·综述·

激光诱导击穿光谱结合主成分分析在生物医学领域的应用研究

马越[1] 邓美慧[2] 陈建军[1*]

（1. 新疆医科大学医学工程技术学院，乌鲁木齐 830000；2. 新疆四七四医院，乌鲁木齐 830011）

【摘要】 激光诱导击穿光谱（laser-induced breakdown spectroscopy, LIBS）技术是一种通过脉冲激光聚焦样品产生等离子体，进而对等离子体发射光谱进行分析从而得到物质成分和含量的原子发射光谱技术，因该技术具备原位检测、低样品前处理需求、多元素同步检测等优点，在生物医学领域展现出了巨大的潜力。主成分分析（principal component analysis, PCA）作为经典降维技术，在保留LIBS光谱数据主要特征的同时，消除了光谱数据中的冗余变量，能显著提升模型的分类效率。本文回顾了近年来LIBS技术结合PCA算法在生物医学领域应用中的研究状况和最新进展，重点归纳了此类技术和方法在疾病诊断、药物分析和法医学及其他医学相关领域的应用，从优化算法、开发便携式设备及推动多技术融合等角度为未来发展提出了建议，以期为实现精准医疗和实时监测提供参考，为医学研究和临床应用提供支持。

【关键词】 激光诱导击穿光谱；主成分分析；生物医学应用；元素分析

【中图分类号】 TN249; R318.6 【文献标志码】 A 【DOI】 10.11876/mimt202503016

Research on the application of laser-induced breakdown spectroscopy combined with principal component analysis in the field of biomedicine

Ma Yue[1], Deng Meihui[2], Chen Jianjun[1]*

(1. School of Medical Engineering and Technology, Xinjiang Medical University, Urumqi 830000, China; 2. Xinjiang 474 Hospital, Urumqi 830011, China)

【Abstract】 Laser-induced breakdown spectroscopy (LIBS) is an atomic emission spectroscopy technique that generates plasma by focusing pulsed laser on a sample and then analyzes the emitted light spectrum to obtain the composition and content of the substance. Due to its advantages such as in-situ detection, low sample pretreatment requirements, and simultaneous detection of multiple elements, it has shown great potential in the biomedical field. Principal component analysis (PCA), as a classic dimensionality reduction technique, retains the main features of LIBS spectral data while eliminating redundant variables in the spectral data, significantly improving the classification efficiency of the model. This paper reviews the research status and latest progress of LIBS technology combined with PCA in biomedical applications in recent years. It focuses on summarizing the application of such technologies and methods in disease diagnosis, drug analysis, forensic science and other related fields. It provides suggestions for future development from the perspectives of algorithm optimization, development of portable devices, and promotion of multi-technology integration, providing a reference for achieving precise medical treatment and real-time monitoring, and offering support for medical research and clinical applications.

【Key words】 Laser-induced breakdown spectroscopy; Principal component analysis; Biomedical applications; Elemental analysis

---

基金项目：国家自然科学基金项目(31760269)；新疆维吾尔自治区“天山青年计划”培养项目(2018Q021)

第一作者：马越，男，硕士研究生，研究方向：生物信息处理

通信作者：陈建军，男，博士研究生，教授，研究方向：生物信息处理

激光诱导击穿光谱（laser-induced breakdown spectroscopy, LIBS）是一种分析光谱技术，它通过分析样品内部或表面产生的等离子体发射出的光谱，来对样品中的元素进行定量和定性分析[1]。LIBS技术具有以下6个明显优势[2]：①原位和远距离检测能力；②无需或只需少量样品准备；③与显微镜连接时具备微区分析能力；④可进行多元素分析；⑤能分析固体、液体和气体；⑥操作简便。LIBS无需复杂样品制备便能够实现实时元素分析，使之在生物医学领域如活体组织实时检测、术中快速判断等展现出了极大的潜力[3]。相较于传统的元素分析方法如电感耦合等离子体发射光谱法（inductively coupled plasma-optical emission spectroscopy, ICP-OES）和原子吸收光谱法（atomic absorption spectroscopy, AAS），LIBS还拥有检测速度快的优势，几秒内便可以检测1次。但LIBS也存在着测量精度低的缺点，这主要受限于等离子体的不稳定性、高维光谱数据的冗杂以及不同样品的复杂基质效应[4]。

目前，LIBS技术在生物医学领域实际应用的过程中主要存在着两方面的挑战：一是生物样本如血液、组织、微生物等的复杂基质效应造成光谱数据中干扰严重；二是高维的光谱数据通常有着数千个波长通道，其分析难度很大、效率不高且建模的时间较长。为解决这两个困难，许多科研工作者都选择采用主成分分析（principal component analysis, PCA）这个化学计量学中经典的降维方法处理LIBS光谱数据。PCA能够把n维特征映射到k维，即通过计算光谱数据的协方差矩阵的特征向量与特征值，把排列在前k位的特征值所对应的特征向量转换成新的矩阵，这样就能将数据中的n维矩阵变为k维矩阵[5]。在预处理光谱数据时利用PCA算法不仅可以消除光谱数据中的冗余变量，还能保留数据中重要的光谱特征，可显著提升模型分类的效率和鲁棒性。

