

基于高光谱成像技术的不同介质血迹陈旧度研究

冯颖¹, 蔡竞^{1,2,3*}

¹浙江警察学院刑事科学技术系, 浙江 杭州 310053;

²基于大数据架构的公安信息化应用公安部重点实验室, 浙江 杭州 310053;

³浙江省毒品防控技术研究重点实验室, 浙江 杭州 310053

摘要 提出一种基于高光谱成像技术的血迹陈旧度无损预测方法。利用高光谱成像仪获取白瓷砖、白纸、白棉布 3 种介质上不同陈旧度的血迹光谱图像, 筛选 550~800 nm 特征光谱波段, 并通过人工神经网络模型实现血迹遗留时间的预测。结果表明: 在实验室环境下, 30 h 内 3 种介质上的血迹遗留时间预测的回归分析决定系数(R^2)均大于 0.9930, 预测方均根误差(RMSEP)为 18.29 min, 中位相对误差(δ_M)平均值为 8.05%, 可见该方法能对较短时间内的血迹陈旧度进行有效预测。

关键词 光谱学; 高光谱成像; 血迹; 特征光谱; 人工神经网络; 遗留时间

中图分类号 O433.4

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP57.053004

Age Estimation of the Bloodstains on Different Substrates Based on the Hyperspectral Imaging Technology

Feng Ying¹, Cai Jing^{1,2,3*}

¹Department of Forensic Science, Zhejiang Police College, Hangzhou, Zhejiang 310053, China;

²Key Laboratory of Public Security Information Application Based on Big-Data Architecture
Ministry of Public Security, People's Republic of China, Hangzhou, Zhejiang 310053, China;

³Key Laboratory of Drug Prevention and Control Technology of Zhejiang Province, Hangzhou, Zhejiang 310053, China

Abstract In this study, we propose a nondestructive method based on hyperspectral imaging technology to determine the bloodstain age. The spectral images of the bloodstains on a white ceramic tile, white paper, and white cotton cloth with different aging times can be obtained using a hyperspectral imager and can be characterized in the spectral range of 550–800 nm. Further, the bloodstain age is predicted using an artificial neural network model. The results indicate that the regression coefficients of the aging time of bloodstains for the three samples are larger than 0.9930 within 30 h under the laboratory conditions. The average root mean square error of prediction (RMSEP) is 18.29 min, and the median relative error δ_M is 8.05%. Thus, the proposed method is observed to be effective for estimating the aging time of the bloodstains in a short time (<30 h).

Key words spectroscopy; hyperspectral imaging; bloodstain; characteristic spectrum; artificial neural networks; aging time

OCIS codes 300.6550; 200.4260; 170.1470

1 引言

血迹是暴力流血案件中常见的重要物证, 对血迹的物质属性进行检测分析, 可为案件侦破提供关

键信息^[1]。目前血迹的检测方法主要有基因分析法、高效液相色谱法、电泳法等, 而这些方法都属于有损检测, 且操作较为复杂、物材损耗量大, 因此在检测过程中, 选择一种无损、灵敏且耗时短的方法将

收稿日期: 2019-05-08; 修回日期: 2019-07-19; 录用日期: 2019-09-04

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0800906)、公安部科技强警基础工作专项(2018GABJC34)、浙江省教育厅科研项目(Y201737880)

* E-mail: caijing@zjpcxy.cn

更为重要^[2]。高光谱成像技术具有图谱合一的优点,其影像包含各物体的空间几何信息和光谱物理信息,能够有效反映出物质的细微光学性质变化,因此该技术正逐渐被应用于血迹的各类分析研究中。

