

# 微波探针对叶菜激光诱导击穿光谱信号增强效果的影响

许方豪<sup>1,3</sup>, 刘木华<sup>1,3</sup>, 陈添兵<sup>1,3</sup>, 陈金印<sup>2</sup>, 罗子奕<sup>1,3</sup>, 何秀文<sup>1,3</sup>, 周华茂<sup>1,3</sup>, 林金龙<sup>1,3</sup>, 姚明印<sup>1,3\*</sup>

<sup>1</sup>江西农业大学工学院, 江西 南昌 330045;

<sup>2</sup>江西省果蔬采后处理关键技术与质量安全协同创新中心, 江西 南昌 330045;

<sup>3</sup>江西省现代农业装备重点实验室, 江西 南昌 330045

**摘要** 微波产生形式会影响激光诱导击穿光谱(LIBS)中等离子体光谱信号的强度和稳定性。实验选择重金属镉(Cd)质量分数为 $1.5 \times 10^{-5}$ 的叶菜样品作为研究对象,对比分析了双针、单针、环形、双环4种微波探针和前、中、后3个探针位置处传导微波对等离子体光谱信号强度和稳定性的影响,以优化微波辅助LIBS(MA-LIBS)实验中的微波作用形式,达到更好的辅助增强效果。分析MA-LIBS光谱图发现,Cd元素的等离子体光谱信号增强了2.58倍,Si、P元素的等离子体光谱信号强度分别增强了2.70倍和3.08倍,有较好的增强效果。这表明:选择合适形状的微波探针和微波加载位置可以提高微波辅助增强效果,增强LIBS技术在低浓度样品检测方面的应用性能。

**关键词** 光谱学; 激光诱导击穿光谱; 微波辅助增强; 微波探针; 等离子体

中图分类号 O433

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.103005

## Effect of Microwave Probes on Enhancement of Laser-Induced Breakdown Spectral Signal of Leaf Vegetable

Xu Fanghao<sup>1,3</sup>, Liu Muhua<sup>1,3</sup>, Chen Tianbing<sup>1,3</sup>, Chen Jinyin<sup>2</sup>, Luo Ziyi<sup>1,3</sup>,  
He Xiuwen<sup>1,3</sup>, Zhou Huamao<sup>1,3</sup>, Lin Jinlong<sup>1,3</sup>, Yao Mingyin<sup>1,3\*</sup>

<sup>1</sup> School of Engineering, Jiangxi Agricultural University, Nanchang, Jiangxi 330045, China;

<sup>2</sup> Collaborative Innovation Center of Postharvest Key Technology and Quality Safety of Fruits and Vegetables in Jiangxi Province, Nanchang, Jiangxi 330045, China;

<sup>3</sup> Jiangxi Key Laboratory of Modern Agricultural Equipment, Nanchang, Jiangxi 330045, China

**Abstract** The methods that are used to produce microwaves can affect the strength and stability of plasma spectral signal in laser-induced breakdown spectroscopy (LIBS). Leaf vegetables that contain cadmium (Cd) at mass fraction of  $1.5 \times 10^{-5}$  are used as the subjects of this study. The influences of microwave probe with four shapes, such as the single-needle, double-needle, single-ring, and double-rings microwave probes, are studied. The three microwave loading positions, which include the front, middle, and end of the probes, are also investigated. The form of microwave function in the microwave assisted LIBS (MA-LIBS) experiment is optimized to achieve better auxiliary enhancement effect. After analyzing the spectral lines of the MA-LIBS, we find that the plasma spectral signal of Cd element is increased by 2.58 times, whereas Si and P elements is increased by 2.70 and 3.08 times, respectively. Suitable microwave probe shapes and loading positions can improve the effects of microwave-assisted enhancement, which further improves the performance of the LIBS technology in the application fields.

**Key words** spectroscopy; laser-induced breakdown spectroscopy enhancement; microwave assisted; microwave probe; plasma

**OCIS codes** 300.6365; 300.6370

收稿日期: 2018-04-24; 修回日期: 2018-05-14; 录用日期: 2018-05-19

基金项目: 国家自然科学基金(31460419, 31560482)、江西省科技支撑计划(20151BBG70063)、江西省远航工程计划(20140142)