2018年，Pathak等[6]首次将LIBS技术结合PCA算法应用到人体组织的分类研究中，研究建立的模型成功区分出牙齿的牙釉质、牙本质和牙骨质。此研究通过主成分得分和载荷分析，发现牙齿的不同部位存在着明显的元素差异，同时证明了LIBS-PCA方法在牙齿组织分类中的有效性。

近年来，LIBS技术在生物医学领域展现出越来越广阔的应用前景，涵盖了疾病诊断[7]、药物分析[8-10]、微生物鉴定[11]及法医学[12-15]等多个方向。本文基于上述几个研究方向近10年来国内外的研究进展，系统阐述了LIBS-PCA方法在生物医学领域的应用现状。

1 LIBS-PCA方法在疾病诊断中的应用

1.1 糖尿病检测

LIBS-PCA方法通过分析生物样本中的元素及其含量差异，为糖尿病的诊断提供了非侵入式的解决方法。2023年，Rehan等[16]收集了35例糖尿病患者和35例对照组的尿液样本，先通过LIBS技术获取光谱数据，再经PCA数据处理后，输入支持向量机（support vector machine, SVM）分类器中进行建模分析。结果表明，经过PCA算法处理后的数据结构变得更加清晰，且糖尿病患者和非糖尿病患者的尿样在特定元素峰值强度上存在着明显差异。训练SVM模型的过程中采用了多种核函数，其中采用径向基函数（radial basis function, RBF）训练出的模型性能最好，准确率达90.4%，曲线下面积（area under curve，AUC）值为0.98。次年，该团队又采用纳米秒脉冲LIBS技术获取了80例指甲剪样本（40例来自糖尿病患者，40例来自对照组）的光谱数据。如图1所示，首先，激光发射产生光谱信号，经信号处理后进行特征提取，通过PCA进一步提炼特征。随后，利用多种分类器如高斯朴素贝叶斯（Gaussian naive Bayes, GNB）、多层感知机（multilayer perceptron, MLP）等对特征进行训练和分类，最终通过集成学习方法Stacking将多个分类器的预测结果融合，以实现对糖尿病患者和非糖尿病患者的准确分类，准确率达96%[17]。

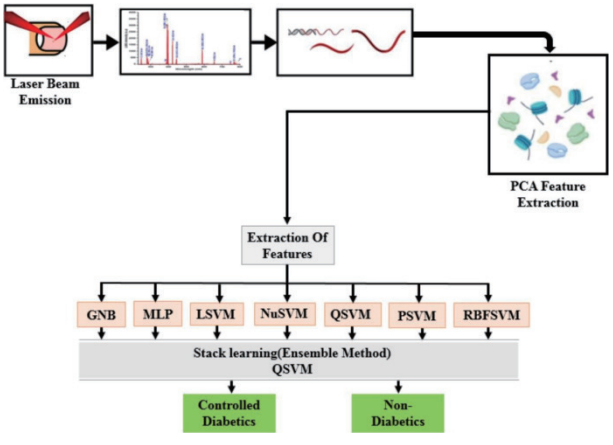


图1 非侵入性的基于LIBS结合集成学习的糖尿病疾病诊断流程[17]

1.2 癌症识别

LIBS–PCA方法在癌症检测方面不仅快速、准确率高，而且侵入性小，因此在早期识别不同癌症方面拥有着巨大的潜力[18]。2016年，Han等[19]通过LIBS–PCA方法成功区分了黑色素瘤与周围皮肤组织，并发现黑色素瘤组织中Mg和Ca元素峰值强度要显著高于周围皮肤组织，如图2所示。研究过程中采用了PCA和线性判别分析（linear discriminant analysis, LDA）对光谱数据进行处理和分析，结果表明此方法对黑色素瘤和正常皮肤组织的分类具有高灵敏度，敏感性和特异性分别为 0.967和0.997。2018年，Wang等[20]利用LIBS–PCA方法并通过SVM算法对宫颈癌进行识别，发现宫颈癌组织中Na、Mg、K元素峰值强度显著高于正常组织，而Ca元素峰值强度则相反。数据在经过PCA降维处理后，PCA–SVM模型识别准确率优于单独的SVM模型，准确率分别为94.44%和93.06%，且模型构建时间更短。2020年，Teng等[21]提出通过LIBS–PCA方法结合SVM算法识别胶质瘤边界，研究发现胶质瘤样本的LIBS光谱中存在45条与8种元素和6种分子带簇相关的光谱线。光谱数据经PCA处理后，建立了SVM分类器，模型准确率高达95%。2022年，Luo等[22]利用LIBS技术结合多种化学计量方法对甲状腺乳头状癌组织进行元素分析和分类，实验使用了14例甲状腺乳头状癌样本和13例正常甲状腺组织样本。发现甲状腺乳头状癌组织中Ca和Mg含量显著高于正常组织。实验使用了PCA、LDA和SVM等算法对光谱数据进行分类分析，SVM模型识别的准确率高达92.6%，LDA模型准确率为81.5%。

