns.cnki.net/kcms/detail/31.1252.o4.20210204.0948.003.html>.
- [17] XU Jing-yang, FANG Shao-bo, ZHOU Jing(徐静阳, 方少波, 周 婧). Acta Physica Sinica(物理学报), 2019, 68(6): 7.
- [18] SUN Mei, CHEN Xing-hai(孙 梅, 陈兴海). Science Technology and Engineering(科学技术与工程), 2015, 15(22): 167.

Study on Rapid Spectral Reappearing and Hyperspectral Classification of Invisible Writing

LI Yun-peng, DAI Xue-jing, WANG Meng, WANG Dan, GAO Yi, WANG Ming-jiu, SHI Xin-lin, LI Ming-ze
Criminal Investigation Police University of China, Shenyang 110854, China

Abstract Rapid and non-destructive detection of invisible handwriting, such as erasure, steganography and covering, is a research difficulty in the field of forensic scientific document inspection. In the current research, the method of switching multi-band light source and filter is mostly used to visualise the invisible handwriting, but the spectroscopy mechanism of invisible handwriting is less analyzed. Therefore, the efficiency of invisible handwriting and the success rate of testing are both not high. In order to improve the efficiency and accuracy of erasure, steganography and covering in document examination, the mechanism and rapid visualization method of the three kinds of invisible handwriting were studied by measuring the excitation and fluorescence spectra, reflection and transmission spectra, and micro-topography. Based on the hyperspectral imaging technology of liquid crystal tunable filter (LCTF) and support vector machine (SVM) classification algorithm, a rapid test method for simultaneous display and classification of invisible handwriting is proposed. Chenguang and Pilot erasable pen, fluorescent writing pen and lemon juice emit strong fluorescence under the excitation of 365 nm long-wave ultraviolet light. The fluorescence wavelength of erasable pen and lemon juice is about 716 nm, and the fluorescence wavelength of fluorescent writing pen is 447 nm. Besides the lemon juice invisible writing can also be effectively visualized by using 254 or 365 nm ultraviolet reflection imaging. In the study of covering handwriting, it is found that the transmittance of a ballpoint pen, marker pen and erasable pen is more than 60% in the infrared band of 700~2 500 nm, and the transmittance of a gel pen is less than 20%. Therefore, the near-infrared band of 850 nm imaging is used to effectively visualize the Chenguang gel pen covered by a Pilot ballpoint pen. The LCTF hyperspectral camera was used to image the three kinds of invisible handwriting in the range of 400~720 nm with a step of 5 nm, and the different handwriting in the image were visualized classified simultaneously by SVM classification algorithm, the total classification accuracy was 99.284 4%, and the Kappa coefficient was 0.959 1. Photoluminescence imaging using a 365 nm light source as an excitation light can effectively visualize erasure and steganography handwriting. Because the reflectivity of different inks in the near-infrared band is quite different, near-infrared imaging can effectively visualize the covering handwriting. SVM classification technology based on LCTF hyperspectral imaging can realize the simultaneous display and classification of different types of invisible handwriting and has high visualization efficiency and classification accuracy.

Keywords Hyperspectral imaging; Document inspection; Excitation spectrum; Fluorescence spectrum; SVM

(Received Jul. 2, 2021; accepted Sep. 18, 2021)