

文章编号: 1000-2340(2018)04-0566-09

## 不同耕作施肥方式的水稻营养元素的 激光诱导击穿光谱分析

孙海峰<sup>1</sup>, 孙晓全<sup>2</sup>, 张浩<sup>1</sup>, 张中南<sup>1</sup>, 张伟<sup>1</sup>, 马刘正<sup>1</sup>, 商俊娟<sup>1</sup>, 王博博<sup>1</sup>, 胡建东<sup>1,3</sup>

(1. 河南农业大学机电工程学院, 河南 郑州 450002; 2. 河南省计量科学研究院, 河南 郑州 450008;  
3. 小麦玉米作物学国家重点实验室, 河南 郑州 450002)

**摘要:** 利用激光诱导击穿光谱(LIBS)分析方法, 选取N、K为水稻特征元素, 对5种耕作施肥方式种植下水稻幼穗分化期的叶、穗、茎进行光谱特征分析。由于水稻作物含有复杂的有机和无机元素, 为了快速分析特征元素谱线, 选取特征元素发射谱线互不干扰, 基体效应低的670.875 9、742.364 1、744.229 8、746.831 2、824.238 9、856.773 5、862.923 5、868.028 2 nm的氮原子谱线及766.491 1、769.897 4 nm的钾原子谱线作为主要分析对象。以N、K两种特征谱线为主, 对数据进行均值归一化(Mean Normalization)及距离标准化(Range Normalization)处理, 减少实验过程中外界及内在因素干扰, 同时采用主成分分析(PCA)方法对数据进行成分得分及离散程度分析, 水稻叶、穗和茎的特征元素谱线前三个主成分的得分解释度分别达到96.57%、95.57%和98.14%, 表明不同变量在前3个主成分的解释程度存在差异。采用PCA对实验数据降维处理, 用K均值(K-means)聚类与Fisher判别式对施肥方式进行三分类和耕作施肥方式进行五分类分析, 当置信区间为81.96%, 三分类能较好区分。

**关键词:** 激光诱导击穿光谱; 水稻; 营养元素; 主成分分析; K-means 均值; Fisher 判别式

中图分类号: S24; O433.4 文献标志码: A

DOI:10.16445/j.cnki.1000-2340.2018.04.013

### Analysis of nutritional elements in rice under different cultivation and fertilization modes by laser-induced breakdown of spectroscopy

SUN Haifeng<sup>1</sup>, SUN Xiaoquan<sup>2</sup>, ZHANG Hao<sup>1</sup>, ZHANG Zhongnan<sup>1</sup>, ZHANG Wei<sup>1</sup>,  
MA Liuzheng<sup>1</sup>, SHANG Junjuan<sup>1</sup>, WANG Bobo<sup>1</sup>, HU Jiandong<sup>1,3</sup>

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Henan Agricultural University, Zhengzhou 450002, China; 2. Henan Institute of Metrology, Zhengzhou 450008, China;  
3. State Key Laboratory of Wheat and Maize Crop Science, Zhengzhou 450002, China)

**Abstract:** Nutritional elements of nitrogen (N) and potassium (K) in leaves, ears and stems of rice during the spikelet differentiation period with 5 different cultivation and fertilization modes were analyzed using laser induced breakdown of spectroscopy (LIBS) according to the corresponding characteristic spectral lines. Due to the inorganic and organic compounds in rice leaves, non-interfering characteristic spectral lines with low substrate effect were chosen to quickly and accurately analyze nutritional elements of N(670.875 9, 742.364 1, 744.229 8, 746.831 2, 848.486 1, 856.773 5, 862.923 5, 868.028 2 nm), K(766.491 1, 769.897 4 nm). The Mean Normalization and the Range Normaliza-

收稿日期: 2018-05-11

基金项目: 农业部 948 项目(2015-Z45); 国家重点研发计划项目(2017YFD0801204); 国家自然科学基金项目(31671581); 河南省自然科学基金项目(162300410143); 河南省重点研发与推广专项(182102110427)

作者简介: 孙海峰(1991—), 男, 河南固始人, 硕士研究生, 从事激光光谱分析方面的研究。

通信作者: 胡建东(1965—), 男, 江西新余人, 教授, 博士, 博士生导师。

tion for nutritional elements of N, K were used to reduce the internal and external noise factors occurred during this experiment. The principal component analysis (PCA) was used to analyze the scores of the first three principal components and to explain the dispersion of the measurement results obtained from rice leaves. The contribution of the first three principal components of leaves, ears and stems was 96.57%, 95.57% and 98.14%, respectively, which indicates that the contributions of the first three principal components are different. After the dimensions of data sets formed by experimental results were reduced using PCA algorithm, the K-means cluster and Fisher discriminant were utilized to classify the rice obtained from different fertilization and cultivation modes, where the 3-domain system of classification for fertilization and the 5-domain classification for cultivation with fertilization were used. The rice leaves with different cultivation and fertilization modes were clearly distinguished by three-domain classification when the confidence interval was 81.96%.

**Key words:** laser-induced breakdown spectroscopy; rice; nutritional elements; principal component analysis; K-means; Fisher discriminant

水稻是中国主要农作物之一,种植面积占全国耕地面积的18%,产量占作物总产量的28%<sup>[1]</sup>。长期以来,为了提高水稻产量,人们一直将施肥作为水稻高产量的重要技术措施<sup>[2-4]</sup>。但是,长期过量施用化肥,作物不能及时在生长过程中吸收或者过量吸收营养元素和微量元素,将导致作物产量降低。此外,微量金属元素富集的土壤,易形成土壤重金属污染、土壤板结化,对农业生态形成危害,且通过食物链途径被人体吸收,严重危害人体健康<sup>[5-6]</sup>。土壤耕作方式是一项重要技术措施,合理的耕作方式能够改善作物生长所需要的水、气、肥等状况,有利于增加土壤肥力,促进作物生长,提高作物产量<sup>[7-8]</sup>。秸秆还田技术作为耕作方式的一种,通过增加富集土壤有机质,改善土壤结构和连作障碍等现象,提高氮肥利用率及维持农田肥力,减少化肥使用,减少秸秆焚烧,改善农田作物生长环境,提高农作物产量<sup>[9-10]</sup>。秸秆还田与氮磷钾化肥配合施用能够使土壤中更易积累有机碳,秸秆还田量与土壤中富集有机碳呈正比<sup>[11]</sup>,并且秸秆还田量对土壤结构有一定的影响,能够促进土壤中微生物和真菌生命活动,同时促进水稻根系生长,使水稻生长过程中更易吸收土壤中的有机碳与营养元素氮磷钾<sup>[12]</sup>。为了消除稻田过量施肥造成的土壤污染及养分不均衡现象,需要稻田营养的快速实时监测。