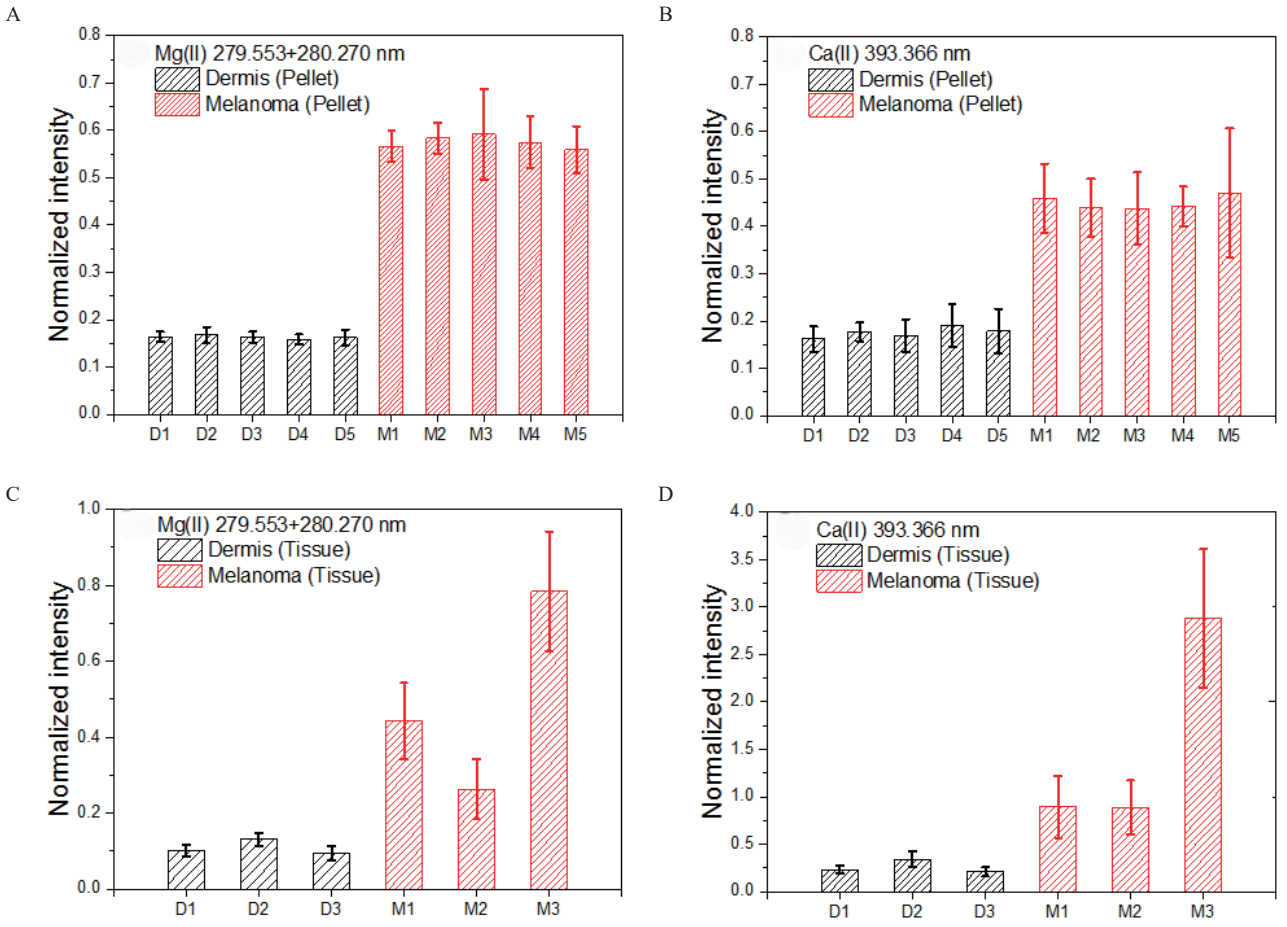


图2 黑色素瘤和真皮中不同元素含量对比[19] A 黑色素瘤和真皮中Mg(Ⅱ)的归一化强度；B 黑色素瘤和真皮中Ca(Ⅱ)的归一化强度；C 切除组织分析中黑色素瘤病灶和真皮中Mg(Ⅱ)的归一化强度；D 切除组织分析中黑色素瘤病灶和真皮中Ca(Ⅱ)的归一化强度

1.3 感染性疾病诊断

2022年，Musyoka等[23]利用LIBS–PCA方法和人工神经网络（artificial neural network, ANN）对疟疾患者血液中的微量生物金属元素Cu、Zn、Fe和Mg进行了分析，从而实现疟疾的快速诊断。结果表明，LIBS获取的光谱数据经PCA处理后，疟疾感染样本与健康样本在元素含量上的差异更加显著，实现了疟原虫形态演变的准确预测。

