

# 微波消解-电感耦合等离子体质谱法测定食用菌 基质中 4 种重金属

刘烨潼, 张 强, 殷 萍, 刘 璐, 苏 芳, 孙 瑞, 陈秋生\*

(天津市农业质量标准与检测技术研究所, 天津 300381)

**摘 要:** **目的** 建立一种微波消解-电感耦合等离子质谱法(inductively coupled plasma-mass spectrometry, ICP-MS)测定食用菌基质中有害重金属砷(As)、汞(Hg)、铅(Pb)和镉(Cd)含量的方法。**方法** 采用硝酸和过氧化氢对食用菌基质样品进行微波消解, 消解液经稀释后用电感耦合等离子质谱仪测定, 在线内标法定量, 采用国家标准物质土壤(GBW07427)和杨树叶(GBW07604)以及重复性试验, 并经过 3 个水平的加标回收试验进行验证。**结果** 测定的不同品种食用菌基质中的 4 种重金属元素的加标回收率在 90.7%~105.3%之间, 相对标准偏差在 0.88%~4.03%之间。**结论** 该方法稳定性好、灵敏度高、定量准确, 提高了检测效率, 适用于食用菌基质中 As、Hg、Pb 和 Cd, 4 种重金属快速、准确的定量分析。

**关键词:** 食用菌; 微波消解; 电感耦合等离子质谱; 重金属; 检测

## Determination of 4 kinds of heavy metals in edible fungi by microwave digestion and inductively coupled plasma-mass spectrometry

LIU Ye-Tong, ZHANG Qiang, YIN Ping, LIU Lu, SU Fang, SUN Rui, CHEN Qiu-Sheng\*

(Tianjin Institute of Agricultural Quality Standard and Testing Technology, Tianjin 300381, China)

**ABSTRACT: Objective** To establish a method for the determination of heavy metals, including plumbum (Pb), cadmium (Cd), mercury (Hg) and arsenic (As) in edible fungi by microwave digestion and inductively coupled plasma-mass spectrometry (ICP-MS). **Methods** Nitric acid and hydrogen peroxide were used for microwave digestion for edible fungi samples. The digestion solution was diluted and determined by ICP-MS, and quantified by on-line internal standard method. It was verified by national standard material soil (GBW07427) and poplar leaves (GBW07604) and repeatability test and 3 levels of spike recovery test. **Results** The recoveries of 4 heavy metals in different edible fungus matrix were between 90.7% and 105.3%, and the relative standard deviations (RSDs) were between 0.88% and 4.03%. **Conclusion** This method has good stability, high sensitivity, accurate quantification and improves detection efficiency. It is suitable for the rapid and accurate quantitative analysis of As, Hg, Pb and Cd in edible fungi matrix.

**KEY WORDS:** edible fungi; microwave digestion; inductively coupled plasma-mass spectrometry; heavy metals; detection

基金项目: 天津市农业科技成果转化与推广项目(201701080)

Fund: Supported by Tianjin Agricultural Science and Technology Achievement Transformation and Promotion Project (201701080)

\*通讯作者: 陈秋生, 硕士, 副研究员, 主要研究方向为农产品质量与安全。E-mail: tjzbscqs@126.com

\*Corresponding author: CHENG Qiu-Sheng, Master, Associate Professor, Tianjin Institute of Agricultural Quality Standard and Testing Technology, Huada Road, 17th Kilometeric Marker of Jinjing Speedway, Xiqing District, Tianjin 300381, China. E-mail: tjzbscqs@126.com

## 1 引言

食用菌作为 21 世纪朝阳产业, 具有高蛋白、低脂肪、无污染、无公害以及食药兼用的优势, 被联合国粮农组织推荐为健康食品<sup>[1]</sup>。食用菌产业则是一项集经济效益、生态效益和社会效益于一体的短平快农村经济发展项目<sup>[2-4]</sup>。但随着食用菌栽培数量的急剧增加, 人工栽培食用菌所用的主要原料已从单纯的木屑或段木转向农副产品甚至工业废料<sup>[5,6]</sup>。食用菌对重金属具有一定的吸收富集作用, 加之近年来食用菌栽培环境受到了不同程度的污染, 导致食用菌中重金属超标事件时有发生<sup>[7]</sup>。由于重金属不能被微生物降解, 并在生物体内富集和转化, 最终通过食物链进入人体, 当人体内重金属超过一定限度时就会对身体造成严重危害<sup>[8-10]</sup>。因此, 加强食用菌生产环境的质量监控, 对保证食用菌质量安全具有重大意义。