实时监测作物生长过程中的营养含量并且控制施肥量已经成为精细农业的必然要求。目前,传统的营养检测方法分为室内检测和形态检测。室内检测方法需要对样品进行化学检测,检测周期长、耗费力度大、损害较大、专业性强等不利于及时应用田间管理因素,无法做到准确田间指导施肥。因此,不便于大范围大力度推广<sup>[13]</sup>。形态检测方

法主要是根据经验判断来诊断作物生长状态,对检测人员专业知识要求高<sup>[14]</sup>。信息技术快速发展使田间传统检测方法向无损实时监测作物生长方向发展,高光谱检测方法已成为目前热门的研究领域。该方法是通过捕捉作物外表形态反映作物生长状态,但是作物冠层、作物表层整体特征光谱复杂及种植间距等外界因素对捕捉信息形成干扰,造成实验成本提高,处理过程繁琐等问题<sup>[15]</sup>。

激光诱导击穿光谱(Laser Induced Breakdown Spectroscopy, LIBS)分析技术是一种光谱分析检测技术,具有快速、无损、多元素同时在线分析等优点。近年来,已经被广泛应用于农业环境、工业控制、环境污染、食品安全等领域<sup>[16-17]</sup>。董大明等<sup>[18]</sup>对土壤中钾(K)元素总含量进行分析,建立K元素含量内定标模型并对样品进行预测,定标曲线拟合相关系数为0.935,预测标准偏差为9.26%。周卫东等<sup>[19]</sup>采用激光诱导击穿光谱与神经网络算法结合,对土壤中铬(Cr)和钡(Ba)元素进行检测预测。试验结果表明,神经网络分析方法与激光诱导击穿光谱分析技术结合能够很大程度上提高了检测准确度。孙晓辉等<sup>[20]</sup>对土壤中重金属铜元素进行定量分析,建立浓度相关标准曲线相关系数为0.98,测量误差在10%以内。YU等<sup>[21]</sup>对标准土壤样品进行LIBS分类并建立模型,结果表明采用最小二乘支持向量机和相似分类法识别率分别为90%、100%。本文采用LIBS分析技术分别对水稻叶、穗和茎3个部位的特征光谱进行测量分析,并选取其中代表性特征元素N、K的谱线对稻田不同耕作施肥方式进行分类分析,评价不同耕作方式和不同施肥方式下水稻在生长过程中对外界环境营养元素的吸收程度,为N、K营养元素在水稻不同部位的迁移累积特性提供了一种快速精准的检测方法。

## 1 试验样品

为了验证试验结果的可靠性和准确性,选取河南农业大学新乡黄河稻夫试验田稻麦两熟耕作技术优化处理幼穗分化期水稻品种方欣4号。上季小麦秸秆全量掩埋还田处理为试验田前期处理,其

耕种施肥处理方式如表1所示。从5块面积为 $17\text{ m} \times 25\text{ m}$ 稻田分别按照平均分蘖数随机抽取3个重复水稻样品,每20株水稻为1个重复,共计15组水稻样品,分为5类,标记为水稻1(No.1)、水稻2(No.2)、水稻3(No.3)、水稻4(No.4)和水稻5(No.5)。

表1 水稻耕作方式及施肥方式

Table 1 Cultivation methods and fertilization methods for rice

耕作施肥方式 Tillage and fertilization methods	水稻1 Rice 1	水稻2 Rice 2	水稻3 Rice 3	水稻4 Rice 4	水稻5 Rice 5
还田 Straw returning to field		是	是	是	是
翻耕(深度)/cm Tillage( Depth)			20~25	20~25	20~25
干旋(深度)/cm Dry rotary tillage( Depth)			12~15	12~15	12~15
深干旋耕 Deep dry rotary tillage	是	是			
复合肥/( $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ) Compound fertilizer	479.73	479.73	479.73	479.73	479.73
尿素/( $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ) Urea	74.67				
穗肥/( $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ) Ear fertilizer	尿素 112.0 $\text{K}_2\text{SO}_4$ 172.8				尿素 112.0 $\text{K}_2\text{SO}_4$ 172.8
播种(行距/cm × 株距/cm) Seed( row spacing × plant spacing)	30 × 14	30 × 14	30 × 14	30 × 14	30 × 12

清洗并自然晾干,将水稻植株裁剪分为叶、穗、茎3个部分,放置于恒温恒湿试验箱(北京雅士林实验设备有限公司,DHS-500)并于 $100\text{ }^\circ\text{C}$ 杀青30 min, $70\text{ }^\circ\text{C}$ 烘干24 h,粉碎后过40目筛形成微小颗粒粉末状,置于压力30 MPa压片机下保持2 min,压制直径35 mm、厚度5 mm圆柱状样品。

## 2 试验装置

如图1所示,LIBS试验装置主要由调Q 10 ns级激光器 Nd: YAG( Big Sky),七通道光纤光谱仪(Ocean Optics LIBS2500PLUS),光路转换系统及计算机等部分组成。Nd: YAG激光器波长为1 064 nm,最高能量为400 mJ,激光脉冲宽度为8 ns,激光重复

