

## 指纹紫外光谱特性研究及变化规律分析

庾金涛<sup>1,2,3</sup>, 李清灵<sup>1,2,3</sup>, 李 磊<sup>1,2,3</sup>, 尹达一<sup>1,2,3\*</sup>

1. 中国科学院红外探测与成像技术重点实验室, 上海 200083
2. 中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083
3. 中国科学院大学, 北京 100049

**摘 要** 指纹的唯一性和终身不变性使得指纹可以验证一个人的身份信息, 在生物识别领域具有广泛的应用。汗潜指纹对紫外线有着特殊的反射、散射以及荧光特性, 所以可以利用紫外波段对汗潜指纹进行提取, 并且不污染现场和目标样本。目前对紫外波段的指纹提取已经有着广泛的研究, 但对指纹随时间变化的研究较少, 一般都是通过化学方法测量汗潜指纹成份含量的变化。研究发现, 指纹各个组成成份的紫外光谱特性不同, 且这些成份随时间的挥发程度也不一致, 利用多通道紫外成像系统对汗潜指纹进行凝视成像, 发现各通道成像 DN 值随时间推移的变化程度并不一样, 可通过研究各通道 DN 值的变化对指纹进行时间分析。首先, 利用紫外光谱仪和氙灯, 对汗液、酒精、食用油等几种手指容易接触的物质反射光谱进行研究, 得到了这些物质的反射光谱特性。然后, 针对这几种类型的指纹, 研制了一套多通道紫外成像设备, 分别在 240~280 nm(通道 1)、320~340 nm(通道 2)以及 340~420 nm(通道 3)三个紫外通道对其进行凝视成像, 得到清晰的指纹图像, 将指纹图像峰线上码值最高的 10 个点的平均值进行比较, 得到不同通道 DN 值与时间变化的关系。实验结果发现, 汗潜指纹在紫外波段具有良好的成像特性, 其成像 DN 值随时间的推移逐渐降低, 其中 240~280 nm 的通道 1 中三个指纹在第七天的成像 DN 值分别降为第一天的 0.62, 0.60 和 0.59; 320~340 nm 的通道 2 中三个指纹在第七天的成像 DN 值分别降为第一天的 0.57, 0.61 和 0.60; 340~420 nm 的通道 3 中三个指纹在第七天的成像 DN 值分别降为第一天的 0.56, 0.63 和 0.58。实验结果表明, 不同类型的指纹在紫外波段的光谱特性并不一致, 成像 DN 并不相同, 且随时间的变化规律也不一样, 但指纹成份的挥发具有一定的规律, 成像 DN 值从第一天到第七天降低至 60%左右, 可以一定程度上反映指纹的挥发性质。结合紫外多通道成像系统, 可以很好的研究指纹的变化规律, 为刑侦探测中指纹研究提供了一个重要的手段。

**关键词** 指纹; 反射光谱; 物质成份; 变化规律

**中图分类号:** TN23

**文献标识码:** A

**DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2019)12-3705-06

### 引 言

随着信息时代的高速发展, 信息安全的重要性与日俱增, 基于生物特征的身份识别也逐渐取代了传统的账号密码形式。生物识别技术即利用人的生理特征如人脸、指纹、虹膜等或者行为特征来自动对人的身份信息进行识别的新技术, 其中指纹识别是应用最为广泛的生物识别技术之一, 在考勤、银行、刑侦等领域都发挥了重要的作用<sup>[1]</sup>。指纹因人而异, 因指而异, 具有唯一性以及终身不变性, 在公安刑侦

中起到了十分重要的作用。传统的指纹提取是利用碘熏或灰粉等化学方法, 但往往会破坏现场及目标样本, 在很多场合的局限性较大<sup>[2]</sup>。由于指纹对紫外光反射异于背景的特性, 基于紫外光照射对客体指纹进行提取逐渐应用开来。然而, 指纹的变化规律, 往往对案件案情发生时间点的侦破起到关键作用, 研究案发现场指纹变化规律的重要性愈发明显。