2 LIBS–PCA在药物分析中的应用

2.1 药物成分均匀性分析

2017年，Tiwari等[24]利用LIBS–PCA方法和偏最小二乘回归分析（partial least squares regression, PLSR）对含有0.2 mg和0.3 mg伏格列波糖的2种片剂进行了分析，目的是开发一种能够快速、高效分析药物的方法。研究中使用了5种不同品牌的药物样本，光谱数据经过PCA降维处理，其中前2个主成分的累积贡献率在空气和氩气氛围中分别为96%和98%。如图3所示，PLSR模型以H/C、H/N和O/N等相对光谱强度比为输入变量，H/C比率在2种氛围中保持不变，在预测未知样本时表现出了高准确率。2024年，Farhadian等[25]利用LIBS–PCA方法对药物片剂的均匀性进行了分析，研究发现片剂中4种主要元素峰为C、H、N和O元素，片剂核心中有着高浓度的Ca和K元素，涂层中有着Ti元素等成分。数据经PCA降维处理后，前2个主成分的累积贡献率在片剂核心和涂层中分别达到91.1%和3.2%，这表明前2个主成分能有效表征片剂的组成元素。结果表明，片剂核心的均匀性要优于涂层，相对标准偏差（relative standard deviation，RSD）值较低。

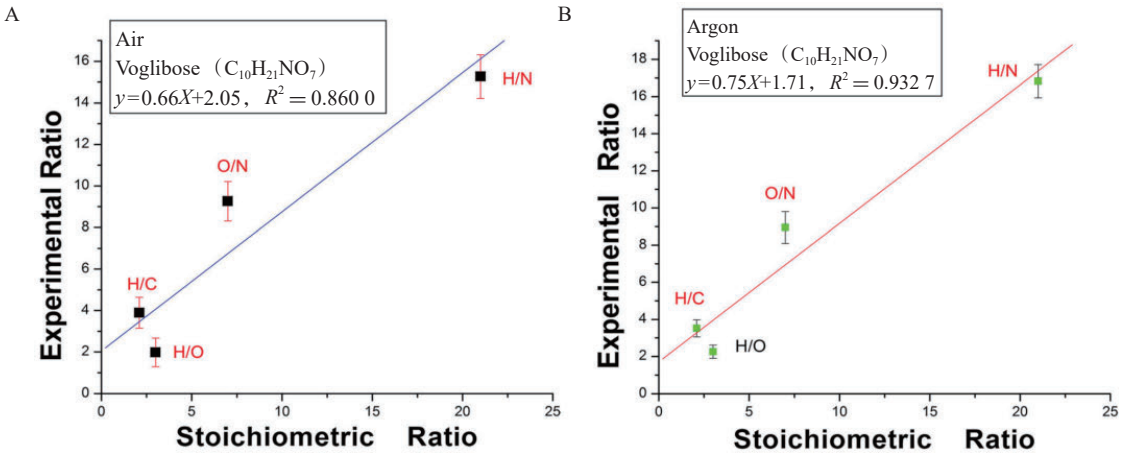


图3 2种气体环境下元素比率单变量线性回归结果[24] A空气环境；B氩气环境

2.2 中草药分类与质量控制

2017年，Wang等[26]利用LIBS–PCA方法和反向传播人工神经网络（back propagation artificial neural network, BP–ANN）对3种中药样本即当归、党参和川芎进行分类研究，通过LIBS获取的光谱数据经PCA降维处理后，前7个主成分的累积贡献率超过了95%。将这7个主成分作为输入变量建立模型，BP–ANN模型的平均准确率达到99.89%，优于LDA与SVM模型。2023年，Nouman等[27]利用LIBS–PCA方法对6种药用植物（蒲公英、天仙子、大苞筋骨草、胡颓子、小檗和茶树）的不同部位（根、叶、种子和花）进行了分析和分类，研究发现不同植物样本的光谱中存在相似的光谱线，但峰值强度存在差异。光谱数据经PCA处理后，采用偏最小二乘判别分析（partial least squares discrimination analysis, PLS–DA）结合单变量归一化（standard normal variate transform, SNV）建立模型，SNV对PCA后的数据进行优化。如图4所示，PLS–DA模型平均准确率达到95%，k–近邻算法（k–nearest neighbor classification, kNN）模型的平均准确率为83%。

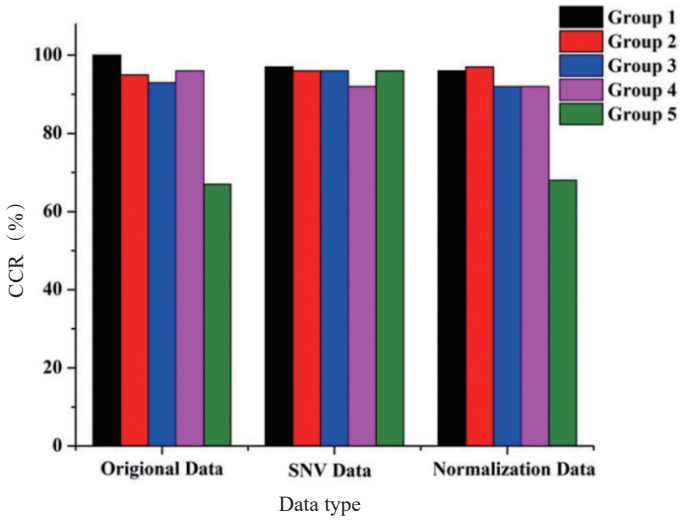


图 4 不同预处理方法下不同组别药用植物的 PLS–DA 模型正确分类结果[27]