研究表明, 食用菌重金属的污染源主要来自土壤、空气、水和基质, 由于土壤、空气、水的污染问题要通过长期、系统、复杂的过程进行统一治理, 很难在短期内得到有效控制<sup>[11-13]</sup>, 那么最直接、快速的方法是控制食用菌栽培过程中的基质的重金属含量。目前, 食用菌中重金属含量可根据食品安全国家标准 GB 5009 系列中列出的检测方法检测, 尚未颁布测定食用菌栽培基质中有害重金属含量的国家标准或行业标准, 国内外对食用菌栽培基质中有害重金属含量的测定的方法主要是借鉴土壤中总砷、总汞、铅和镉的测定方法。由于栽培基质与土壤的形成机理、条件及组分构成等均有较大的差异<sup>[14]</sup>, 在测定栽培基质中有害重金属时完全按照土壤测定的方法不恰当。本文利用微波联合消解-电感耦合等离子体质谱仪, 建立食用菌栽培基质中有害重金属(砷、汞、铅、镉)的测定方法, 以期为食用菌的安全生产提供参考。

## 2 材料与方 法

### 2.1 材料、试剂与仪器

平菇基质(木屑 89%, 石灰 1%、麦麸 10%)、香菇基质(杂木屑 40%、棉壳 40%、麸皮 18%、糖 1%、石膏 1%)(天津齐心菌类种植有限公司); 白灵菇基质(杂木屑 50%, 棉籽壳 28%, 麸皮 20%, 碳酸钙 1%, 过磷酸钙 1%)、灵芝基质(杂木屑 75%, 麸皮 20%, 玉米粉 3%, 蔗糖 1%, 石膏粉 1%)(天津市蓟县中亿建良食用菌种植专业合作社); 茶树菇菇基质(杂木屑 75%, 麸皮 20%, 玉米粉 3%, 蔗糖 1%, 石膏粉 1%)、杏鲍菇基质(杂木屑 75%, 麸皮 20%, 玉米粉 3%, 蔗糖 1%, 石膏粉 1%)(天津市静海县则森食用菌种植专业合作社); 标准参考物质土壤 GBW07427、杨树叶 GBW07604(国家一级, 国家标准物质研究中心)。

硝酸、30%过氧化氢(优级纯, 天津市风船化学试剂厂); 多元素混合标准储备液 Part# 5183-4688(10 μg/mL 的 As、Cd、Pb, 美国 Agilent 公司); 内标溶液 Part#5188-6525(Rh 浓度为 100 μg/mL, 美国 Agilent 公司); 调谐溶液 Part# 5188-6545[浓度为 10 ng/mL Li、Co、Y、Ce、Tl 混合标准溶液, 介质为 HNO<sub>3</sub> 溶液(1:49, V:V), 美国 Agilent 公司]; 汞标准溶液 GBW(E)080392(国家标准物质研究中心); 实验用水均为 Milli-Q 制备的电阻率大于 18.2 MΩ 的超纯水。

Agilent7500a 电感耦合等离子体质谱仪(美国 Agilent 公司); MARS5 微波消解仪(美国 CEM 公司); DKQ-3C 型智能控温电加热器(上海屹尧分析仪器有限公司)。

### 2.2 实验方法

#### 2.2.1 溶液的制备

称取经风干、研磨并过 Φ0.15 mm 筛的基质试样 0.35 g(精确至 0.0001 g), 置于聚四氟乙烯微波消解罐中, 加 6 mL 硝酸, 浸泡过夜, 再加 2 mL 双氧水, 进行微波消解, 消解程序如表 1 所示。待消解完全并冷却后, 在 130 °C 下赶酸至 0.5~1.0 mL, 取下冷却, 用超纯水将消煮液无损转移至 25 mL 容量瓶中, 并定容, 备用。同时做空白试验。标准物质土壤和杨树叶处理方法与基质样品相同。处理液根据实际样品含量情况再稀释。

表 1 微波消解程序  
Table 1 Digestion conditions of the microwave

步骤	功率/W	功率百分数/%	爬升时间/min	温度/°C	保持时间/min
1	1200	100	6	120	2
2	1200	100	4	140	5
3	1200	100	3	160	20

#### 2.2.2 仪器条件的优化

使用调谐液(<sup>7</sup>Li、<sup>89</sup>Y、<sup>59</sup>Co、<sup>140</sup>Ce 和 <sup>205</sup>Tl 含量为 10 ng/mL)对仪器进行调谐, 通过调节 RF 功率、载气流量、炬管水平和竖直位置及采样深度等参数, 优化仪器的灵敏度和稳定性, 使仪器达到检测要求<sup>[15-17]</sup>。优化的仪器工作参数见表 2。按照丰度大、干扰小、灵敏度高的原则来选择同位素见表 3。