目前对指纹的变化规律的研究很少。国外 Weyermann<sup>[3]</sup>和 Agnes 等<sup>[4]</sup>团队利用 GC-MS 检测手段研究指纹物质成份中的角鲨烯和胆固醇, 通过测定这些物质的含量变化及其比值来判断指纹的遗留时间。国内戎辉等<sup>[5]</sup>也尝试通过分析指

**收稿日期:** 2018-09-25, **修订日期:** 2019-01-30

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(40776100)资助

**作者简介:** 庾金涛, 1993 年生, 中国科学院上海技术物理研究所博士研究生 e-mail: yjt0308@mail.ustc.edu.cn

\* 通讯联系人 e-mail: yindayi@mail.sitp.ac.cn

纹成份中尿素与氨基酸的浓度来研究指纹的变化规律。黄璐璐等<sup>[6]</sup>利用质谱的成像方法对指纹化学成分进行结构鉴定,通过指纹中不饱和脂肪酸的氧化程度来推断指纹的残留时间。这些基于化学反应的方法对物质含量的测量计算误差较大,而且每次都会破坏指纹样本,所以需要多个样本来进行实验。本文通过紫外成像的光学无损方法,分析指纹一些常见物质的紫外反射光谱,利用自研的紫外多通道指纹成像系统,对汗潜指纹进行连续多天的凝视成像,发现各个通道的成像码值随时间变化具有一定的规律。

## 1 常见指纹物质的反射光谱

### 1.1 指纹中的物质成份

指纹中的分泌物和人体的代谢有关,所以指纹中的微量化学成份与生物体的饮食活动相关。一般来说,指纹分泌物

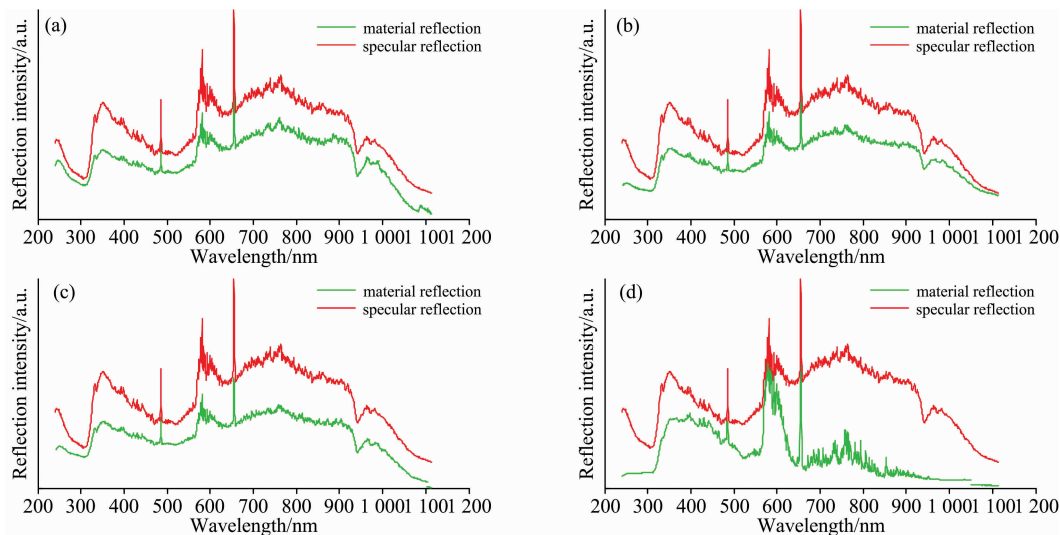


图 1 4 种物质的反射强度

(a): 汗液的反射强度; (b): 酒精的反射强度; (c): 食用油的反射强度; (d): 唾液的反射强度

Fig. 1 The reflection intensity of the four material

(a): Reflection intensity of sweat; (b): Reflection intensity of alcohol;