\* E-mail: mingyin800@126.com

# 1 引言

激光诱导击穿光谱(LIBS)检测技术具有快速、原位、无需复杂预处理、非接触、损伤微小等优点,现已广泛应用于农业<sup>[1-2]</sup>、工业<sup>[3-4]</sup>以及地质研究<sup>[5-6]</sup>等领域。近10年来,研究人员开始将研究重点转向LIBS的实用性研究,便携、手持及现场应用的远程LIBS仪器越来越多地受到关注<sup>[7]</sup>。目前,较高的检出限、较低的重复精度、较强的自吸收效应以及高的连续背景已成为LIBS技术向实用性发展的瓶颈,如何解决上述瓶颈问题成为LIBS技术研究的重要课题。除了仪器设备的改进,运用有效的实验方法和数据处理方法也是提高LIBS检测性能的可行方法。

现阶段,增强光谱信号的实验方法<sup>[8]</sup>主要有双脉冲再激发<sup>[9-10]</sup>、放电脉冲增强<sup>[11]</sup>、等离子体的空间限制<sup>[12]</sup>、等离子体的磁场约束<sup>[13]</sup>、等离子体的微波辅助增强<sup>[14]</sup>。其中的双脉冲再激发法,即双脉冲LIBS(DP-LIBS)是利用第一束激光在样品表面激发出等离子体后,延迟纳秒级别时间后再发射第二束激光再次激发等离子体,以增加等离子体的数量,延长其寿命,从而增强光谱信号强度的方法。该方法已经广泛地应用于LIBS实验中,如:Lednev等<sup>[15]</sup>将DP-LIBS技术和与拉曼技术相结合后应用于远程探测包裹中的危险品。等离子体的微波辅助增强法,即微波辅助LIBS(MA-LIBS)是将电磁能加载在等离子体周围,为等离子体提供能量,增强电离程度,延长其寿命,从而增加光谱强度的方法。该方法具有操作简单、适用性广的特点,可以取得了较好的效果。陈添兵等<sup>[16]</sup>采用MA-LIBS方法对大米中的元素进行分析,结果表明,最大增强效果可达21倍。Tampo等<sup>[17]</sup>应用微波辅助增强技术对核燃料进行远程分析,减小了检测过程中核辐射对人体的危害。微波环境是影响MA-LIBS的重要因素,已有学者对微波环境进行研究。Viljanen等<sup>[18]</sup>发现,微波与激光诱导的等离子耦合后,可将等离子体的生命周期从几微秒提高到几百微秒。Chen等<sup>[19]</sup>设计了一种更为有效的微波传输装置,并将其用于微波辅助增强,使MA-LIBS的增强效果得以有效提升。

叶菜中含有丰富的维生素、矿物质和胡萝卜素,具有很高的营养价值,是人们日常食用的蔬菜之一。叶菜在种植、生产及流通过程中,存在重金属污染的潜在风险<sup>[20]</sup>。常规的化学消解样品检测方法无法满足环境友好性要求。因此,对叶菜中重金属进行

绿色快速检测是保证食品安全可持续发展的重要课题。许多研究小组已对叶菜中典型的重金属元素进行过LIBS检测研究:黎文兵<sup>[21]</sup>针对叶菜中重金属元素的检测光谱参数进行了优化,并进行了双脉冲实验,结果表明,双脉冲能使Pb I、Cu I的特征谱线强度增强5倍以上;杨晖等<sup>[22]</sup>将LIBS技术与变量筛选后的协合区间偏最小二乘法算法相结合,提高了叶菜中镉(Cd)元素模型的预测精度。

目前,LIBS技术还无法达到GB 2762—2017《食品安全国家标准 食品中污染物限量》中规定的叶菜蔬菜中Cd元素含量的限量标准(Cd元素的质量分数不高于 $0.2 \times 10^{-6}$ )。本文工作以Cd质量分数为 $1.5 \times 10^{-5}$ 的小白菜作为研究对象,运用双脉冲微波辅助方法进行实验,研究该方法对提高重金属元素LIBS分析灵敏度、降低LIBS检测限的作用。实验研究元素为C、Mg、Ca、P、Si及Cd,其中:Cd是实验目标元素;C是有机物的主要元素;Mg、Ca、P、Si是植物生长不可缺少的必需元素,对这些元素进行研究有助于LIBS技术在农产品生产种植中的应用。

## 2 实验材料与方法

### 2.1 实验装置

本研究采用的MA-LIBS装置如图1所示。调Q固体Nd:YAG激光器(型号为Vlite-200,北京镭宝光电技术有限公司,中国,输出波长为1064 nm,频率为1~10 Hz,脉宽约为8 ns)为激发源,可实现双脉冲激发;高速摄像机(型号为DH334T-18U-03, Andor Technology公司,英国)用于拍摄等离子体图;双通道光谱仪(型号为AvaSpe-uls2048-2, Avantes公司,荷兰)用来采集特征光谱,可测量210~473 nm波段范围内的光谱信号,分辨率为0.08~0.16 nm。激光器两通道间的延迟、高速摄像机的拍摄步长、光谱仪的采集延迟都由延时器DG645(Stanford Research Systems公司,美国)精确控制。实验中选用微波频率为2.45 GHz、输出功率为0~200 W的微波加热仪作为微波源。样品置于二维旋转平台(型号为SC300,北京卓立汉光有限公司,中国)上,目的是避免激光击穿同一个样品点,同时减弱样品不均匀性带来的误差。