同时采用在线方式加入内标溶液。干扰方程选择仪器自带的 EPA\_200.8 校正同质异位素和多原子离子干扰。

#### 2.2.3 标准溶液的配制

多元素混合标准溶液 Part#5183-4688 用 HNO<sub>3</sub> 溶液(1:19, V:V)将标准贮备液逐级稀释为 5、10、20、50、100、200 ng/mL 6 个浓度梯度。

汞标准溶液 GBW(E)080392 用 HNO<sub>3</sub> 溶液(1:19, V:V)将标准贮备液逐级稀释为 0.2、0.5、1.0、1.5、2.0 ng/mL

5 个浓度梯度。

试剂空白:  $\text{HNO}_3$  溶液(1:19,  $V:V$ )。

表 2 ICP-MS 工作参数  
Table 2 Working parameters of ICP-MS

项目	参数
功率	1200 W
冷却气流量	15.0 L/min
辅助气流量	1.0 L/min
载气流量	1.10 L/min
样品提升速率	1.0 mL/min
采样深度	7.0 mm
分析模式	定量模式
单位质量数采集点数	3
数据采集模式	跳峰采集模式
积分时间	0.3 s/同位素
数据采集重复次数	3

表 3 同位素的选择  
Table 3 The selection of measured isotopes

元素	As	Cd	Hg	Pb
同位素	75	111	202	208

#### 2.2.4 样品的测定

在优化的仪器条件下编辑测定方法, 引入在线内标校正仪器漂移, 改善基体影响, 待仪器稳定后, 依次引入试剂空白、标准曲线溶液、标准品溶液和基质样品溶液。编辑校准文件, 选择合适的内标校正元素, 并根据校准方程计算测定样品中各元素浓度。

#### 2.2.5 元素含量计算

$$X = \frac{(C - C_0) \times V}{m \times (1 - X_0) \times 1000}$$

式中:  $X$ —试样中元素含量, mg/kg;  $C$ —试样消化液测定浓度, ng/mL;  $V$ —试样消化液总体积, mL;  $m$ —试样质量, g;  $X_0$ —风干试验的含水量。

#### 2.2.6 精密度计算

相对标准偏差(RSD)=标准偏差( $SD$ )/计算结果的算术平均值( $X$ ) $\times 100\%$

#### 2.2.7 回收率计算

加标回收率( $P$ )=[加标试样浓度( $C_2$ )-试样浓度( $C_1$ )]/加标量  $C_3 \times 100\%$

## 3 结果与分析

### 3.1 消解试剂的选择

硝酸和双氧水在进行 ICP-MS 分析样品前处理的最适用的试剂, 硝酸具有强氧化性、腐蚀性, 不易形成多原子离子, 几乎不会对谱图产生干扰; 而  $\text{H}_2\text{O}_2$  也是一种强氧化剂, 分子结构由氢和氧元素构成, 背景噪音与水相似, 也不会引入额外的干扰<sup>[18]</sup>。实验分别采用  $\text{HNO}_3$  和  $\text{HNO}_3 + \text{H}_2\text{O}_2$  作为消解液, 按照消解程序消解后, 发现单独使用硝酸消解, 效果不佳, 消解液浑浊, 有残渣。而硝酸和过氧化氢组合消解, 消解液透亮无残渣, 消解完全。

### 3.2 微波消解方法的确立

微波消解效果主要受消解时间和消解最高温度影响<sup>[19]</sup>, 本实验以香菇基质为测试品种, 分别对时间和温度设置 3 水平, 进行综合评价, 见表 4。实验发现, 当消解时间小于 15 min, 或温度为 120 °C 的时候, 消解不完全, 溶液浑浊, 元素含量测定偏低; 消解温度为 200 °C 的时候 As 和 Hg 含量较低, 温度过高会造成砷和汞元素流失。综合考虑, 最高温度为 160 °C, 保持时间为 20 min 为最佳组合。针对微波消解功率问题, 可跟据消解罐数来确定, 采用功率最小化原则, 既可延长仪器使用寿命还节能环保。

### 3.3 对照及精密度试验

食用菌基质原料很多, 分为主料和辅料 2 大类。主料多是以满足食用菌碳营养为目的的原料, 如农作物秸秆、皮壳、木屑等木质成分。辅料主要用来满足食用菌对氮营养和磷、钾、硫、钙等矿质元素及维生素的需要, 如麦麸、米糠、各种饼肥、磷酸二氢钾、碳酸钙等有机成分。由于市场上还没有食用菌基质此类标准物质, 介于成分组成, 试验选择了土壤和杨树叶两种标准物质作为供试对象, 按上述方法, 分别用标准物质土壤(GBW07427)和杨树叶(GBW07604)作对照实验, 测定其中砷、汞、铅和镉含量, 并进行 6 次重复测定, 结果见表 5。结果表明上述测定方法可以满足本实验对各元素的测定, 并且仪器精密度良好。