(c): Reflection intensity of edible oil; (d): Reflection intensity of saliva

对于两个反射平面,其中之一为待测平面,光谱反射率为  $R_{\text{unknown}}(\lambda)$ ,另一平面的光谱反射率情况已知,为  $R_{\text{reflect}}(\lambda)$ 。入射光辐射保持不变,定义为  $I(\lambda)$ 。探测器光学系统的响应曲线为  $O(\lambda)$ ,电学系统的光谱响应曲线为  $r(\lambda)$ 。

分别对已知平面与待测平面进行测量,对于已知平面,探测器的输出  $V_1$  可以表示为

$$V_1(\lambda) = I(\lambda) \times R_{\text{reflect}}(\lambda) \times O(\lambda) \times r(\lambda) \quad (1)$$

对于待测平面,探测器的输出  $V_2$  可以表示为

$$V_2(\lambda) = I(\lambda) \times R_{\text{unknown}}(\lambda) \times O(\lambda) \times r(\lambda) \quad (2)$$

由式(1)与式(2),可以得到待测平面的光谱反射率  $R_{\text{unknown}}(\lambda)$  的表达式

$$R_{\text{unknown}}(\lambda) = V_2(\lambda) \times R_{\text{reflect}}(\lambda) / V_1(\lambda) \quad (3)$$

通过实验获得两次的探测器输出数据,由于  $R_{\text{reflect}}(\lambda)$  为光滑的平面镜反射,看作为 1,即对所有波段都是完全反射,

中的成分包括蛋白质、油脂、糖分等,除此之外人类手指容易接触到的一些物质也会出现在指纹纹印中,如食用油、酒精、灰尘、唾液等。由于指纹是由凸起的“嵴线”和凹陷的“谷线”间隔分布,直接测指纹的反射光谱十分困难,所以本文改进测试方法,将这些手指容易接触的物质涂抹至整个平面,然后通过光谱仪测量其反射光谱。

### 1.2 常见物质反射光谱的测量

针对常见指纹成分物质的反射吸收波长特性,实验采用氙灯作为光源,光谱仪的光谱范围在 200~1 100 nm,测试方法是:首先选取合适的角度,固定好光源,反射平面以及光谱仪,测量光源经过光滑的镜面反射的光谱反射强度,然后在镜面上均匀涂抹上待测量物质,通过对比镜面反射以及在镜面上均匀涂抹实验物质后的反射光谱,反演计算得到这些物质在紫外波段的反射率。

在夜晚的室内,得到的各物质的反射光强度图 1 所示。

以此可以求得待测平面的光谱反射率。

根据该式得到的相对反射率如图 2 所示。

可以发现,汗液在 240~300 nm 反射率最高,达到 80%;酒精在 310 nm 左右有个反射峰,但在紫外波段整体反射率并不高,而在近红外波段反射率明显提升;食用油在 300 nm 有一个反射峰,在其余波段的反射率较为平稳;唾液在紫外波段的反射并没有优势,在 430 和 580 nm 两个可见波段出现反射峰。

汗潜指纹成分较为复杂,主要由汗液组成,有时也会沾染酒精、油等物质,但从整体来看,汗潜指纹在紫外波段尤其是 220~350 nm 间的反射特性明显,主要是因为有机物在该波段具有很强的反射特性,而有机物的挥发对这一波段的光谱影响很大。