为获得更好的检测效果,实验前对LIBS影响较大的激光脉冲重复频率、采集延迟、激光能量等关键参数进行优化,优化后的最佳实验条件如下:激光脉冲重复频率为2 Hz,双脉冲激光能量分别设置为

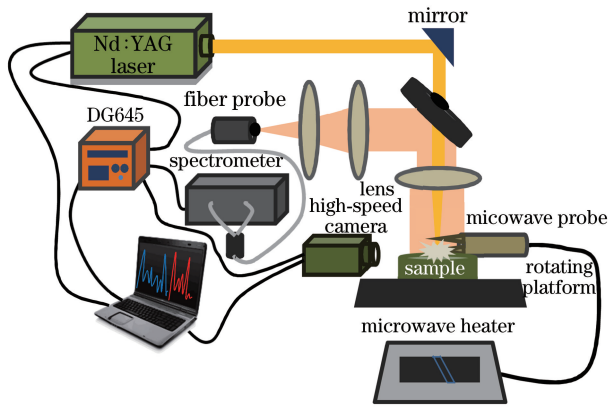


图1 LIBS实验装置示意图

Fig. 1 Schematic of LIBS experimental setup

110 mJ 和 120 mJ, 脉冲间延迟为 700 ns, 光谱采集延迟为  $1.38 \mu\text{s}$ , 积分时间为 2 ms, 高速摄像机拍摄延迟步长为  $1 \mu\text{s}$ 。为避免微波能量过大而烤焦样品, 选择微波功率为 120 W。

## 2.2 样品制备

新鲜小白菜购自江西农业大学农贸市场, 用去离子水反复清洗叶菜, 以去除其表面的灰尘, 之后用

真空抽湿冷冻干燥机对其进行干燥处理, 干燥后取出, 将其研磨成粉。配制 Cd 污染叶菜: 称量 0.203 g 氯化镉( $\text{CdCl}_2 \cdot 2.5\text{H}_2\text{O}$ )溶于去离子水, 然后将其移入 1000 mL 的容量瓶中, 配制成 Cd 质量分数为  $10^{-4}$  的含 Cd 水溶液; 然后, 称取 300 g 叶菜粉, 将其与 45 mL 含 Cd 水溶液混合, 之后加 100 mL 去离子水, 充分搅拌 8~10 min, 搅拌均匀后置于恒温干燥箱中干燥, 待水分全部蒸发后取出, 再次研磨成粉, 然后用压片机将叶菜粉压制直径为 30 mm、厚度为 3 mm 的圆饼。

## 2.3 微波辅助实验

实验以共线 DP-LIBS 为基础, 首先对比分析双针、单针、环形、双环 4 种形状微波探针条件下等离子体光谱信号的稳定性, 针对稳定性较好的探针, 研究分析其前、中、后(以 3 mm 为步长在 10 mm 的探针头上取点) 3 个位置传导微波的等离子体稳定性, 完成 MA-LIBS 探针实验条件的优化。探针优化后进行 MA-LIBS 实验, 在光谱采集前打开微波辅助加热仪, 光谱采集完后关闭, 并冷却 30 s, 以防烫伤和对仪器造成损伤。微波探针形状如图 2 所示。

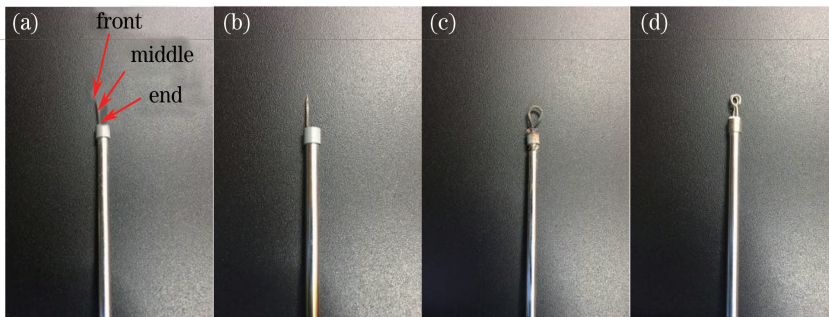


图2 4种微波探针。(a)双针探针;(b)单针探针;(c)环形探针;(d)双环探针

Fig. 2 Four kinds of microwave probes. (a) Double-needle probe; (b) single-needle probe; (c) single-ring probe; (d) double-ring probe