2.3 药物安全性评估

2022 年，Kumar 等[28]利用 LIBS–PCA 方法对 6 种姜黄样本进行元素分析和杂质检测，旨在区分掺假和天然样本并评估姜黄的药用特性。样本包括从市场购买的样本 S1 ~ S5 和农民提供的天然未加工样本 S6，利用 LIBS 检测到样本中存在 C、Na、K、Mg、Ca、Fe、Sr、Ba、Cr 和 Pb 等元素。如图 5 所示，其中 S1 ~ S5 含有有毒元素 Cr 和 Pb，表明样本可能被铅铬酸盐污染过，S6 并未检测到有毒元素。光谱数据经过 PCA 降维处理，S5 和 S2 在 PC1 轴上有着明显的分离，天然姜黄 S6 与其他样本存在显著差异，表明 PCA 能有效区分掺假和天然样本。最终结果显示，S6 具有最高的药用价值，富含抗氧化成分且重金属污染少，S1 ~ S5 存在不同程度的重金属污染，S2 和 S5 的 Cr、Pb 含量较高，对健康存在威胁。

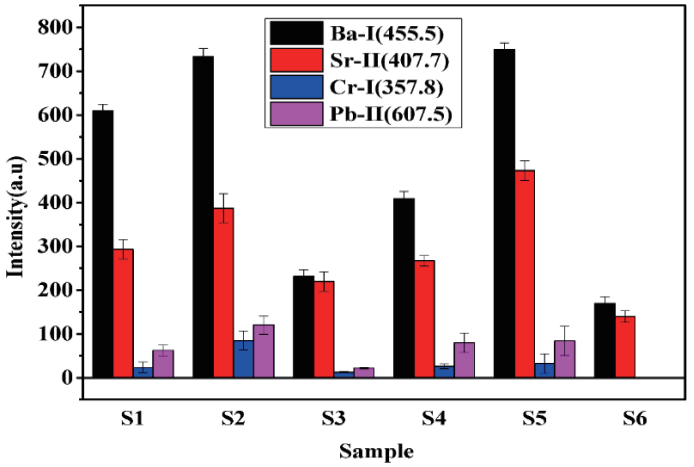


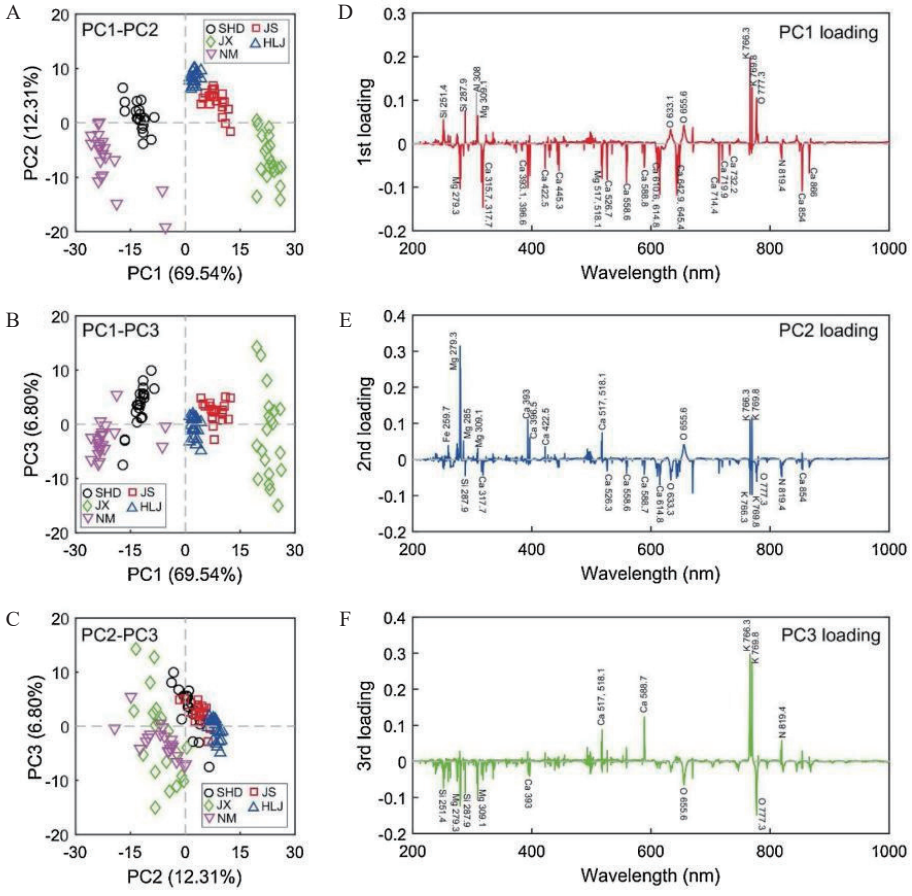
图 5 姜黄样品中 Ba、Sr、Cr 和 Pb 元素的光谱线的综合强度[28]