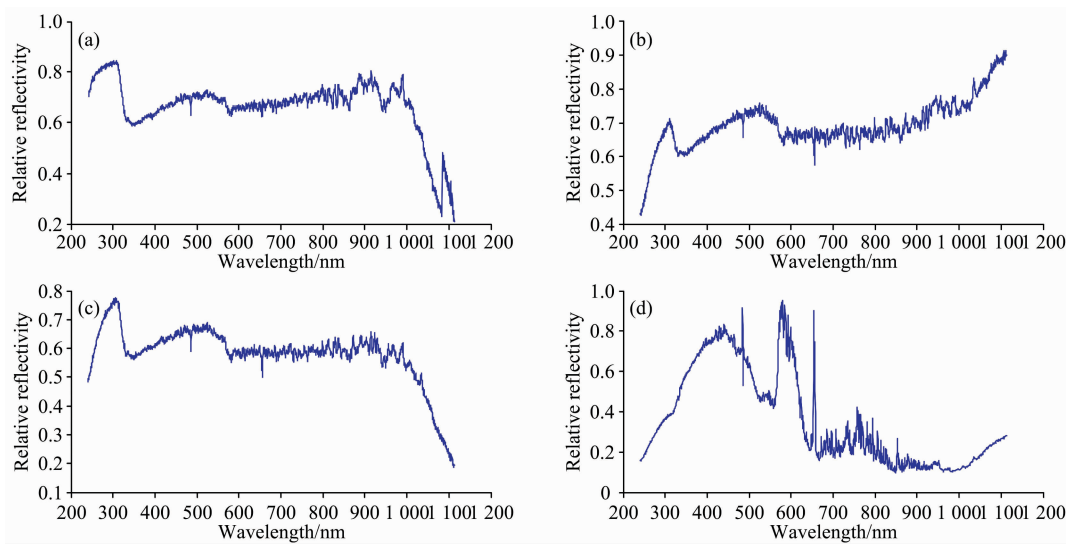


图 2 4 种物质的相对反射率

(a): 汗液的相对反射率; (b): 酒精的相对反射率; (c): 食用油的相对反射率; (d): 唾液的相对反射率

Fig. 2 The relative reflectance of the four material

(a): Relative reflectivity of sweat; (b): Relative reflectivity of alcohol;  
(c): Relative reflectivity of edible oil; (d): Relative reflectivity of saliva

表 1 4 种物质反射率比较

Table 1 Comparison of the relative reflectance of the four material

目标物质	反射峰值波段/nm	反射率/%
汗液	240~300	82
酒精	近红外	>85
食用油	300	78
唾液	430 和 580	90

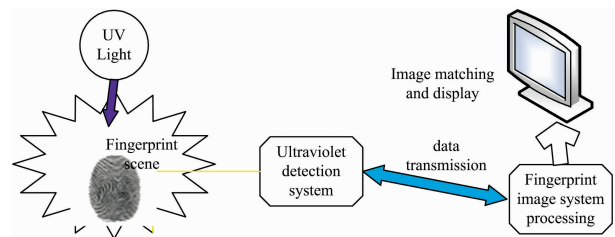


图 3 紫外多通道成像系统对指纹采集现场示意图

Fig. 3 Ultraviolet multichannel imaging system schematic diagram of fingerprints collected on the spot

## 2 指纹紫外多通道成像系统

指纹是案发现场最常见到的证据,其成分较为复杂,一般由蛋白质、油脂等有机物组成。根据不同成分物质的反射光谱的差异,实验室自制了一套多通道紫外成像系统,从 240~280, 280~315 以及 315~340 nm 三个紫外波段对沾染了酒精、食用油、唾液以及汗液的指纹进行成像,整个流程如图 3 所示。

系统光源选取氙灯光源,其光谱范围在 200~1 100 nm。紫外成像系统的探测器采用的是像元面阵 CCD 探测器,通过步进电机控制滤光片分别选择 240~280 nm(通道 1)、320~340 nm(通道 2)以及 340~420 nm(通道 3)三个紫外波段来进行成像,获取清晰的汗潜指纹图像,最后通过千兆以太网口将成像数据上传至上位机进行分析处理。