频率为1~20 Hz。激光器发射激光在水平方向上被反射镜转变方向,使激光垂直向下入射到80 mm焦距的聚焦透镜上,经过会聚透镜,激光聚焦至样品表面下0.5 mm处。通过样品与激光相互作用,样品成分物质吸收激光能量,形成等离子体,光纤探头捕获等离子体冷却过程向外释放的能量。光纤探头置于距样品表面30 mm处,与水平方向呈 $45^\circ$ 夹角,通过7根多模耦合光纤传输至光谱仪,光谱仪将收集的能量光信号转换成电信号,传输至计算机中,通过LIBS光谱分析软件LIBSMAX(Ocean Optics)显示光谱图像并存储。七通道光谱仪内部集成13656像元CCD探测器,其光谱范围为198~980 nm,分辨率为0.1 nm。

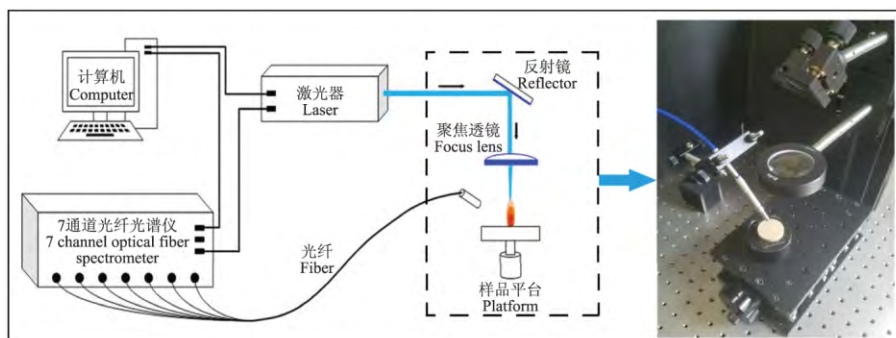


图1 LIBS试验测量装置

Fig. 1 Experimental setup for LIBS measurements

### 3 结果与分析

对 15 组样品进行试验, 每组样品获得 5 组特征谱线, 共 75 组。试验获得光谱波段在 198 ~ 980 nm, 共计 13 656 个采样点。图 2 展示了 5 种不同耕作施

肥方式水稻叶、茎、穗样品的光谱数据, 在 700 ~ 900 nm 波段元素特征谱线峰值最佳, 可以看出其光谱特征相似性很大, 仅在光谱强度上存在差异。为了进一步分析光谱数据, 对水稻 5( No. 5) 耕作方式水稻茎秆样品的光谱进行分段显示, 如图 3 所示。

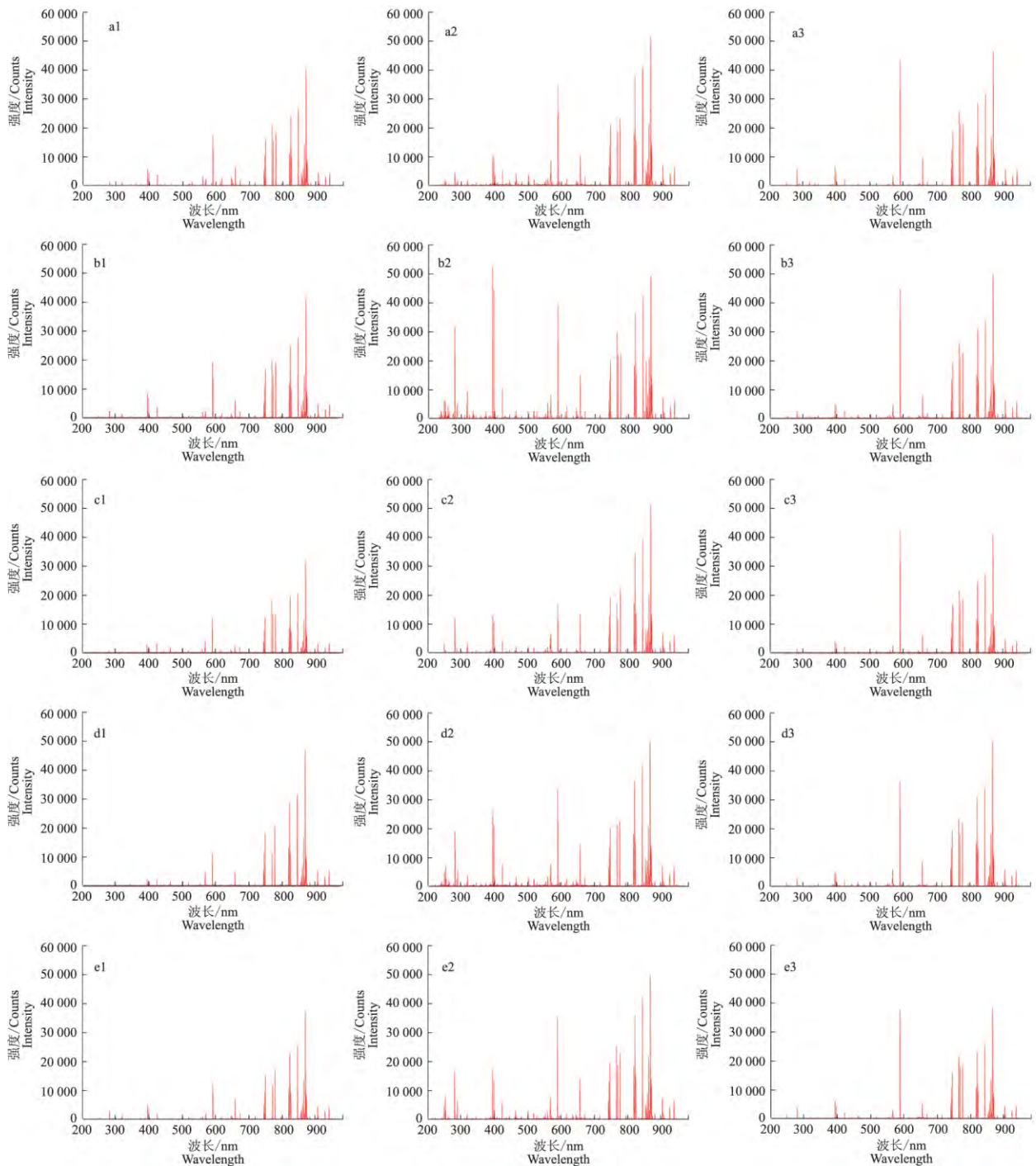


图 2 5 种耕作施肥方式下水稻叶( a1 b1 c1 d1 e1)、穗( a2 b2 c2 d2 e2)、茎( a3 b3 c3 d3 e3) LIBS 发射谱线图  
Fig.2 LIBS emission spectra of rice leaves ( a1 b1 c1 d1 e1) ears ( a2 b2 c2 d2 e2) and stems ( a3 b3 c3 d3 e3) with five kinds of cultivation methods and fertilization methods