高光谱成像技术检测到光与血液相互作用后,通过光谱曲线上的峰值位置和相对强度反映出血液成分的分子结构特性^[3],实现物质识别与区分。Kuula 等^[4]利用短波红外高光谱相机成功分离出 4 个人的血样;Yang 等^[5]探究了血液和非血液样本间的光谱差异;赵明富等^[6]采用高光谱成像技术对同种介质的不同血迹进行分类识别;冯小平^[7]提出将小波变换的高光谱图像融合方法应用到血迹形态特征检测中;齐敏璐等^[8]运用近红外光谱成像技术在复杂背景下高效识别出肉眼难以观察到的血迹。目前,针对血迹陈旧度的研究,其本质是分析化合物成分随时间的变化关系,已有研究将血液中白细胞的 mRNA 与 tRNA 的比值作为血迹陈旧度的判别指标^[9],血清中各类球蛋白的浓度变化也可作为出血时间的判断基础^[10],但运用最多的还是检测血细胞内部的物质变化。当血液离开人体后,细胞代谢发生改变,血红蛋白从细胞内释入血浆,随着时间的推移其物质性质发生变化,导致血液光谱值发生变化,而光谱差异信息可以作为识别目标的重要依据。Edelman 等^[11]使用高光谱成像仪预测 0~200 d 的血迹,选取遗留时间为 0.1, 2, 15, 40, 200 d 的血迹进行研究,发现血迹陈旧度的预测绝对误差随时间的增长而增大;Li 等^[12]在此基础上将 550 nm 和 520 nm 处的光谱强度之比作为血迹遗留时间的衡量参数,进行了 30 d 内的血迹陈旧度预测;Bergmann 等^[13]又通过数据降维和 k 近邻(KNN)分类算法预测了 3 周内的血迹遗留时间。目前鲜有将高光谱成像技术应用于较短时间内血迹陈旧度的研究。

本文以白瓷砖、白纸和白色棉质布料上的血迹为研究对象,使用高光谱仪获取 30 h 内的血迹光谱图像,利用 ENVI 软件选取感兴趣区域(ROI),通过特征观察,选择 550~800 nm 波段的光谱数据建立神经网络预测模型,与全光谱波段建立的模型进行比较分析,并对结果进行验证,实现一定条件下血迹陈旧度的快速预判。

2 实验

2.1 材料

实验样本为在某健康无吸烟史男性志愿者左手

无名指末端采集的新鲜血液,选取 3 种渗透性能不同且在实际案件中易存留血迹的介质,分别为白色瓷砖、白纸、白色棉质布料,在每种介质上滴 3 滴血液形成血迹,如图 1 所示。在法医实践中,由于发现血迹的环境存在温度等差异,会影响到血迹内的化学反应^[14],因此实验过程中控制环境温度为 20 ℃。每相隔一段时间(15, 30, 60, 90, 120, 180, 240, 300, 360, 1800 min)使用高光谱仪对 3 种介质上的血迹进行光谱图像采集。

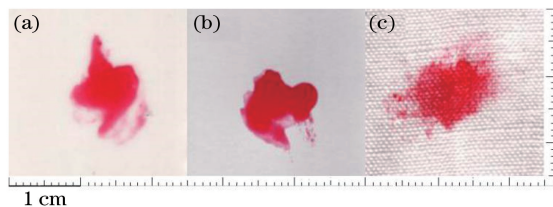


图 1 3 种介质上的血迹样本。(a)白色瓷砖;
(b)白纸;(c)白色棉质布料

Fig. 1 Bloodstain samples on three substrates. (a) White ceramic tile; (b) white paper; (c) white cotton cloth

2.2 高光谱成像系统

本实验使用的仪器为美国 Headwall Photonics 公司生产的 Hyperspec-VNIR E 系列高光谱成像仪,光谱测定范围为 400~1000 nm。使用的高光谱成像系统部件包括高光谱成像主机、室内线扫平台(线性移动距离为 250 mm,步进精度为 0.5 μm)、计算机、控制软件(Hyperspec III)等。该系列光谱相机采用同轴反射式全息光栅分光技术和超低杂散光的设计, $F/2.0$ 的大光圈可实现高光通量和高信噪比,光谱分辨率为 5 nm,光源为 150 W 石英卤素钨灯,辐射波长范围为 400~2500 nm。