为防止外界光线的影响,实验时间选在夜晚,在玻璃表面按下指纹目标,利用多通道成像系统和光源进行主动成像,得到指纹样本在灯源下的反射图像,结果如图 4 所示。

系统的几个波段都已经做过定标,成像获得的图像 DN 值即为相应的码值,目标辐亮度与 DN 码值之间的对应关系为  $L=a \cdot DN+b$ ,其中  $a$  和  $b$  是反演模型的系数,本系统中

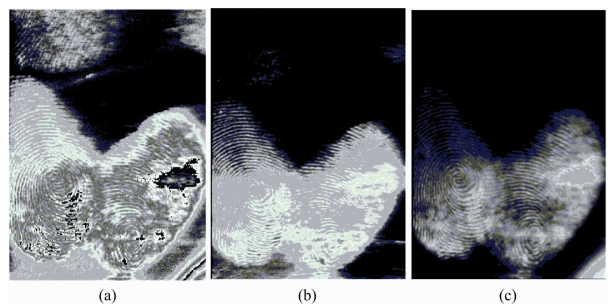


图 4 各通道指纹图像

(a): 240~280 nm 通道指纹图像; (b): 280~315 nm 通道指纹图像;  
(c): 315~340 nm 通道指纹图像

Fig. 4 Fingerprint images of Each channel

(a): 240 to 280 nm channel fingerprint image; (b): 280 to 315 nm channel fingerprint image; (c): 315 to 340 nm channel fingerprint image pseudo color map

取  $a=1.72 \times 10^{-4}$ ,  $b=-5 \times 10^{-4}$ 。每 100 码值对应的辐亮度为  $1.67 \times 10^{-6} \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$ 。由于指纹成分主要分布

在指纹图像峰线上, 实验过程中使用指纹图像峰线上最大的 10 个码值的平均值来反演该通道的目标辐亮度。计算结果如表 2 所示。

表 2 各通道反演计算结果

Table 2 Inversion calculation results of each channel

通道	通道 1	通道 2	通道 3
汗液平均码值	232	166	101
对应的辐亮度/( $10^{-6} \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$ )	3.87	2.77	1.68
酒精平均码值	153	216	201
对应的辐亮度/( $10^{-6} \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$ )	2.55	3.61	3.36
食用油平均码值	164	228	185
对应的辐亮度( $10^{-6} \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$ )	2.73	3.80	3.08
唾液平均码值	102	155	181
对应的辐亮度( $10^{-6} \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$ )	1.70	2.58	3.02

从图表中可以发现, 汗液在 240~280 nm 的反射最强, 该通道的成像码值仍然最大, 反演出的辐亮度是通道 3 的两倍多; 酒精在 280~315 nm 的通道 2 的辐亮度也大于通道 1 和通道 3; 食用油在通道 2 的码值最大, 反演出的辐亮度最强; 唾液在 315~340 nm 的通道 3 辐亮度最强。整体来看, 在通道 1 辐亮度最强的是汗液, 通道 2 辐亮度最强的是食用油; 通道 3 辐亮度最强的是酒精。由实验结果可以看出, 虽然这几种物质在紫外波段的反射都较强, 不同物质在不同波段的辐亮度不同, 根据指纹成分的不同, 可以选择最佳的探测波段。

### 3 指纹随时间变化的成像实验

本次实验用的多通道相机的三个波段分别为 240~280, 280~315 以及 315~340 nm。指纹分泌物中的成分包括蛋白质、油脂、糖分等<sup>[6]</sup>, 每种物质的反射光谱并不相同, 且这

些物质随着时间的变化其含量也有所不同, 假设某一时刻 240~280 nm 通道的成像码值为

$$C_1 = \int_{240}^{280} O(\lambda) \times r(\lambda) \times [x_1(\lambda) + x_2(\lambda) + \dots + x_n(\lambda)] d\lambda \quad (4)$$