本研究中, 试验得到 LIBS 光谱数据在波长范围 198 ~ 980 nm 中有 13 656 个采样点。如果使用全波

段光谱数据, 在进行光谱数据分类过程中, 可能增加数据处理时间, 需要更好的 LIBS 设备性能。因此,

选取能够代表样品特性的波长光谱数据具有重大意义。根据美国 NIST 原子数据库,水稻营养元素 N、K 元素特征谱线主要集中在 600 ~ 900 nm,如表 2 所

示,水稻样品不同部位(叶、茎、穗)的营养元素特征谱线不同,通过分析选取合适的原子发射谱线,使其信噪比高、干扰小,从而提高分析的准确性。

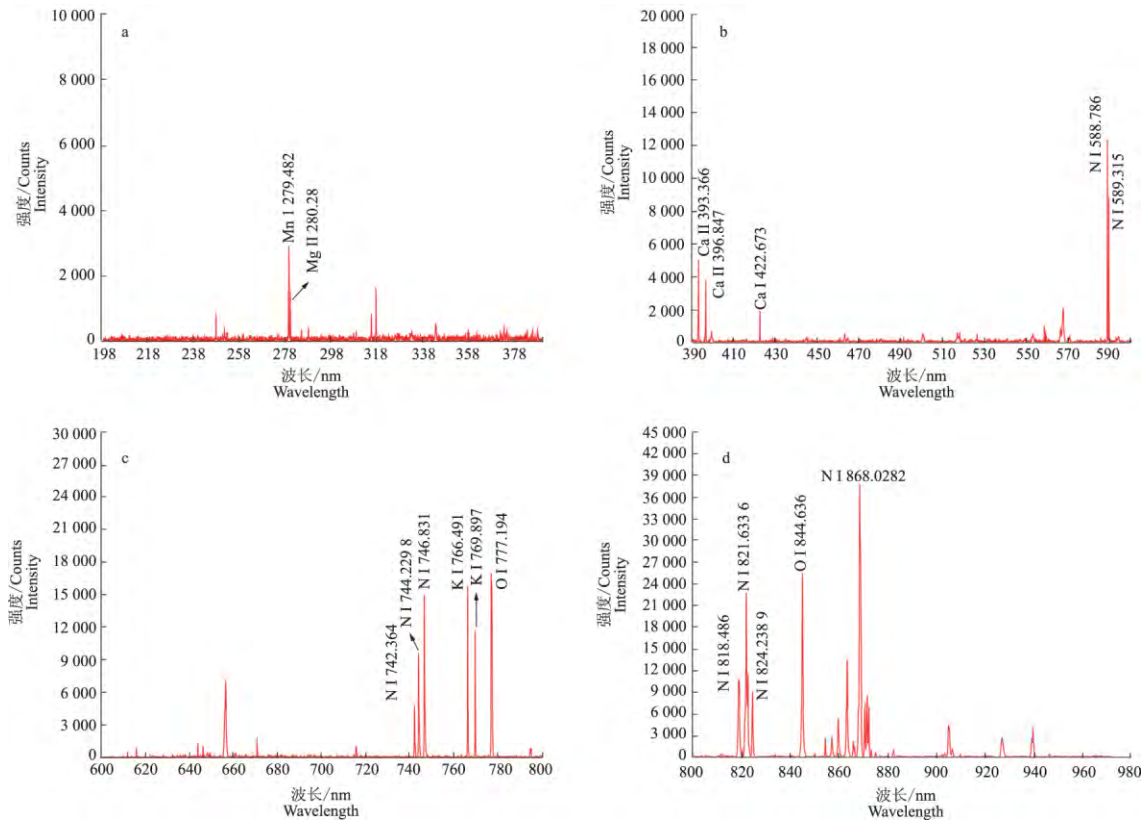


图 3 水稻 5 的稻叶特征元素在 198 ~ 390 nm (a) 390 ~ 600 nm (b) 600 ~ 800 nm (c) 800 ~ 980 nm (d) 分段波长上的 LIBS 谱线 ( I : 原子谱线 , II : 离子谱线)

Fig. 3 LIBS emission lines of characteristic element of No. 5 rice leaves in 198-390nm ( a ) 390-600 nm ( b ) , 600-800 nm ( c ) 800-980 nm ( d ) ( I : atomic spectral lines , II : ionic spectral lines)

表 2 水稻特征元素发射谱线波长

Table 2 Atomic emission characteristic lines of N , K in rice

元素 Element	发射波长 / nm Emission wavelength
氮 NI	670. 875 9 , 742. 364 1 , 744. 229 8 , 746. 831 2 , 818. 486 1 , 824. 238 9 , 856. 773 5 , 862. 923 5 , 868. 028 2
钾 KI	766. 491 1 , 769. 897 4