### 3.4 回收率试验

为了验证方法的准确性, 对 6 份不同品种的食用菌栽培基质样品分别加入 3 个不同浓度的元素标准溶液进行加标回收试验, 每个添加水平重复测定 6 次。分析结果见表 6-9。从结果可以看出, 砷的回收率在 95.3%~103.5% 之间, RSD 值在 0.88%~3.72% 之间; 镉的回收率在 95.7%~101.5% 之间, RSD 值在 0.92%~3.97% 之间; 汞的回收率为 90.7%~105.3% 之间, RSD 值在 1.65%~4.03% 之间; 铅的回收率在 95.5%~102.8% 之间, RSD 值在 0.89%~3.01% 之间。说明该方法可以准确测定栽培基质的各元素的含量, 准确可靠。

表 4 微波消解条件比对试验  
Table 4 Microwave digestion condition comparison test

因素	时间/min	温度/°C	As 含量/(mg/kg)	Hg 含量/(mg/kg)	Pb 含量/(mg/kg)	Cd 含量/(mg/kg)
1	10	120	0.108	0.032	0.87	0.013
2	10	160	0.124	0.040	0.91	0.020
3	10	200	0.113	0.021	1.15	0.029
4	15	120	0.125	0.035	0.85	0.011
5	15	160	0.134	0.048	1.19	0.030
6	15	200	0.119	0.030	1.16	0.027
7	20	120	0.132	0.043	0.93	0.016
8	20	160	0.157	0.052	1.20	0.032
9	20	200	0.121	0.027	1.21	0.034

表 5 对照及精密度试验(n=6)  
Table 5 Control and precision test (n=6)

元素	土壤(GBW07427)			杨树叶(GBW07604)		
	测定值/(mg/kg)	RSD/%	证书值/(mg/kg)	测定值/(mg/kg)	RSD/%	证书值/(mg/kg)
As	11.2	2.04	10.6±0.8	0.418	3.75	0.37±0.09
Cd	0.135	3.28	0.13±0.01	0.295	3.02	0.32±0.07
Hg	0.049	2.93	0.052±0.006	0.030	5.41	0.026±0.003
Pb	20.8	1.26	21.6±1.2	1.34	1.59	1.5±0.3

表 6 砷加标回收试验(n=6)  
Table 6 Arsenic standard recovery test (n=6)

样品编号	本底值/(mg/kg)	加标浓度/(mg/kg)	平均值/(mg/kg)	回收率/%	RSD/%
平菇基质	0.072	1.00	1.05	97.9	3.72
	0.072	5.00	5.10	100.5	1.78
	0.072	10.0	10.1	100.2	1.24
香菇基质	0.170	1.00	1.13	96.6	1.18
	0.170	5.00	5.11	98.8	1.78
	0.170	10.0	10.2	100.3	1.21
茶树菇基质	0.081	1.00	1.07	99.0	2.96
	0.081	5.00	5.26	103.5	1.14
	0.081	10.0	10.2	101.2	0.95
白灵菇基质	0.144	1.00	1.09	95.3	1.92
	0.144	5.00	5.13	99.7	1.40
	0.144	10.0	10.2	100.8	0.87
杏鲍菇基质	0.058	1.00	1.03	97.4	3.85
	0.058	5.00	5.02	99.2	2.05
	0.058	10.0	9.89	98.3	2.87
灵芝基质	0.053	1.00	1.02	96.9	1.98
	0.053	5.00	4.98	98.5	0.88
	0.053	10.0	10.2	101.5	0.96

表7 镉加标回收试验( $n=6$ )  
Table 7 Cadmium standard recovery test ( $n=6$ )