## 3 实验结果与讨论

4 种微波探针的实验结果如图 3 所示。对比图 3(a)中 205~230 nm 波段的谱线发现: 双针、单针、环形探针与双脉冲影响下的等离子体光谱强度没有明显差别, 而双环探针影响下的等离子体光谱强度有明显的减弱现象, 其原因可能在于双环探针的结构较复杂, 遮挡了较多的等离子体, 使光谱信号减弱; 对比背景信号发现, 单针探针影响下的等离子体光谱背景信号在各探针中最强, 强背景信号会影响等离子体光谱的稳定性。图 3(b)中 245~325 nm 波段谱线的对比结果与 205~230 nm 谱线的对

比结果相似, 但由于此波段范围内元素谱线的强度较强, 无法直观地看出背景信号的强度, 可通过信噪比来比较 4 种探针影响下的光谱稳定性。

各探针影响下光谱信号的信噪比如图 4 所示。可见: 双环探针影响下的等离子体光谱信号的信噪比整体较好, 但其影响下的等离子体光谱信号的强度较弱, 不利于光谱分析; 单针探针影响下的等离子体光谱信号的信噪比与双脉冲对照组相比波动较大, 光谱信号不稳定; 双针、环形探针影响下的等离子体光谱信噪比与双脉冲对照组较为接近, 稳定性好。进一步地, 应对比分析光谱信号稳定性较好的环形和双针探针影响下的等离子体形态。

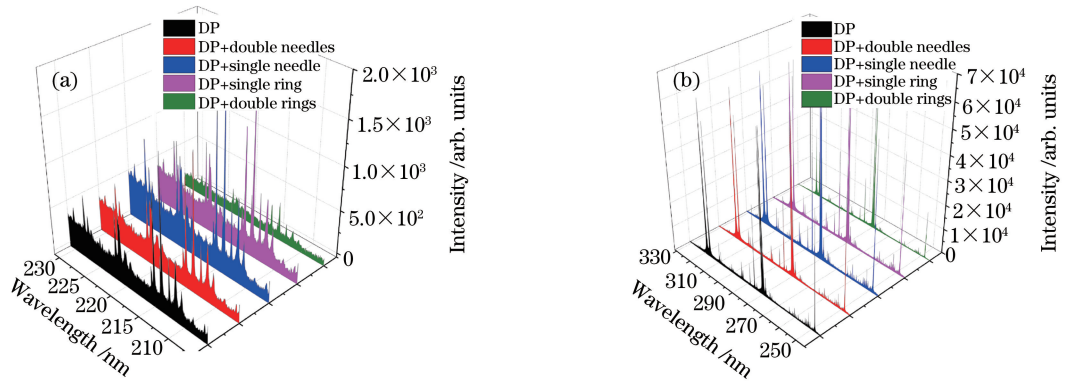


图 3 4 种微波探针在(a) 205~230 nm 与(b) 245~325 nm 波段内的等离子体光谱信号图

Fig. 3 Plasma spectrograms of four shapes of microwave probes at (a) 205-230 nm and (b) 245-325 nm bands

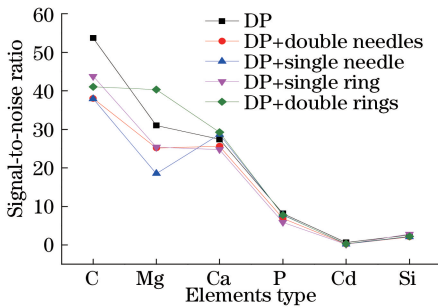


图 4 4 种微波探针在 205~230 与 245~325 nm 波段内的等离子体光谱信噪比图

Fig. 4 Plasma signal-to-noise ratio of four shapes of microwave probes at 205-230 and 245-325 nm bands

双针和环形两种微波探针影响下的等离子体团如图 5 所示,图中拍摄的等离子体团为 1~16  $\mu\text{s}$ (延迟步长 1  $\mu\text{s}$ )内的等离子体演化过程。等离子体整体演变趋势为从大体积、高温度、高亮度的等离子体团逐渐削减为小体积、低温度、低亮度的等离子体团。环形探针影响下的等离子体呈圆形向内收缩,

而双针探针影响下的等离子体更发散,其原因可能是不同形状的探针对等离子体的空间遮挡作用不同,从而影响了等离子体的强度和稳定性<sup>[23]</sup>。在 16  $\mu\text{s}$ 时,双针探针影响下的等离子体亮度明显高于环形探针,稳定性也更好。因此,为更有利于采集等离子体光谱信号,应进一步分析双针探针前、中、后位置传导微波对产生等离子体的影响。