2.3 高光谱数据采集与校正

本实验搭建了高光谱实验平台,利用高光谱成像技术采集血迹图谱信息,采用神经网络算法对血迹遗留时间进行预测,其具体流程如图 2 所示。

对血迹高光谱图像进行采集,根据高光谱仪扫描平台的连接要求,连接调试好所有设备,设置合适的设备参数以保证扫描的高光谱图像具有较高的质量。本实验中设置相机曝光时间为 0.04 s,平台移动速度为 2.1 mm/s,扫描范围为 150~205 mm。为了消除不同波段下光源强度分布不均的差异及暗电流噪声的影响,对采集到的光谱图像进行黑白校准^[15],其校准公式为

$$R = \frac{I - B}{W - B}, \quad (1)$$

式中: R 为校准后的光谱图像; I 为原始高光谱图

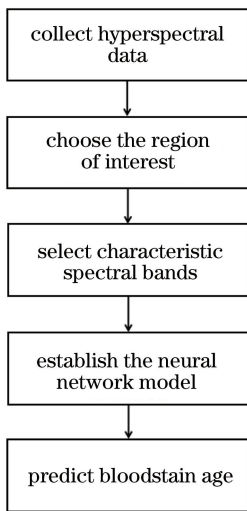


图2 本文方法的流程图

Fig. 2 Flow chart of proposed method

像; B 为全黑校准图像; W 为全白校准图像。

3 结果与讨论

3.1 样本光谱曲线分析

获得样本高光谱图像后,使用 ENVI 软件分别对白瓷砖、白纸、白色棉质布料 3 种介质上的血迹样本选取 ROI。在成像条件下,保证同种介质上不同陈旧度的血迹样本所选取的 ROI 形状及位置相同,且每个 ROI 均包含 1000 个像元。通过对每个样本上 1000 个像元对应的光谱曲线求平均,得到血迹样本在 3 种介质上不同遗留时间下的平均光谱曲线,如图 3 所示。

由图 3 可知,血迹的光谱图像存在以下特征: 1)新鲜血液在 400~1000 nm 波段内存在 3 个光谱波峰,分别位于 500 nm、556 nm、694 nm 处,且相对反射率最大值出现在 694 nm 处; 2)当波长处于 575~750 nm 范围内,光谱曲线呈迅速上升趋势,血迹相对反射率明显增大; 3)当波长大于 700 nm 时,血迹光谱值变化幅度较小,曲线趋于平缓。同种介质上的血迹光谱曲线变化与时间存在一定的相关性,随着遗留时间的增长,血迹的相对反射率总体呈下降趋势。介质的材质性质不同,对光的吸收和反射程度不同,这会对血迹光谱值产生一定的影响,因此不同介质上的血迹相对反射率范围存在差异。目前已有相关研究表明,当血液离开人体后,其中的氧血红蛋白(HbO_2)会自氧化成高铁血红蛋白(MetHb),而高铁血红蛋白又会变性为半血色质(HC)^[11],这些内部物质的变化会导致血迹光谱反射率发生变化,因此可以利用高光谱成像技术进行

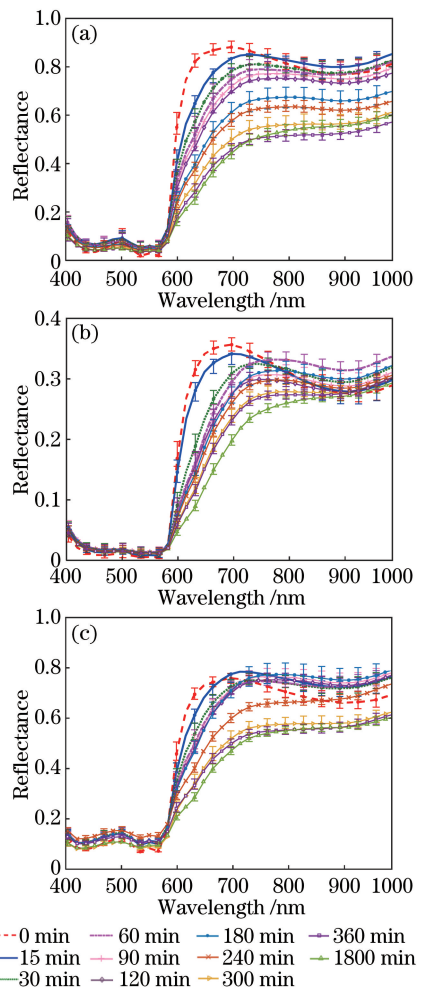


图3 3种介质中不同遗留时间的血迹光谱曲线。

(a)白色瓷砖;(b)白纸;(c)白色棉质布料

Fig. 3 Spectral curves of bloodstains in three substrates

with different aging time. (a) White ceramic tile;