选择 5 种耕作施肥方式的水稻叶、穗、茎 3 个部位的特征元素发射谱线数据,构造出 3 个光谱数据矩阵,矩阵大小分别为 75 × 8, 75 × 10, 75 × 9。在进行试验时,由于试验装置不稳定及基体效应等问题,造成样品的光谱数据存在一定差异。如图 4a,图 4c,图 4e 所示,数据存在异常点,即偏差较大的数据点。为了减少系统误差引起的变化,对试验光谱数据进行处理是有必要的。数据标准化处理在处理光谱数据中具有很好的应用,将每种样品光谱数据规定在一个范围内,减少数据处理时间,也能够弥补 LIBS 检测过程中基体效应及试验环境造

成的不足<sup>[22-23]</sup>,对 5 种耕作施肥方式的水稻叶与穗 2 个部位的特征元素放射谱线数据进行均值标准化 ( Mean Normalization ) 处理,而水稻茎特征光谱数据则采用距离标准化 ( Range Normalization ) 进行处理 ( 图 4b、图 4d、图 4f )。5 种耕作施肥方式水稻叶、穗和茎营养元素特征光谱数据矩阵异常点减少,数据区间距离缩短,降低试验误差,并提高试验结果的准确性。

用标准化的特征谱线进行主成分分析 ( Principal Component Analysis , PCA ) ,来区分不同耕作施肥方式之间的差异。水稻叶、穗、茎 3 个部位的光谱特征谱线的前 3 个主成分能够解释所选定特征谱线信息程度分别为 96. 57%、95. 57% 和 98. 14% ,如图 5a、图 5c、图 5e 所示。图 5b、图 5d、图 5f 所示为原始数据投影到前 2 个主成分得到的新数据,每个点代表 1 个样本,可以发现有些数据偏离中心数据群,为了进一步分析可以将这些偏离数据分离。

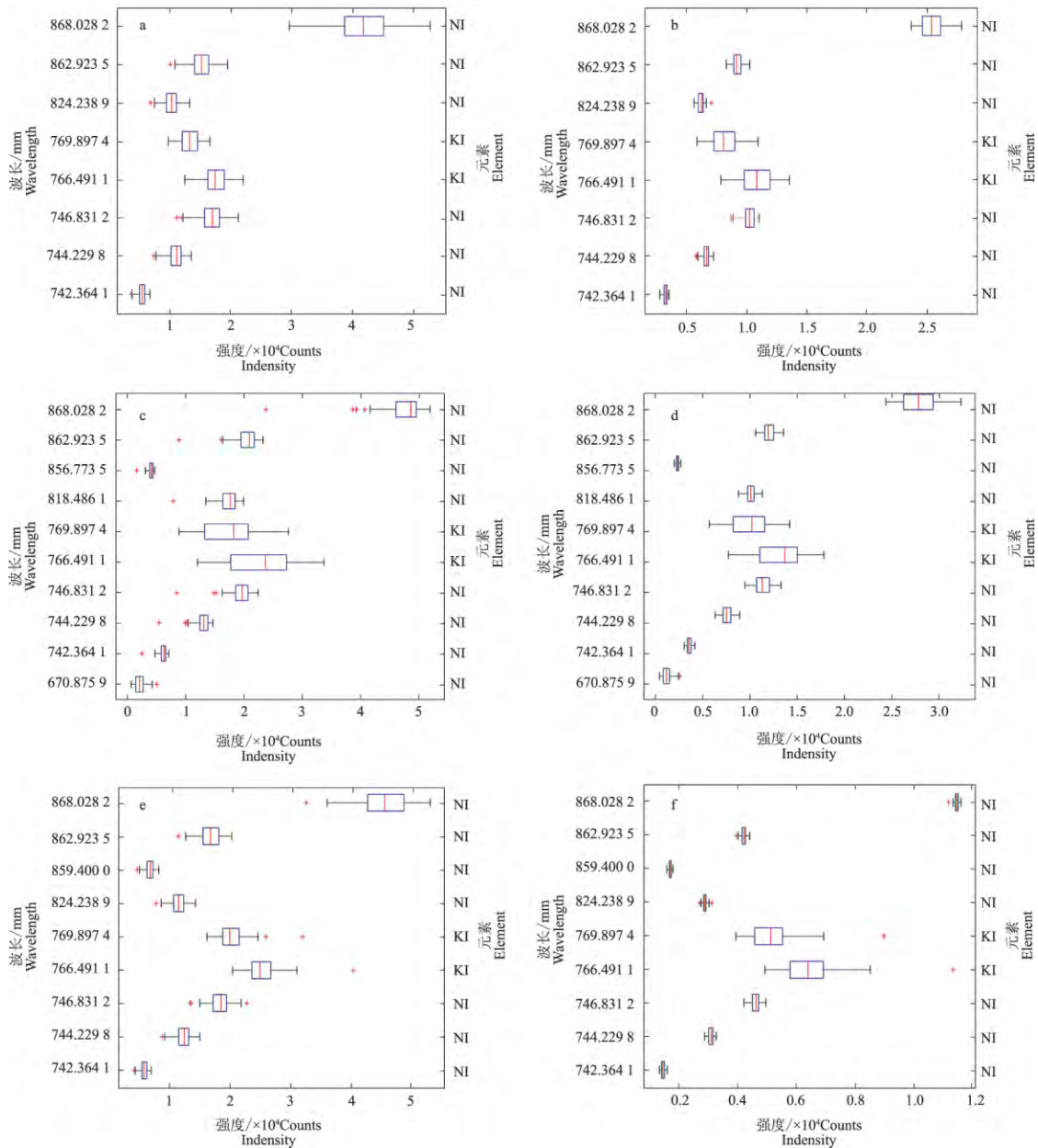


图 4 水稻叶 (a)、穗 (c)、茎 (e) 特征元素谱线数据离散程度及水稻叶 (b)、穗 (d)、茎 (f) 特征元素谱线数据标准化离散程度  
 Fig. 4 The dispersion degree of spectral data of rice leaf (a) ear (c) and stem (e) and the standardization of spectral data of rice leaf (b) ear (d) and stem (f)