拍摄双针探针前、中、后 3 个位置处的等离子体团,结果如图 6 所示。等离子体整体演变趋势为其亮度逐渐减弱,体积逐渐缩小。激光穿过双针探针的中部时,等离子体的亮度和持续时间都优于前、后位置的等离子体,用中间位置传导微波能得到更好的实验效果。等离子体在被激发的同时,其周围会产生相应的电磁场<sup>[24]</sup>,微波与电磁场相互作用会影响微波的辅助效果,探针各处传导微波的能力不同,从而会产生不同的微波辅助效果。此外,探针前、中、后位置的空间遮挡效果不同,这也会使微波效果产生差异。

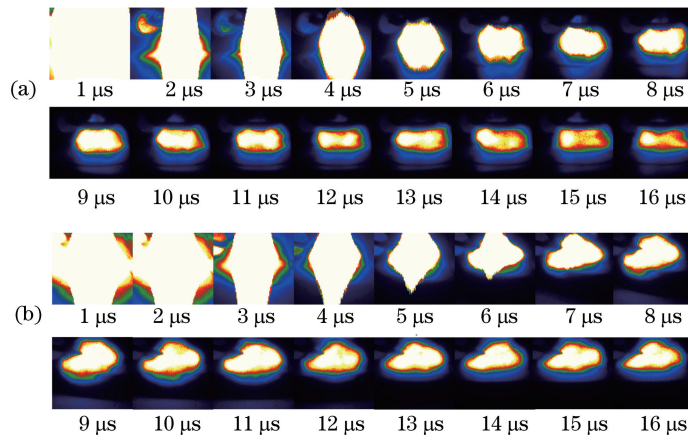


图 5 环形、双针探针影响下的等离子体在 1~16  $\mu\text{s}$  内的演变图。(a) 环形探针;(b) 双针探针

Fig. 5 Evolution pictures of plasma under the conditions of single-ring probe and double-needle probe in 1-16  $\mu\text{s}$ . (a) Single-ring probe; (b) double-needles probe

由上述实验结果可知,双针探针中间位置传导微波进行 MA-LIBS 实验的效果最佳,以此作为探针条件进行后续的实验。实验结束后选取 205~230 nm 与 245~325 nm 波段的等离子体光谱信号进行微波增强效果分析,光谱图如图 7 所示。图 7

中标记了 C、Mg、Ca、P、Si、Cd 6 种元素,为能更好地分析不同元素间增强效果的差别,将波段范围内 6 种元素的能级情况与原子结构列于表 1。其中, $\lambda$  为波长, $E_{up}$  为上能级, $E_{low}$  为下能级, $A_{ki}$  为跃迁概率。

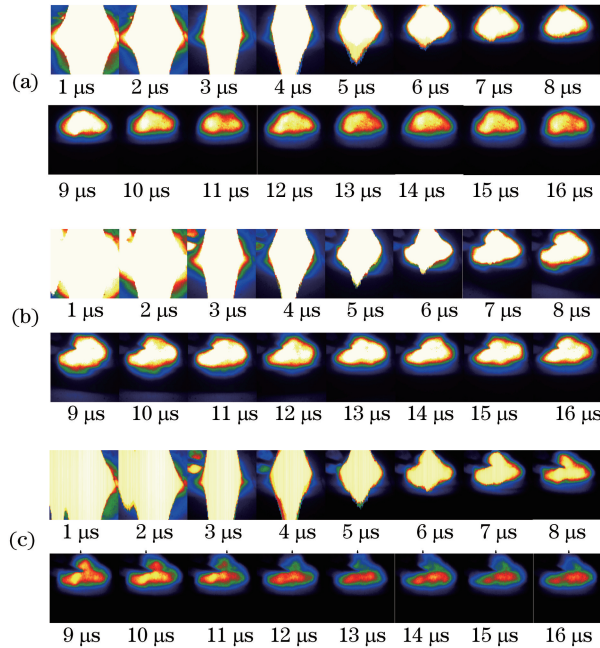


图 6 双针探针前、中、后位置的等离子体图。(a)探针前部;(b)探针中部;(c)探针后部

Fig. 6 Plasma pictures at the front, middle, and end of the double-needles probe.