(b) white paper; (c) white cotton cloth

血迹陈旧度的无损检测。

3.2 血迹陈旧度预测

人工神经网络(ANN)具有自适应性,可通过学习和训练找到输入和输出之间的内在关系,能够对具有数量多、各波段相关性强、运算量大等特点的高光谱数据进行有效处理,已被广泛应用于光谱图像的分析研究中^[16-20],本研究使用 ANN 算法对 3 种介质上的血迹开展陈旧度预测。高光谱仪全波长范围为 400~1000 nm,由于血迹原始高光谱曲线在 550~800 nm 范围内,随时间增长存在相对反射率逐渐减小的波段,且位于 576 nm 附近的含氧血红蛋白反射带以及分别位于 600 nm 和 650 nm 附近的高铁血红蛋白和半血色质反射带都包含在此波段区间内^[13],因此选择 550~800 nm 波段作为特征光谱进行血迹陈旧度预测,并将其与原始光谱波段的

预测效果进行比较。本实验采用的 ANN 结构包括输入层、隐含层和输出层,其中隐含层的神经节点为 10 个,输出层的 1 个节点对应血迹遗留时间。在模型建立前,在每种介质上获取的 10 个不同遗留时间下共 10000 个血迹像元中随机提取 6000 个用于模型训练,2000 个用来验证模型的可靠性,剩余 2000 个进行血迹陈旧度预测。

每组数据重复训练并测试 50 次后,取测试结果平均值作为血迹陈旧度预测值,并进行交互验证,血迹预

测时间与实际遗留时间的关系如图 4 所示。不同陈旧度的血迹预测时间误差范围反映出预测值的绝对误差随时间的增长而增大。经比较可得,将 550~800 nm 特征光谱波段作为输入的神经网络模型预测效果更优,所获得的血迹陈旧度预测误差范围总体小于未经筛选的全光谱波段的误差范围。在白瓷砖、白纸、白布 3 种介质上,30 h 内的预测绝对误差在 ± 15 min 的占比分别为 96.25%、80.75%、58.55%,可见该模型对白瓷砖上的血迹陈旧度整体预测效果最佳。