其中  $x_1(\lambda)$ ,  $x_2(\lambda)$ ,  $x_n(\lambda)$  为各个成分的反射光谱曲线,  $O(\lambda)$  为探测器光学系统响应曲线,  $r(\lambda)$  为电学系统响应曲线。则 280~315 nm 通道的成像码值为

$$C_2 = \int_{280}^{315} O(\lambda) \times r(\lambda) \times [x_1(\lambda) + x_2(\lambda) + \dots + x_n(\lambda)] d\lambda \quad (5)$$

过一段时间后, 每一种物质的含量都有所不同, 此时, 240~280 nm 通道的成像码值为

$$C'_1 = \int_{240}^{280} O(\lambda) \times r(\lambda) \times [m_1 x_1(\lambda) + m_2 x_2(\lambda) + \dots + m_n x_n(\lambda)] d\lambda \quad (6)$$

其中  $m_1, m_2, \dots, m_n$  为各个成分挥发后占初始量的比重。280~315 nm 通道的成像码值为

$$C'_2 = \int_{280}^{315} O(\lambda) \times r(\lambda) \times [m_1 x_1(\lambda) + m_2 x_2(\lambda) + \dots + m_n x_n(\lambda)] d\lambda \quad (7)$$

只有当  $m_1 = m_2 = \dots = m_n$  时,  $C_1/C_2 = C'_1/C'_2$ 。也就是说, 随着时间的推移, 指纹各个成分挥发的程度不同, 则各通道码值变化程度也不同, 但同一成分对各个通道的贡献具有一定的相关关系。

据此, 本研究设计了如下实验。三名人员分别在同一镜面上按上一个指纹, 将其放在室内环境中, 分别在 1, 2, 3, 4, 5, 6 和 7 d 的同一时间段, 在同一位置, 同样的光源强度下, 用多通道相机的三个通道进行成像。由于指纹成分主要集中在指纹峰线上, 所以采用所成的指纹图像峰线上的最大 10 个码值的均值作为该通道的值。

每个通道三个指纹的成像码值随时间变化如图 5 所示。

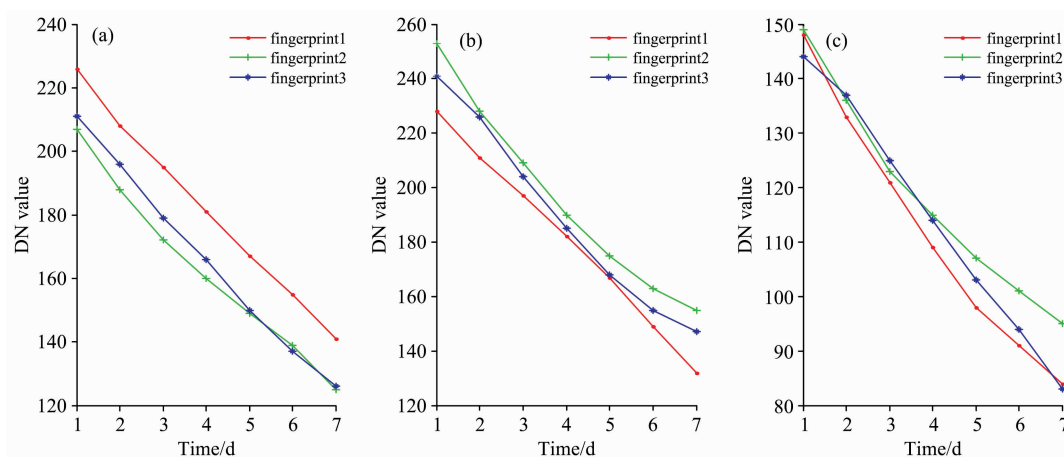


图 5 各通道三个指纹的成像码值随时间变化图

(a): 通道 1 三个指纹成像码值随时间变化; (b): 通道 2 三个指纹成像码值随时间变化;  
(c): 通道 3 三个指纹成像码值随时间变化

Fig. 5 The imaging code value of three fingerprints of each channel changes with time