3 LIBS–PCA 方法在法医学及其他医学相关领域的应用

3.1 法医物证分析

2020 年，Xu 等[12]利用 LIBS–PCA 方法分析中国不同地区土壤样本，旨在实现法医学领域的土壤鉴定。LIBS 获取的土壤样本光谱数据经 PCA 降维处理后，通过分析提取的主成分，能够清晰区分 5 种典型土壤类型，准确率达到 100%，如图 6 所示。2024 年，Cioccia 等[29]利用 LIBS–PCA 方法和 SVM 算法，开发出 1 种新型的枪支残留物的识别协议。研究通过 LIBS 获取了射击者和非射击者手部样本的光谱数据，以确定是否存在枪击残留物的特征元素，如 Pb、Ba 和 Sb。光谱数据经 PCA 降维处理后，输入到 SVM 模型中进行训练。结果表明，该协议在

训练集和外部验证集中均达到100%的准确率，能够为每个预测结果提供概率，排除不确定样本，降低误判风险。压力测试进一步验证了模型的鲁棒性和可靠性。



注：SHD为山东土壤样本；JS为江苏土壤样本；JX为江西土壤样本；HLJ为黑龙江土壤样本；NM为内蒙古土壤样本。

图6 100个代表性土壤样本的LIBS光谱的主成分得分分布和载荷图[12] A PC1–PC2得分分布；B PC1–PC3得分分布；C PC2–PC3得分分布；D PC1载荷图；E PC2载荷图；F PC3载荷图

3.2 生物材料与组织分析

2018年，Li等[1]利用LIBS技术结合PCA、kNN和SVM算法对软组织样本进行分析和分类。如图7所示，LIBS获取的脂肪、皮肤和肌肉组织光谱数据经PCA降维处理后，能清晰区分脂肪、皮肤和肌肉组织，模型准确率超过99.83%，敏感性和特异性均超过0.995。对于高度相似的肌肉组织，SVM分类器（高斯核函数）表现最佳，准确率为76.84%，敏感性为0.742，特异性为0.869。这表明LIBS结合多变量统计方法是鉴别软组织的强大工具。2021年，Gazali等[30]利用LIBS–PCA方法对胆结石样本进行分析和分类。LIBS获取的光谱数据经PCA降维处理后，能清晰区分胆固醇结石和色素结石，回归分析又进一步验证了LIBS光谱强度与胆结石中有机和无机化合物的化学计量比之间的相关性。

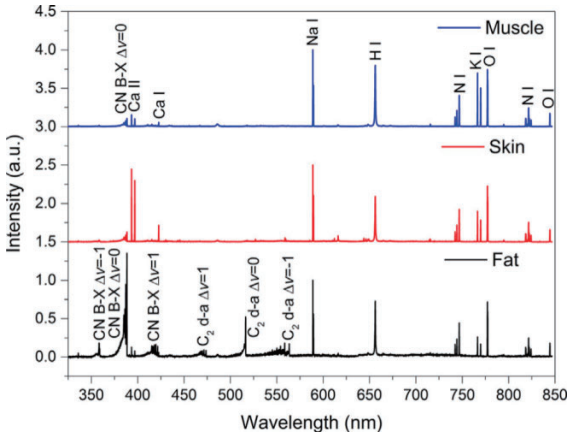


图7 脂肪、皮肤和肌肉组织的归一化平均LIBS光谱[1]

3.3 微生物检测

2018年，Liao等[31]开发了1种LIBS技术结合

3D 表面增强拉曼光谱（three-dimensional surface-enhanced Raman scattering, 3D-SERS）的新型方法，用于水中细菌的快速检测。通过自然蒸发法生成三维空间中的热点，从而增强拉曼信号，实现细菌的定性分析。LIBS技术用于定量分析细胞内的矿物质阳离子K、Na、Ca、Mg，PCA对数据的处理提高了分析的效率和模型的性能。该方法能清晰区分4种细菌，即大肠杆菌ATCC25922、金黄色葡萄球菌、鼠伤寒沙门氏菌和大肠杆菌K12。2024年，Cheng等[32]利用基于卡塞格伦反射望远镜的远程LIBS系统，结合PCA、SVM和随机森林（random forest, RF）算法，对约3 m距离的细菌进行远程识别。如图8所示，PCA前3个主成分对9种细菌的累积贡献率均超过90%，有效地表征了9种细菌的组成元素。在分类阶段，SVM模型的准确率为98.11%，而RF模型（优化后选择了160棵决策树）的准确率高达99.81%。