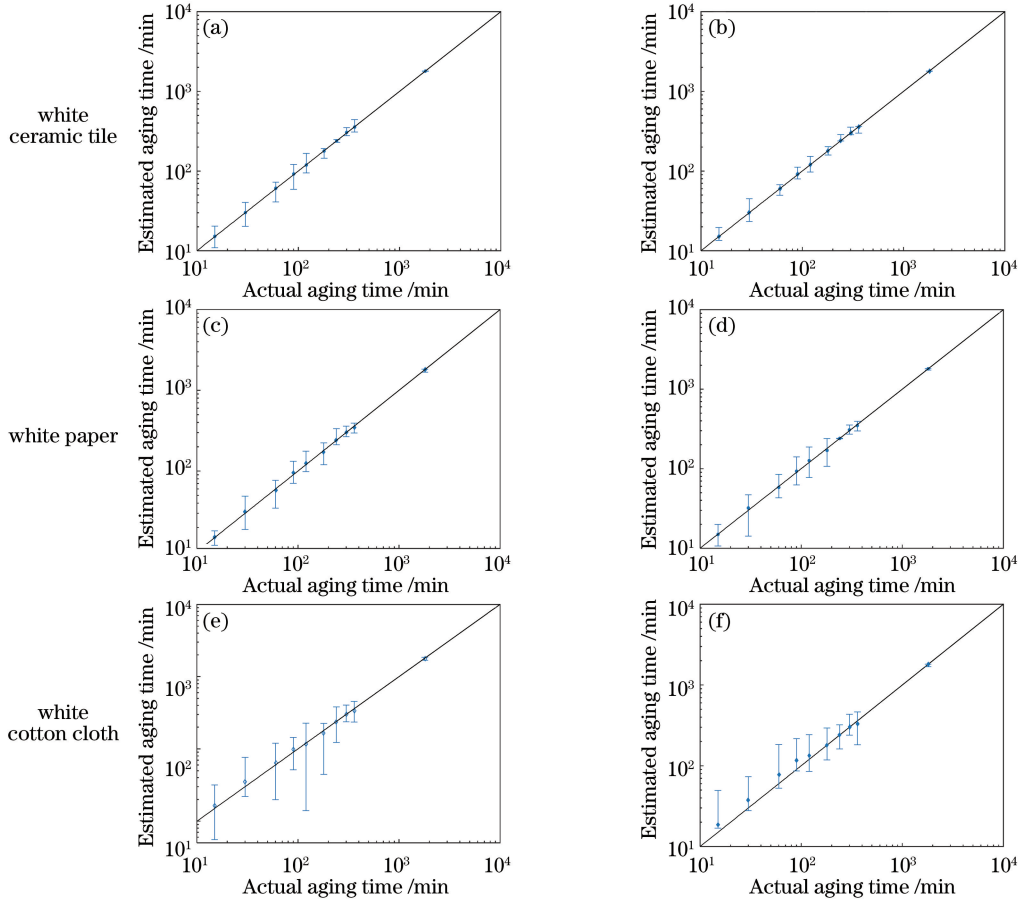


图 4 不同光谱波段内白瓷砖、白纸及白棉布上的预测误差对比。(a)(c)(e) 400~1000 nm;(b)(d)(f) 550~800 nm
Fig. 4 Prediction error comparison of white ceramic tile, white paper, and white cotton cloth in different spectral bands.

(a)(c)(e) 400-1000 nm; (b)(d)(f) 550-800 nm

3.3 预测误差分析

将选取的 550~800 nm 特征光谱波段与采用原始光谱(400~1000 nm)开展血迹陈旧度预测的效果进行比较。验证集的统计参数包括交叉验证的方均根误差(RMSEC)和验证集决定系数(R_c^2),测试集的统计参数为预测方均根误差(RMSEP)和预测集决定系数(R_p^2)。此外,还采用中位相对误差^[11]来评估模型预测准确率,其表达式为

$$\delta_M = \text{median}(|X_i - X|/X \times 100\%), \quad (2)$$

式中: δ_M 为中位相对误差; X_i 为预测时间; X 为血

迹实际遗留时间。在所建立的模型性能评估指标中,方均根误差(RMSE)值越小,决定系数(R^2)越接近 1,中位相对误差(δ_M)值越小,则表明预测效果越好,结果如表 1 所示。

实验结果表明,血迹遗留时间预测的回归分析决定系数均大于 0.98,具有良好的相关性,总体上反映出该模型具有较强的预测能力。神经网络模型在进行血迹遗留时间预测过程中,采用原始高光谱波段作为分析数据时,3 种介质(白瓷砖、白纸、白布)上血迹陈旧度预测的中位相对误差分别为

表 1 血迹不同光谱波段定量分析预测效果性能指标

Table 1 Quantitative analysis of different spectral bands of bloodstains to predict the effect of performance indicators

Substrates	400–1000 nm					550–800 nm				
	R_c^2	RMSEC /min	R_p^2	RMSEP /min	$\delta_M/\%$	R_c^2	RMSEC /min	R_p^2	RMSEP /min	$\delta_M/\%$
Tile	0.9999	5.74	0.9998	6.22	3.20	0.9998	7.29	0.9999	6.13	2.18
Paper	0.9981	22.24	0.9993	13.67	6.71	0.9991	14.69	0.9993	13.17	4.99
Cloth	0.9902	51.98	0.9916	43.53	17.62	0.9896	49.00	0.9935	35.57	16.98