(a) Front of the double-needles; (b) middle of the double-needles; (c) end of the double-needles

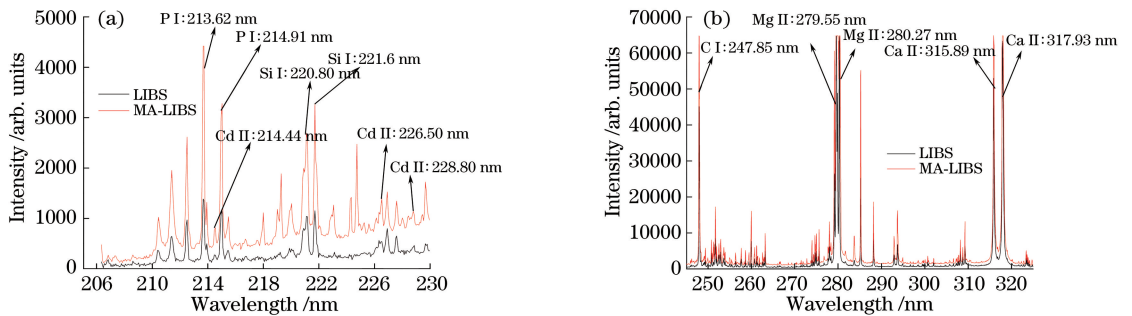


图 7 微波辅助增强前后等离子体光谱信号。(a) 205~230 nm 波段;(b) 245~325 nm 波段

Fig. 7 Plasma spectral signals before and after microwave assisted enhancement. (a) 205-230 nm band; (b) 245-325 nm band

分析图 7(a)可知,在 MA-LIBS 的 218~220 nm 与 223~226 nm 波段内,谱线的丰富度明显增强。分析其原因,可能是这些谱线相对应的元素受微波增强的效果非常明显,从而使该波段内出现了丰富的谱线;另一个原因可能是探针在传导微波时其自身的元素也被 LIBS 激发,因而在 MA-LIBS 中出现了多条谱峰。扣除元素背景信号,计算得到 P 元素谱线的增强倍数为 3.08, Si 元素谱线的增强倍数为 2.70, Cd 元素谱线的增强倍数为 2.58。

信号强度较强,达到了饱和,但微波辅助后的增强效果较弱。这说明,微波对谱线强度弱的元素信号的增强效果更明显。

对比这 6 种元素的能级情况与原子结构发现, C、Ca、Mg 元素的原子结构较为简单,激光能较容易地破坏它们的原子结构,激发出高能电子,产生等离子体。双脉冲激光对这 3 种元素的激发已接近饱和,所以微波辅助对其谱线强度的增加并不明显。P、Si、Cd 元素的原子结构较为复杂,需要更高的能量才能激发出电子,微波为激发出的少量电子提供

在图 7(b)中, C、Mg、Ca 元素的等离子体光谱

表1 叶菜中部分元素激光等离子体线状谱线的归属情况

Table 1 Attribution of line spectra of partial elements in laser plasma of leaf vegetables

Element	$\lambda$ /nm	$E_{up}$ /eV	$E_{low}$ /eV	$A_{ki}/s^{-1}$	Configuration
P I	213.62	7.212652	1.410125	$2.83 \times 10^8$	$3s^2 3p^3 - 3s^2 3p^2 (^3P)4s$
	214.91	7.175731	1.408577	$3.18 \times 10^8$	$3s^2 3p^3 - 3s^2 3p^2 (^3P)4s$
Si I	220.80	5.613493	0	$2.62 \times 10^7$	$3s^2 3p^2 - 3s3p^3$
	221.67	5.619154	0.027668	$4.54 \times 10^7$	$3s^2 3p^2 - 3s3p^3$
Cd I	228.80	5.417127	0	$5.30 \times 10^8$	$4d^{10} 5s^2 - 4d^{10} 5s5$
	214.44	—	—	$2.80 \times 10^8$	—
Cd II	226.50	—	—	$3.00 \times 10^8$	—
	247.85	7.700561	2.689527	$2.80 \times 10^7$	$2s^2 2p^2 - 2s^2 2p3s$
Mg II	279.55	4.433753	0	$2.60 \times 10^8$	$2p^6 3s - 2p^6 3p$
	280.27	4.422400	0	$2.57 \times 10^8$	$2p^6 3s - 2p^6 3p$
Ca II	315.89	7.047119	3.124071	$3.10 \times 10^8$	$3p^6 4p - 3p^6 4d$
	317.93	7.049502	3.150962	$3.60 \times 10^8$	$3p^6 4p - 3p^6 4d$

能量,电子吸收微波能量后与等离子体中的分子、原子相互碰撞,发生更强的电离,从而提高了等离子体强度,增强了光谱信号。研究发现,以双脉冲激光为基础时,微波辅助是否能增强该元素的光谱强度与其上下能级的大小关联较小。