经 PCA 处理过的数据进行 K-Means 聚类分析及 Fisher 判别式分析,置信区间为 81.96%。根据施肥方式不同,可以将光谱数据划分为 3 类,分别为水稻 1、水稻 5 及水稻 2/3/4(水稻 2、水稻 3、水稻 4 的施肥方式相同,为基肥),根据耕作方式及施肥方式不同,可以将光谱数据划分成 5 类。如图 6 所示,对于水稻叶,三分类 (a) 水稻 1 (No. 1) 准确率 80%,水稻 2/3/4 (No. 2/3/4) 准确率 37.8%,水稻 5 (No. 5) 准确率 66.7%;五分类 (b) 水稻 1 (No. 1) 准确率 66.7%,水稻 2 (No. 2) 准确率 33.3%,水稻 3 (No. 3) 准确率 33.3%,水稻 4 (No. 4) 准确率

33.3%,水稻 5 (No. 5) 准确率 46.7%。

如图 7 所示,对于水稻穗,三分类 (a) 水稻 1 (No. 1) 准确率 46.7%,水稻 2/3/4 (No. 2/3/4) 准确率 62.2%,水稻 5 (No. 5) 准确率 20%;五分类 (b) 水稻 1 (No. 1) 准确率 53.3%,水稻 2 (No. 2) 准确率 13.3%,水稻 3 (No. 3) 准确率 73.3%,水稻 5 (No. 5) 准确率 26.7%。未分出水稻 4 (No. 4)。

如图 8 所示,对于水稻茎,三分类 (a) 水稻 1 (No. 1) 准确率 20%,水稻 2/3/4 (No. 2/3/4) 准确率 46.7%,水稻 5 (No. 5) 准确率 53.3%;五分类 (b) 水稻 1 (No. 1) 准确率 33.3%,水稻 2 (No. 2) 准确率

20% 水稻 3( No. 3) 准确率 6.7% ,水稻4( No. 4) 准确率 60% 水稻 5( No. 5) 准确率 53.3% 。

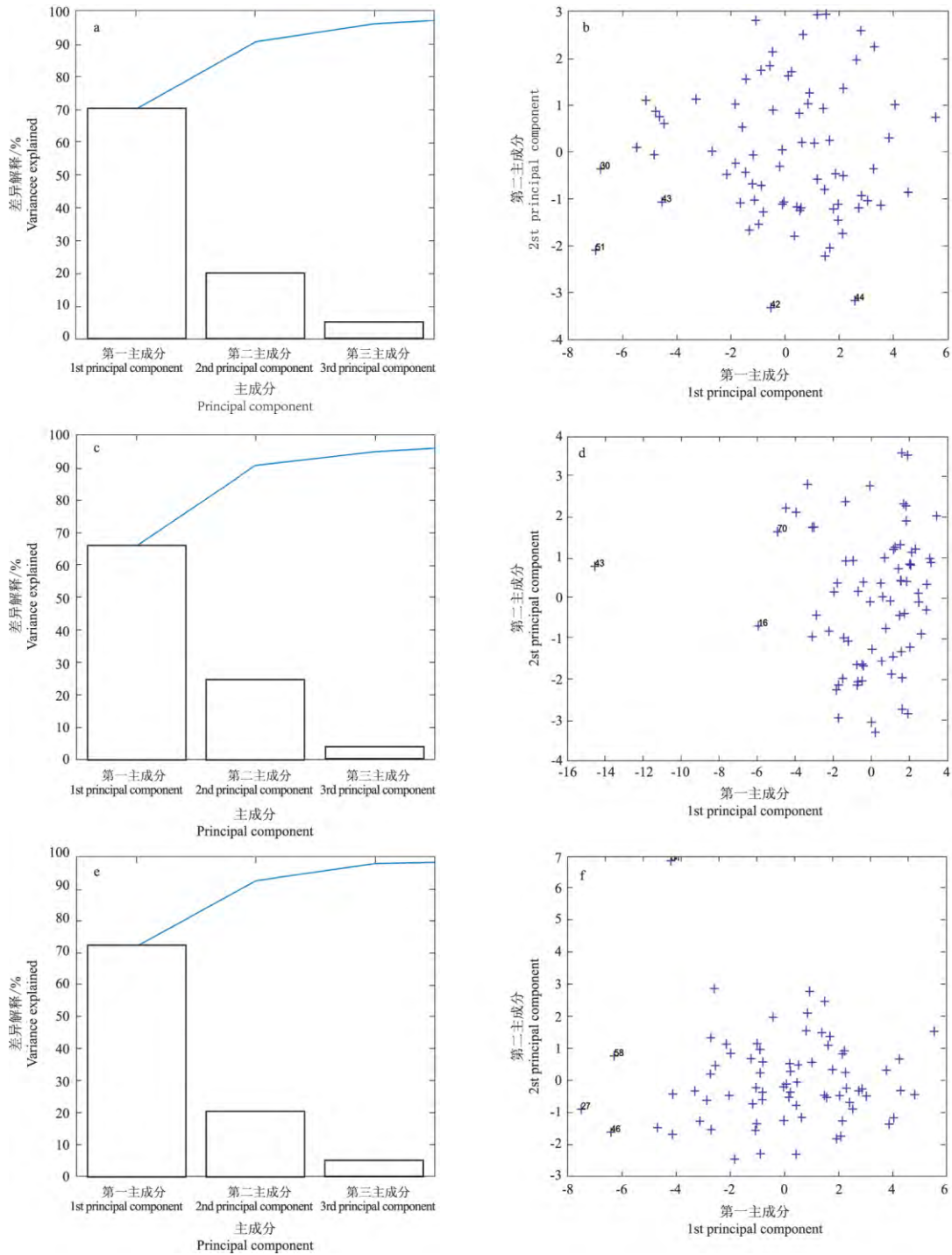


图 5 水稻叶(a b)、穗(c d)、茎(e f)的特征元素谱线数据 PCA 前三主成分得分(a c e)及前两主成分离散情况(b d f)

Fig. 5 Analysis of the characteristics of rice leaf (a b) ear (c d) stem (e f) and the discrete situation of the first two principal components (b d f) and the scores of the first three principal components of PCA (a c e)