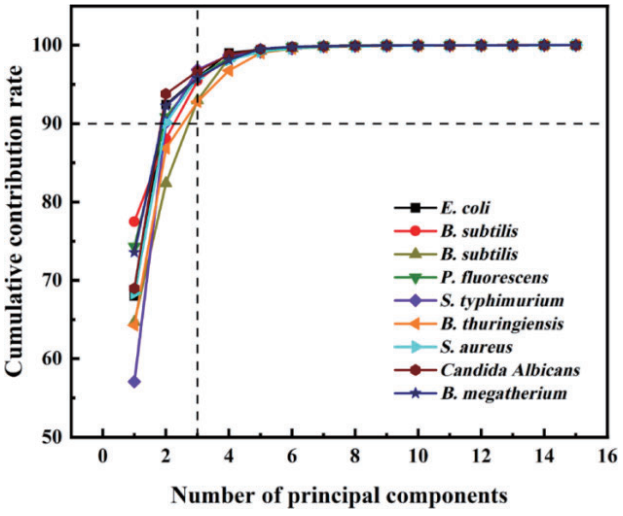


图8 9种细菌主成分得分的累积贡献率[32]

4 总结与展望

本文系统阐述了LIBS-PCA方法在生物医学领域的应用现状及未来趋势，LIBS技术凭借其原位检测、低样品前处理要求、多元素同步检测等优势，在生物医学领域展现出了巨大的潜力。然而，LIBS在生物样本分析中的应用由于复杂的基质效应和高维数据的分析效率问题而受限。因此，引入PCA经典计量学方法来提高LIBS的分析效率变得尤为重要。近10年来，LIBS-PCA方法在疾病诊断、药物分析、微生物鉴定及法医学等多个方向已取得显著进展。在疾病诊断方面，LIBS-PCA方法成功应用于糖尿病检测、癌症识别和感染性疾病诊断，通过分析生物样本中的元素含量差异，实现了对不同疾病状态的快速、无创诊断。在药物分析中，该技术不仅用于药物成分的均匀性分析和质量控制，还为药物的安全性评估提供了新手段。在法医学及其他领域，LIBS-PCA方法在枪支残留物识别、土壤鉴定和生物材料分析中都表现出色，能够为法医物证分析提供高效、准确的解决方案。尽管LIBS-PCA方法在生物医学领域已取得了诸多成果，但仍面临着一些挑战，如测量精度的提升、模型的进一步优化以及便携设备的开发等。未来，通过优化分析算法、开发便携设备以及推动多模态融合，LIBS-PCA方法有望在精准医疗和实时监测中发挥更重要的作用，为医学研究和临床应用提供有力的支持。

[参 考 文 献]

[1] Li X H, Yang S B, Fan R W, et al. Discrimination of soft tissues using laser-induced breakdown spectroscopy in combination with k nearest neighbors (kNN) and support vector machine (SVM) classifiers [J]. Optics and Laser Technology, 2018, 102: 233-239.

[2] de Carvalho G G A, Guerra M B B, Adame A, et al. Recent advances in LIBS and XRF for the analysis of plants [J]. Journal of Analytical Atomic Spectrometry, 2018, 33(6): 919-944.

[3] Tripathi D K, Pathak A K, Chauhan D K, et al. An efficient approach of laser induced breakdown spectroscopy (LIBS) and ICAP-AES to detect the elemental profile of Ocimum L. species [J]. Biocatalysis and Agricultural Biotechnology, 2015, 4(4): 471-479.

[4] Zhang D, Zhang H, Zhao Y, et al. A brief review of new data analysis methods of laser-induced breakdown spectroscopy: machine learning [J]. Applied Spectroscopy Reviews, 2020, 57(2): 89-111.

[5] 符恬恬, 郑斌琪, 李成娟, 等. 基于PCA和非线性映射改进的MFCC特征提取方法[J]. 电子测量技术, 2025, 48(10): 93-99.

[6] Pathak A K, Singh A, Kumar R, et al. Laser-induced breakdown spectroscopy coupled with PCA study of human tooth [J]. National Academy Science Letters, 2018, 42: 87-90.

[7] 张琨, 徐宗伟, 陈传松, 等. 激光诱导击穿光谱在疾病诊断中的应用前景[J]. 光谱学与光谱分析, 2021, 41(6): 1961-1965.