3.2%、6.71%、17.62%；当选择 550~800 nm 光谱波段作为神经网络模型输入数据时，血迹陈旧度预测的中位相对误差分别为 2.18%、4.99%、16.98%。经比较可得，将筛选过的特征光谱波段作为研究对象能够有效降低血迹中其他不相关因素的干扰，血迹陈旧度预测值与实际遗留时间之间的拟合优度增强，预测准确度提高。此外，在这 3 种介质中，对白瓷砖上的血迹预测效果最佳，预测偏差最小，为 6.13 min，而对白纸与白棉布上的血迹预测偏差分别为 13.17 min 与 35.57 min。血液是一种具有黏滞性的液体，在渗透性客体，尤其是棉、麻、化纤等纺织品上，其影像所呈现出的光谱特性往往同时包含两种物质的混合光谱特性，会对高光谱图像的解译以及光谱图像中血迹的检测和分类精度产生一定影响，因此，本实验中以白色棉质布料为介质的血迹陈旧度预测误差明显高于其他两种介质上的预测误差。

4 结 论

采用高光谱成像技术对 3 种介质(白瓷砖、白纸、白色棉质布料)上不同陈旧度的血迹进行分析，使用 ENVI 软件选择相同位置的 ROI，获得不同陈旧度的血迹光谱均值曲线，选取 550~800 nm 特征光谱波段建立血迹陈旧度预测模型，并与全光谱波段建立的模型进行比较。结果表明，将高光谱成像技术与神经网络算法相结合，能够对血迹遗留时间进行定量分析，且选取特征光谱所建立的模型能够获得更好的预测效果。在白瓷砖、白纸、白布 3 种介质上所获得的血迹遗留时间预测中位相对误差平均值为 8.05%，且预测值与实际值之间的绝对偏差平均值为 18.29 min。

高光谱成像技术为 30 h 内血迹陈旧度的判断提供了一种无损、便捷的检测技术，但是由于不同介质上的血迹光谱存在混合像元的干扰，预测模型的准确度受到了一定的影响，因此，血迹高光谱图像解混技术的运用将是下一步研究的重点。

参 考 文 献

[1] Wang Q, Lin H C, Xu J R, et al. Current research

and prospects on postmortem interval estimation[J]. Journal of Forensic Medicine, 2018, 34(5): 459-467. 王琪, 林汉成, 徐纪茹, 等. 死亡时间推断最新研究与展望[J]. 法医学杂志, 2018, 34(5): 459-467.

[2] Zhou B Y, Gao S H. Experimental study on the morphological image analysis of droplet blood stain using convolution neural network [J]. Journal of People's Public Security University of China (Science and Technology), 2018(1): 43-47.

周保宇, 高树辉. 基于卷积神经网络分析滴状血迹形态图像的实验研究[J]. 中国人民公安大学学报(自然科学版), 2018(1): 43-47.

[3] Li G, Liu Y L, Lin L, et al. Application of multi-optical path length modeling in the quantitative analysis of human whole blood[J]. Chinese Journal of Analytical Chemistry, 2007, 35(10): 1495-1498.

李刚, 刘玉良, 林凌, 等. 采用多光程长建模方法检测血液成分含量[J]. 分析化学, 2007, 35(10): 1495-1498.

[4] Kuula J, Puupponen H H, Rinta H, et al. The challenges of analysing blood stains with hyperspectral imaging [J]. Proceedings of SPIE, 2014, 9112: 91120W.

[5] Yang J, Mathew J J, Dube R R, et al. Spectral feature characterization methods for blood stain detection in crime scene backgrounds[J]. Proceedings of SPIE, 2016, 9840: 98400E.

[6] Zhao M F, Li C C, Tang B, et al. Research on the detection of trace blood based on hyperspectral imaging technology[J]. Laser Journal, 2017, 38(5): 45-49.