根据水稻叶穗茎特征元素光谱前两主成分结合 K-means 算法与 Fisher 判别分析对耕作施肥方式分类情况,针对施肥方式,水稻叶为主分析对象,准确率为 60% 以上,甚至更高。由于样品属于同一品种,施肥及耕种方式差异较小,实验时样品表面不均匀等外界因素影响,实验结果受到较大影

响,比如,对照三分类结果,五分类准确率较差。本研究是选取实验光谱数据的前两主成分进行分类,若增加主成分数量,能够提高分类准确率。

### 4 结论

本研究采用 LIBS 技术对不同耕作施肥方式种

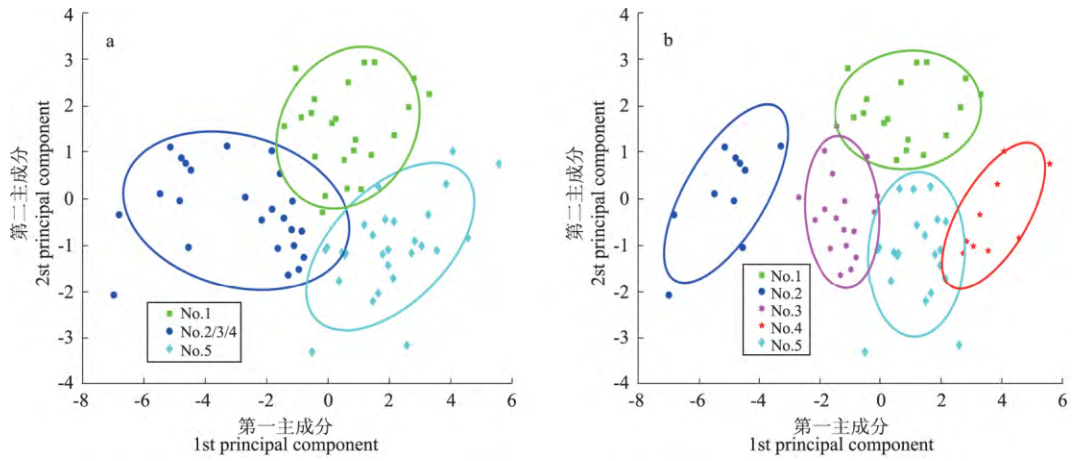


图 6 水稻叶 K-means-Fisher 判别式三分类 (a) 及五分类 (b)

Fig. 6 The 3-domain classification (a) and 5-domain classification (b) of rice leaves with K-means and Fisher discriminant

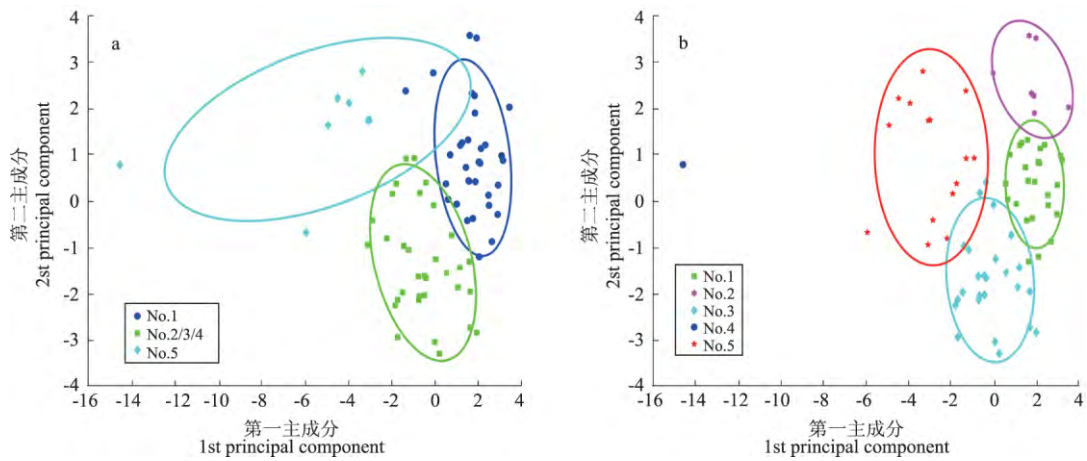


图 7 水稻穗 K-means-Fisher 判别式三分类 (a) 及五分类 (b)

Fig. 7 The 3-domain classification (a) and 5-domain classification (b) of rice ears with K-means and Fisher discriminant

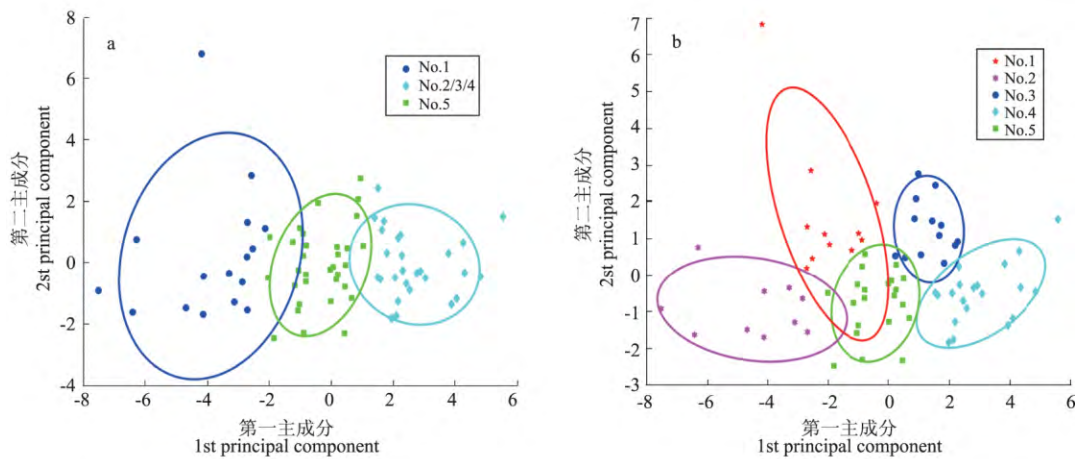


图 8 水稻茎 K-means-Fisher 判别式三分类 (a) 及五分类 (b)