(a): Three imaging code values change with time in channel 1; (b): Three imaging code values change with time in channel 2;  
(c): Three imaging code values change with time in channel 3

可以看出,不同的指纹成像码值具有一定的差异,但随时间的变化具有一定的规律。三个指纹在 240~280 nm 的通道 1 的成像码值分别从第一天的 226, 207 和 211 降低至第七天的 141, 125 和 126, 即第七天的成像码值分别为第一天的 0.62, 0.60 和 0.59; 三个指纹在 320~340 nm 的通道 2 的成像码值分别从第一天的 228, 253 和 241 降低至第七天的 132, 155 和 147, 即第七天的成像码值分别为第一天的 0.57, 0.61 和 0.60; 三个指纹在 340~420 nm 的通道 3 的成像码值分别从第一天的 148, 149 和 144 降低至第七天的 84, 95 和 83, 即第七天的成像码值分别为第一天的 0.56, 0.63 和 0.58。不同通道第七天的成像码值为第一天的 0.6 左右, 这与指纹成分的挥发特性有关。利用多波段成像系统, 可以较好地研究指纹随时间的变化规律。

## References

- [1] SUN Dong-mei, QIU Zheng-ding, et al(孙冬梅, 裘正定, 等). Acta Electronica Sinica(电子学报), 2001, 29(S1): 1744.
- [2] WANG Jin-yu, LEI Ming, et al(王金玉, 雷 鸣, 等). Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析), 2018, 38(1): 26.
- [3] Weyermann C, Roux C, Champod C. J. Forensic. Sci., 2011, 56(1): 102.
- [4] Agnes K, Aline G, Celine W. J. Forensic. Ident., 2011, 61(6): 652.
- [5] RONG Hui, LIN Zi-qing, et al(戎 辉, 林子清, 等). Chinese Journal of Forensic Medicine(中国法医学杂志), 2017, 32(6): 552.
- [6] HUANG Lu-lu, TANG Xue-mei, ZHANG Wen-yang, et al(黄璐璐, 唐雪妹, 张文洋, 等). Chinese Chemical Society National Mass Spectrometry Academic Report Meeting(中国化学会全国质谱分析学术报告会会议). 2015.

## Ultraviolet Multi-Channel Imaging of Sweat Latent Fingerprints and Analysis of Its Characteristics Over Time

YU Jin-tao<sup>1, 2, 3</sup>, LI Qing-ling<sup>1, 2, 3</sup>, LI Lei<sup>1, 2, 3</sup>, YIN Da-yi<sup>1, 2, 3\*</sup>

1. Key Laboratory of Infrared System Detection and Imaging Technology, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China
2. Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China
3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract** The uniqueness and lifetime invariance of fingerprints enable fingerprints to verify a person's identity information, which has a wide range of applications in the field of biometrics. The sweat latent fingerprint has special reflection, scattering and fluorescence characteristics for ultraviolet light, so the sweat latent fingerprint can be extracted by the ultraviolet band, and the scene and target samples are not polluted. At present, there are extensive researches on fingerprint extraction in the ultraviolet band, but there are few studies on the change of fingerprint with time. Generally, the changes of the content of sweat latent fingerprint components are generally measured by chemical methods. The study found that the UV spectral characteristics of each component of the fingerprint are different, and the volatilization degree of these components is also inconsistent with time. The multi-channel UV imaging system is used to perform gaze imaging on the sweat latent fingerprint, and the DN value of each channel is found to change with time. The degree is not the same, and the fingerprint can be timely analyzed by studying the change of the DN value of each channel. First, the reflectance spectra of substances that are easily contacted by fingers such as sweat, alcohol, and edible oil were studied by ultraviolet spectrometer and xenon lamp, and the reflection spectrum characteristics of these materials were obtained. Then, for these types of fingerprints, a multi-channel UV imaging device was developed, which has three UV channel pairs at 240~280 nm (channel 1), 320~340 nm (channel 2) and 340~420 nm (channel 3). The gaze imaging was performed to obtain a clear fingerprint image, and the average values of the 10 points with the highest code value on the fingerprint image were compared, and the relationship between the DN value and the time change of different channels was obtained. The experimental results show that the sweat latent fingerprint has good imaging characteristics in the ultraviolet