赵明富, 李成成, 汤斌, 等. 基于高光谱成像技术的微量血迹检测研究[J]. 激光杂志, 2017, 38(5): 45-49.

[7] Feng X P. Study on the morphology and characteristics detection of bloodstains based on hyperspectral imaging technology [D]. Chongqing: Chongqing University of Technology, 2013.

冯小平. 基于高光谱成像技术的血迹形态特征检测研究[D]. 重庆: 重庆理工大学, 2013.

[8] Qi M J, Chen Y H, Wang X Q, et al. Preliminary

- application of NIR spectral imaging technique in searching for crime scene evidence [J]. *Forensic Science and Technology*, 2017, 42(1): 15-20.
- 齐敏璐, 陈奕桦, 王新全, 等. 近红外光谱成像技术在现场物证搜索中的应用研究[J]. *刑事技术*, 2017, 42(1): 15-20.
- [9] Alrowaithi M A, McCallum N A, Watson N D. A method for determining the age of a bloodstain [J]. *Forensic Science International*, 2014, 234: e30-e31.
- [10] Liu X W, Cui X Y, Yu X M, et al. Understanding the thermal stability of human serum proteins with the related near-infrared spectral variables selected by Monte Carlo-uninformative variable elimination [J]. *Chinese Chemical Letters*, 2017, 28(7): 1447-1452.
- [11] Edelman G, van Leeuwen T G, Aalders M C G. Hyperspectral imaging for the age estimation of blood stains at the crime scene [J]. *Forensic Science International*, 2012, 223(1/2/3): 72-77.
- [12] Li B, Beveridge P, O'Hare W T, et al. The age estimation of blood stains up to 30 days old using visible wavelength hyperspectral image analysis and linear discriminant analysis [J]. *Science & Justice*, 2013, 53(3): 270-277.
- [13] Bergmann T, Heinke F, Labudde D. Towards substrate-independent age estimation of blood stains based on dimensionality reduction and k-nearest neighbor classification of absorbance spectroscopic data [J]. *Forensic Science International*, 2017, 278: 1-8.
- [14] Bremmer R H, de Bruin D M, de Joode M, et al. Biphasic oxidation of oxy-hemoglobin in bloodstains [J]. *PLoS ONE*, 2011, 6(7): e21845.
- [15] Wu D, Sun D W, He Y. Application of long-wave near infrared hyperspectral imaging for measurement of color distribution in salmon fillet [J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2012, 16: 361-372.
- [16] Li D M, Jia S H. Application of BP artificial neural network in blood glucose prediction based on multi-spectrum [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(3): 031703.
- 李东明, 贾书海. 基于多光谱应用 BP 神经网络预测血糖 [J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(3): 031703.
- [17] Wang S S, Huang K, Li M, et al. Quantitative optical detection method of hemoglobin based on BP neural network [J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(7): 0717002.
- 王姗姗, 黄凯, 李铭, 等. 基于 BP 神经网络的血红蛋白定量光学检测方法 [J]. *光学学报*, 2018, 38(7): 0717002.
- [18] Yan M, Zhao H D, Li Y H, et al. Multi-classification and recognition of hyperspectral remote sensing objects based on convolutional neural network [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(2): 021702.
- 闫苗, 赵红东, 李宇海, 等. 基于卷积神经网络的高光谱遥感地物多分类识别 [J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(2): 021702.
- [19] Du J, Hu B L, Zhang Z F. Gastric carcinoma classification based on convolutional neural network and micro-hyperspectral imaging [J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(6): 0617001.
- 杜剑, 胡炳樑, 张周锋. 基于卷积神经网络与显微高光谱的胃癌组织分类方法研究 [J]. *光学学报*, 2018, 38(6): 0617001.
- [20] Zhang K, Hei B Q, Zhou Z, et al. CNN with coefficient of variation-based dimensionality reduction for hyperspectral remote sensing images classification [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2018, 22(1): 87-96.
- 张康, 黑保琴, 周壮, 等. 变异系数降维的 CNN 高光谱遥感图像分类 [J]. *遥感学报*, 2018, 22(1): 87-96.