[8] 年福东, 胡玉洁, 陈富强, 等. 激光诱导击穿光谱结合半监督序列学习的白芍重金属元素定量预测方法[J]. 中国激光, 2024, 51(23): 2311003.
[9] 陈富强, 方丽, 马明俊, 等. 激光诱导击穿光谱(LIBS)法微损快速检测党参中Pb[J]. 中国无机分析化学, 2024, 14(2): 162–167.
[10] 孙成玉, 焦龙, 闫娜莹, 等. 激光诱导击穿光谱结合人工神经网络鉴别不同产地的丹参药材[J]. 光谱学与光谱分析, 2023, 43(10): 3098–3104.
[11] 饶刚福, 黄林, 刘木华, 等. 基于激光诱导击穿光谱的微生物种类鉴别研究[J]. 分析化学, 2018, 46(7): 1122–1128.
[12] Xu X, Du C, Ma F, et al. Forensic soil analysis using laser–induced breakdown spectroscopy (LIBS) and Fourier transform infrared total attenuated reflectance spectroscopy (FTIR–ATR): principles and case studies[J]. Forensic Science International, 2020, 310: 110222.
[13] Ahmed Z E, Abdelhamid M, Abdel–Salam Z A, et al. Laser–induced breakdown spectroscopy and chemometric analysis of black toners for forensic applications[J]. Journal of Chemometrics, 2021, 35(5): e3334.
[14] Cicconi F, Lazic V, Palucci A, et al. Forensic analysis of commercial inks by laser–induced breakdown spectroscopy (LIBS)[J]. Sensors, 2020, 20(13): 3744.
[15] Anthony D, Richard H, Adam M, et al. Analysis of counterfeit currency, ammunition components, and gunshot residue: forensic applications of a handheld laser–induced breakdown spectroscopy (LIBS) instrument[J]. Abstracts of Papers of the American Chemical Society, 2016, 252: 1155.
[16] Rehan I, Khan S, Gondal M A, et al. Non–invasive diabetes mellitus diagnostics using laser–induced breakdown spectroscopy and support vector machine algorithm[J]. Arabian Journal for Science and Engineering, 2024, 49: 1257–1265.
[17] Rehan I, Rehan K, Sultana S, et al. Fingernail diagnostics: advancing type Ⅱ diabetes detection using machine learning algorithms and laser spectroscopy[J]. Microchemical Journal, 2024, 201: 110762.
[18] Khan M N, Wang Q, Idrees B S, et al. A review on laser–induced breakdown spectroscopy in different cancers diagnosis and classification[J]. Front Phys, 2022, 10: 821057.
[19] Han J H, Moon Y, Lee J J, et al. Differentiation of cutaneous melanoma from surrounding skin using laser–induced breakdown spectroscopy[J]. Biomedical Optics Express, 2015, 7(1): 57–66.
[20] Wang J, Li L, Yang P, et al. Identification of cervical cancer using laser–induced breakdown spectroscopy coupled with principal component analysis and support vector machine[J]. Lasers in Medical Science, 2018, 33(6): 1381–1386.
[21] Teng G, Wang Q, Zhang H, et al. Discrimination of infiltrative glioma boundary based on laser–induced breakdown spectroscopy[J]. Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy, 2020, 165: 105787.
[22] Luo M, Li X, He Q, et al. Elemental analysis and identification of papillary thyroid cancer tissues using laser–induced breakdown spectroscopy[J]. Journal of Analytical Atomic Spectrometry, 2022, 37(4): 833–840.
[23] Musyoka W D, Kalambuka A H, Alix D–M, et al. Rapid diagnosis of malaria by chemometric peak–free LIBS of trace biometals in blood[J]. Scientific Reports, 2022, 12: 20196.
[24] Tiwari P K, Awasthi S, Kumar R, et al. Rapid analysis of pharmaceutical drugs using LIBS coupled with multivariate analysis[J]. Lasers in Medical Science, 2018, 33: 263–270.
[25] Farhadian A H, Mollaei M. Homogeneity analysis of medicine tablets by laser induced breakdown spectroscopy combined with multivariate methods[J]. European Journal of Pharmaceutics and Biopharmaceutics, 2024, 205: 114579.
[26] Wang J, Liao X, Zheng P, et al. Classification of Chinese herbal medicine by laser–induced breakdown spectroscopy with principal component analysis and artificial neural network[J]. Analytical Letters, 2018, 51(4): 575–586.
[27] Khan N M, Wang Q, Idrees B S, et al. Evaluation of medicinal plants using laser–induced breakdown spectroscopy (LIBS) combined with chemometric techniques[J]. Lasers in Medical Science, 2023, 38: 149.
[28] Kumar T, Rai A K, Dwivedi A, et al. Chemical characterization for the detection of impurities in tainted and natural curcuma longa from India using LIBS coupled with PCA[J]. Atoms, 2022, 10(3): 91.
[29] Cioccia G, Wenceslau R, Ribeiro M, et al. Probabilistic–based identification of gunshot residues (GSR) using laser–induced breakdown spectroscopy (LIBS) and support vector machine (SVM) algorithm[J]. Microchemical Journal, 2024, 207: 112142.
[30] Gazali Z, Kumar R, Rai P K, et al. Discrimination of gallbladder stone employing Laser–Induced Breakdown Spectroscopy (LIBS) and Photoacoustic Spectroscopy (PAS)[J]. Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy, 2021, 260: 119948.
[31] Liao W, Lin Q, Xie S, et al. A novel strategy for rapid detection of bacteria in water by the combination of three–dimensional surface–enhanced Raman scattering (3D SERS) and laser induced breakdown spectroscopy (LIBS)[J]. Analytica Chimica Acta, 2018, 1043: 64–71.
[32] Cheng Y, Wang S, Chen F, et al. A stand–off laser–induced breakdown spectroscopy (LIBS) system for remote bacteria identification[J]. Journal of Biophotonics, 2024, 17(11): e202400332.