## 4 结 论

指纹由于其成分复杂,且不同成分随时间的挥发程度也不一样。设计了一套多通道成像系统,对指纹进行连续 7 天的多通道成像实验。实验结果表明,不同通道成像 DN 值与物质成分有关,差异较大;但各通道 DN 值随时间推移有着一定的变化规律,第七天的成像码值均降低至第一天的 0.6 左右,通过紫外多波段成像可以分析指纹成分的挥发特性,为公安刑侦指纹时间特性的研究提供了重要手段。另一方面,由于实验条件的局限性,本文的三个通道的波段选取对各成分光谱曲线的区分度不是最好的,后面可以进一步结合指纹成分光谱曲线进行更为细致的滤光片的选取。

band, and its imaging DN value gradually decreases with time. The imaging DN values of the three fingerprints in channel 1 of 240~280 nm were reduced to the first day. The imaged DN values of the three fingerprints in channel 2 of 320~340 nm on day 7 decreased to 0.57, 0.61, and 0.60 on the first day, respectively; the three fingerprints in channel 3 of 340~420 nm were respectively reduced by 0.62, 0.60, and 0.59. The imaging DN values on the seventh day were reduced to 0.56, 0.63, and 0.58 on the first day, respectively. The experimental results show that the spectral characteristics of different types of fingerprints in the ultraviolet band are not consistent, the imaging DN is not the same, and the law of change with time is different, but the volatilization of fingerprint components has a certain law, imaging DN value from the first day By the seventh day, it will be reduced to about 60%, which can reflect the volatile nature of the fingerprint to some extent. Combined with the ultraviolet multi-channel imaging system, the variation law of fingerprints can be well studied, which provides an important means for fingerprint research in criminal investigation.

**Keywords** Fingerprint; Reflection spectrum; Material composition; Variation law

(Received Sep. 25, 2018; accepted Jan. 30, 2019)

\* Corresponding author

### 期刊引证信息快报

据中国科学技术信息研究所 2019 年 11 月 19 日发布: 物理类(38 种期刊)

光谱学与光谱分析					
影响因子		总被引频次		综合评价总分	
排名	数值	排名	数值	排名	数值
3	0.799	3	4 978	3	66.4

据中国科学技术信息研究所 2019 年 11 月 19 日发布: 化学类(39 种期刊)

光谱学与光谱分析					
影响因子		总被引频次		综合评价总分	
排名	数值	排名	数值	排名	数值
16	0.799	1	4 978	1	71.3

据中国知网(CNKI) 2019 年 10 月 28 日发布: 物理类(48 种期刊)

光谱学与光谱分析								
影响因子		总被引频次		影响力指数		总下载量		分区
排名	数值	排名	数值	排名	CI 值	排名	数值	Q1
8	0.873	3	5 779	3	747.941	2	35.38 万次	

据中国知网(CNKI) 2019 年 10 月 28 日发布: 化学类(51 种期刊)

光谱学与光谱分析								
影响因子		总被引频次		影响力指数		总下载量		分区
排名	数值	排名	数值	排名	CI 值	排名	数值	Q1
20	0.873	1	5 779	1	1 011.267	1	35.38 万次	

▲根据 2018 年度中国科技论文与引文数据库(CSTPCD)统计结果,《光谱学与光谱分析》荣获 2018 年“百种中国杰出学术期刊”称号。

▲根据 2019 年度中国知网(CNKI)统计结果,《光谱学与光谱分析》荣获“2019 中国最具国际影响力学术期刊”称号。