## 4 结 论

实验中对探针形状和探针位置进行优化,使用优化后的探针进行叶菜的 MA-LIBS 实验。优化实验的结果显示:在双针、单针、环形、双环这 4 种探针中,用双针探针的中间位置传导微波时,产生的等离子体强度最大,存在周期最长,最有利于光谱的采集。以此优选的实验条件进行微波辅助增强实验,分析比较了微波辅助增强前后的等离子体光谱图,结果发现:微波辅助对元素等离子体光谱的增强具有选择性,对原子结构复杂、激发未完全的元素增强效果更明显,如 P、Si 谱线的增强倍数分别为 3.08 倍和 2.70 倍,重金属元素 Cd 也增强了 2.58 倍;而原子结构较简单、无微波时元素谱线已经较强的 C、Mg、Ca 元素的等离子光谱信号强度的增强效果较弱。利用 MA-LIBS 选择性增强的特点和探针优化的作用,可进一步研究其对农产品中重金属元素的检测效果,增强 LIBS 技术在农产品重金属检测领域的实际应用性能。

## 参 考 文 献

- [1] Meng D S, Zhao N J, Ma M J, *et al.* Rapid soil classification with laser induced breakdown spectroscopy [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2017, 37(1): 241-246.
- 孟德硕, 赵南京, 马明俊, 等. 基于激光诱导击穿光

谱技术的土壤快速分类方法研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2017, 37(1): 241-246.

- [2] Wang J M, Yan H Y, Zheng P C, *et al.* Quantitative detection of nutrient elements in soil based on laser induced breakdown spectroscopy [J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(11): 1111002.
- 王金梅, 颜海英, 郑培超, 等. 基于激光诱导击穿光谱定量检测土壤中营养元素的研究[J]. 中国激光, 2017, 44(11): 1111002.
- [3] Wang X L, Hong X, Wang H, *et al.* Study of spectral characteristics and aging performance of room temperature vulcanized silicone rubber using laser-induced breakdown spectroscopy [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(10): 2774-2782.
- 王希林, 洪晓, 王晗, 等. 室温硫化硅橡胶的激光诱导击穿光谱特性与老化研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(10): 2774-2782.
- [4] Yang Y X, Kang J, Wang Y R, *et al.* Super sensitive detection of lead in water by laser-induced breakdown spectroscopy combined with laser-induced fluorescence technique [J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(11): 1130001.
- 杨宇翔, 康娟, 王亚蕊, 等. 水中铅元素的激光诱导击穿光谱-激光诱导荧光超灵敏检测[J]. 光学学报, 2017, 37(11): 1130001.
- [5] Wang Y J, Yuan X Q, Shi B, *et al.* The research for quantitative analysis of iron in Myanmar jades using laser induced breakdown spectroscopy [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2018, 38(1): 263-266.
- 王亚军, 袁心强, 石斌, 等. 缅甸翡翠中铁元素的激光诱导击穿光谱定量检测[J]. 光谱学与光谱分析, 2018, 38(1): 263-266.
- [6] Hu Y, Li Z H, Lü T. Quantitative measurement of