Fig. 8 The 3-domain classification (a) and 5-domain classification (b) of rice stems with K-means and Fisher discriminant



植水稻的叶、茎、穗3个部位分别进行了营养元素N、K的快速检测,选用信噪比高、相对干扰小的原子发射谱线作为分析对象。由于原始光谱数据统计分析得到数据存在异常值,对数据进行标准化预处理,降低数据异常值概率,采用主成分分析方法分析得到N、K2种元素特征谱线前3个主成分能够解释所选定特征谱线信息程度分别为96.57%、95.57%和98.14%,且在不同成分上投影有不同贡献。利用K-means方法及Fisher判别分析方法对数据进行分类分析,置信区间为81.96%,根据不同耕作施肥方式之间的差异较小,水稻叶在三分类的施肥方式下分类结果优于水稻穗和茎,水稻1和水稻5分类正确率高于60%,效果比较明显,而水稻茎在五分类的耕作施肥方式下,水稻4和水稻5分类正确率高于50%,效果比较明显。由于试验受外界干扰因素较多,导致5种耕作施肥方式分类结果不均衡,正确率大部分介于30%左右,而对水稻穗进行五分类时,并没有分类出耕作施肥方式水稻4,可通过增加光谱数据获取量、优化试验参数及提高算法处理精确度等手段,提高试验分析结果的可靠性、准确性。由此可见,不同耕作施肥方式的种植下,激光诱导击穿光谱检测技术能够较好地满足当前检测需要,为作物生长状态监控提供了一种快速检测的方法。

#### 参考文献:

- [1] 朱士江,叶晓思,王斌,等.不同水分调控、生物炭配比对水稻产量与水分利用效率的影响[J].节水灌溉,2018(1):1-5.
- [2] 方福平,程式华.水稻科技与产业发展[J].农学学报,2018,8(1):92-98.
- [3] ROBERTS T L. The role of fertilizer in growing the world's food[J]. Better Crops with Plant Food, 2009, 93(2):12-15.
- [4] JU X, GU B, GALLOWAY J N, et al. Reducing China's fertilizer use by increasing farm size[J]. Global Environmental Change, 2016, 41:26-32.
- [5] 胡雪芳,田志清,梁亮,等.不同改良剂对铅镉污染农田水稻重金属积累和产量影响的比较分析[J].环境科学,2018,39(7):3409-3417.
- [6] STEWART W M, ROBERTS T L. Food security and the role of fertilizer in supporting it[J]. Procedia Engineering, 2012, 46:76-82.
- [7] 李凤博,牛永志,高文玲,等.耕作方式和秸秆还田对直播稻田土壤理化性质及其产量的影响[J].土壤通报,2008,9(3):549-552.
- [8] CHHOKAR R S, 禹盛苗.不同耕作和种植方式对稻田杂草及水稻产量的影响[J].中国稻米,2016,22(5):48-52.
- [9] 武际,郭熙盛,王允青,等.麦稻轮作下耕作模式对土壤理化性质和作物产量的影响[J].农业工程学报,2012,28(3):87-93.
- [10] 潘剑玲,代万安,尚占环,等.秸秆还田对土壤有机质和氮素有效性影响及机制研究进展[J].中国生态农业学报,2013,21(5):526-535.
- [11] 张大伟,刘建,王波,等.连续两年秸秆还田与不同耕作方式对直播稻田土壤理化性质的影响[J].江西农业学报,2009,21(8):53-56.
- [12] 房焕,李奕,周虎,等.稻麦轮作区秸秆还田对水稻土结构的影响[J].农业机械学报,2018,49(4):297-302.
- [13] 宋丽娟,叶万军,郑妍妍,等.作物氮素无损快速营养诊断研究进展[J].中国稻米,2017,23(6):19-22.
- [14] 柳永辉.农作物营养失调的形态诊断[J].河南农业,2007(17):40.
- [15] 刘红玉,毛罕平,朱文静,等.基于高光谱的番茄氮磷钾营养水平快速诊断[J].农业工程学报,2015,31(S1):212-220.
- [16] 孙兰香,于海斌,辛勇,等.采用激光诱导击穿光谱技术测定合金钢中锰和硅的含量[J].光谱学与光谱分析,2010,30(12):3186-3190.
- [17] MENG D, ZHAO N, WANG Y, et al. On-line/on-site analysis of heavy metals in water and soils by laser-induced breakdown spectroscopy[J]. Spectrochimica Acta Part B Atomic Spectroscopy, 2017, 137:39-45.
- [18] 董大明,郑文刚,赵春江,等.农田土壤中钾元素含量的激光诱导击穿光谱测量方法[J].光谱学与光谱分析,2013,33(3):785-789.
- [19] 沈沁梅,周卫东,李科学.激光诱导击穿光谱结合神经网络测定土壤中的Cr和Ba[J].光子学报,2010,39(12):2134-2138.
- [20] 孙晓晖,炊白白,王顺,等.激光诱导击穿光谱定量分析土壤中Cu的研究[J].河南农业大学学报,2014,48(6):770-773.
- [21] YU K Q, ZHAO Y R, FEI L, et al. Laser-Induced breakdown spectroscopy coupled with multivariate chemometrics for variety discrimination of soil[J]. Scientific Reports, 2016, 6:2757-2763.
- [22] WANG Z, FENG J, LI L, et al. A multivariate model based on dominant factor for laser-induced breakdown spectroscopy measurements[J]. J Anal Atom Spectrom, 2011, 26:2289-2299.
- [23] 陈兴龙,董凤忠,王静鸽,等.PLS算法在激光诱导击穿光谱分析炉渣成分中的应用[J].光子学报,2014,43(9):126-130.

(责任编辑:蒋国良)