- iron content in geological standard samples by laser-induced breakdown spectroscopy combined with artificial neural network[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(5): 053003.
- 胡杨, 李子涵, 吕涛. 激光诱导击穿光谱结合人工神经网络测定地质标样中的铁含量[J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(5): 053003.
- [7] Lin Q Y, Duan Y X. Laser-induced breakdown spectroscopy: from experimental platform to field instrument [J]. *Chinese Journal of Analytical Chemistry*, 2017, 45(9): 1405-1414.
- 林庆宇, 段忆翔. 激光诱导击穿光谱: 从实验平台到现场仪器[J]. *分析化学*, 2017, 45(9): 1405-1414.
- [8] Li A, Wang L W, Guo S, *et al.* Advances in signal enhancement mechanism and technology of laser induced breakdown spectroscopy[J]. *Chinese Journal of Optics*, 2017, 10(5): 619-640.
- 李安, 王亮伟, 郭帅, 等. 激光诱导击穿光谱增强机制及技术研究进展[J]. *中国光学*, 2017, 10(5): 619-640.
- [9] Wang J M, Zheng H J, Zheng P C, *et al.* Spectral characteristics of *coptis chinensis* plasma induced by orthogonal re-heating double-pulse laser[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(7): 0702006.
- 王金梅, 郑慧娟, 郑培超, 等. 正交再加热双脉冲激光诱导黄连等离子体的光谱特性[J]. *中国激光*, 2018, 45(7): 0702006.
- [10] Yu Y, Zhao N J, Fang L, *et al.* Comparative study on laser induced breakdown spectroscopy based on single pulse and re-heating orthogonal dual pulse[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2017, 37(2): 588-593.
- 余洋, 赵南京, 方丽, 等. 单脉冲和再加热正交双脉冲激光诱导击穿光谱对比研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2017, 37(2): 588-593.
- [11] Zhou W D, Li K X, Qian H G, *et al.* Effect of voltage and capacitance in nanosecond pulse discharge enhanced laser-induced breakdown spectroscopy[J]. *Applied Optics*, 2012, 51(7): B42-B48.
- [12] Xu S N, Jiang R, Ning R B, *et al.* Effect of laser-induced crater on soil plasma radiation characteristics [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42(11): 1115005.
- 徐送宁, 姜冉, 宁日波, 等. 激光诱导熔穴对土壤等离子体辐射特性的影响[J]. *中国激光*, 2015, 42(11): 1115001.
- [13] Li C, Gao X, Liu L, *et al.* Evolution of laser-induced plasma spectrum intensity under magnetic field confinement[J]. *Acta Physica Sinica*, 2014, 63(14): 145203.
- 李丞, 高勋, 刘璐, 等. 磁场约束下激光诱导等离子体光谱强度演化研究[J]. *物理学报*, 2014, 63(14): 145203.
- [14] Iqbal A, Sun Z W, Wall M, *et al.* Sensitive elemental detection using microwave-assisted laser-induced breakdown imaging[J]. *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy*, 2017, 136: 16-22.
- [15] Lednev V N, Pershin S M, Sdvizhenskii P A, *et al.* Combining Raman and laser induced breakdown spectroscopy by double pulse lasing[J]. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 2017, 410(1): 277-286.
- [16] Chen T B, Huang L, Yao M Y, *et al.* Elemental analysis of rice using microwave assisted-laser induced breakdown spectroscopy [J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2016, 27(2): 171-176.
- 陈添兵, 黄林, 姚明印, 等. 微波辅助激光诱导击穿光谱对大米元素分析的实验研究[J]. *光电子·激光*, 2016, 27(2): 171-176.
- [17] Tampo M, Miyabe M, Akaoka K, *et al.* Enhancement of intensity in microwave-assisted laser-induced breakdown spectroscopy for remote analysis of nuclear fuel recycling [J]. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 2014, 29(5): 886-892.
- [18] Viljanen J, Sun Z W, Alwahabi Z T. Microwave assisted laser-induced breakdown spectroscopy at ambient conditions[J]. *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy*, 2016, 118: 29-36.
- [19] Chen S J, Iqbal A, Wall M, *et al.* Design and application of near-field applicators for efficient microwave-assisted laser-induced breakdown spectroscopy [J]. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 2017, 32(8): 1508-1518.
- [20] Guo S H, Wu B, Zhang L Y, *et al.* Risk of heavy metal concentration in agricultural product exceeding the safe standard: occurrence process, forewarning and control [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, 37(1): 1-8.
- 郭书海, 吴波, 张玲妍, 等. 农产品重金属超标风险: 发生过程与预警防控[J]. *农业环境科学学报*, 2018, 37(1): 1-8.
- [21] Li W B. Detecting heavy metals in leafy vegetables and method of signal enhancement based on laser induced breakdown spectroscopy [D]. Nanchang: Jiangxi Agriculture University, 2015: 28-30.
- 黎文兵. 叶菜中重金属元素的激光诱导击穿光谱检

- 测及信号增强研究[D]. 南昌: 江西农业大学, 2015: 28-30.
- [22] Yang H, Huang L, Liu M H, *et al.* Detection of Cd in Chinese cabbage by laser induced breakdown spectroscopy coupled with multivariable selection[J]. Chinese Journal of Analytical Chemistry, 2017, 45(2): 238-244.  
杨晖, 黄林, 刘木华, 等. 激光诱导击穿光谱检测青菜中镉元素的多变量筛选研究[J]. 分析化学, 2017, 45(2): 238-244.
- [23] Wang Q, Chen X L, Wang J G, *et al.* Research on factors affecting the stability of laser-induced plasmas [J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(6): 0630002.  
王琦, 陈兴龙, 王静鸽, 等. 影响激光诱导等离子体稳定性的因素研究 [J]. 光学学报, 2014, 34(6): 0630002.
- [24] Ma Y F, Zhang Q M, Wu B, *et al.* Measurement method of electromagnetic fields of plasma produced by hypervelocity impact [J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2011, 31(9): 1118-1121.  
马月芬, 张庆明, 吴碧, 等. 超高速碰撞产生等离子体的电磁场测量方法 [J]. 北京理工大学学报, 2011, 31(9): 1118-1121.