样品编号	本底值/(mg/kg)	加标浓度/(mg/kg)	平均值/(mg/kg)	回收率/%	RSD/%
平菇基质	0.049	1.00	1.03	98.2	3.85
	0.049	5.00	5.01	99.2	2.11
	0.049	10.0	9.67	96.2	1.65
香菇基质	0.034	1.00	1.05	101.5	4.76
	0.034	5.00	5.02	99.7	1.23
	0.034	10.0	10.0	99.7	0.92
茶树菇基质	0.037	1.00	1.04	100.3	2.96
	0.037	5.00	4.89	97.1	1.54
	0.037	10.0	9.92	98.8	1.03
白灵菇基质	0.041	1.00	1.02	98.0	4.54
	0.041	5.00	5.01	99.4	2.78
	0.041	10.0	10.02	99.8	1.67
杏鲍菇基质	0.047	1.00	1.02	97.4	2.89
	0.047	5.00	4.83	95.7	3.97
	0.047	10.0	9.66	96.1	1.59
灵芝基质	0.179	1.00	1.18	100.1	3.05
	0.179	5.00	5.21	100.6	2.68
	0.179	10.0	10.1	99.2	1.36

表8 汞加标回收试验( $n=6$ )  
Table 8 Mercury standard recovery test ( $n=6$ )

样品编号	本底值/(mg/kg)	加标浓度/(mg/kg)	平均值/(mg/kg)	回收率/%	RSD/%
平菇基质	0.030	0.10	0.119	91.5	4.03
	0.030	0.20	0.221	96.1	2.98
	0.030	0.50	0.521	98.3	2.04
香菇基质	0.047	0.10	0.136	92.5	3.99
	0.047	0.20	0.238	96.4	4.01
	0.047	0.50	0.529	96.7	2.62
茶树菇基质	0.029	0.10	0.117	90.7	3.56
	0.029	0.20	0.217	94.8	1.99
	0.029	0.50	0.521	98.5	2.49
白灵菇基质	0.061	0.10	0.157	97.5	3.89
	0.061	0.20	0.252	96.6	2.03
	0.061	0.50	0.540	96.3	1.77
杏鲍菇基质	0.036	0.10	0.130	95.6	3.22
	0.036	0.20	0.230	97.5	2.96
	0.036	0.50	0.526	98.1	3.73
灵芝基质	0.105	0.10	0.216	105.3	1.92
	0.105	0.20	0.311	102.0	2.12
	0.105	0.50	0.578	95.5	1.65

表 9 铅加标回收试验( $n=6$ )  
Table 9 Lead standard recovery test ( $n=6$ )

样品编号	本底值/(mg/kg)	加标浓度/(mg/kg)	平均值/(mg/kg)	回收率/%	RSD/%
平菇基质	0.422	1.00	1.39	97.7	1.45
	0.422	5.00	5.32	98.1	1.22
	0.422	10.0	10.5	100.7	1.96
香菇基质	1.15	1.00	2.13	99.1	1.78
	1.15	5.00	6.27	101.9	1.25
	1.15	10.0	11.2	100.4	1.94
茶树菇基质	0.214	1.00	1.22	100.5	2.58
	0.214	5.00	5.11	98.0	1.33
	0.214	10.0	10.1	98.9	3.01
白灵菇基质	0.998	1.00	1.99	99.6	2.67
	0.998	5.00	6.03	100.5	1.38
	0.998	10.0	10.5	95.5	2.02
杏鲍菇基质	0.203	1.00	1.19	98.9	2.56
	0.203	5.00	5.12	98.4	1.98
	0.203	10.0	10.1	99.0	2.79
灵芝基质	1.65	1.00	2.70	101.9	1.45
	1.65	5.00	6.84	102.8	1.03
	1.65	10.0	11.9	102.1	0.89

## 4 结 论

目前,我国食品安全国家标准 GB 2762-2017<sup>[20]</sup>《食品中污染物限量》已对食用菌及其制品中砷、汞、铅、镉的限量作出了明确规定,许多食用菌对培养料中的重金属有不同程度的富集作用,本方法采用微波联合消解-电感耦合等离子质谱法同时测定食用菌基质中 4 种有害重金属的含量,具有高灵敏度、高通量、分析速度快、重现性好等优点,可为食用菌安全性评价及检测等工作提供技术参考。

## 参考文献

- [1] 谢云峰. 食用菌供应链质量安全管理体系研究[D]. 武汉: 湖北工业大学, 2013.  
Xie YF. Research on supply chain management of quality and safety of edible fungi [D]. Wuhan: Hubei University of Technology, 2013.
- [2] 汤相峰. 食用菌栽培技术探究[J]. 江西农业, 2018, (4): 18.  
Tang XF. Research on cultivation technology of edible fungus [J]. Jiangxi Agric, 2018, (4): 18.
- [3] 郑鑫, 郭晓帆. 食用菌栽培技术与发展前景研究[J]. 时代农机, 2018, 45(10): 47.  
Zheng X, Guo XF. Study on cultivation techniques and development prospects of edible fungi [J]. Times Agric Mach, 2018, 45(10): 47.
- [4] 张伟民. 食用菌栽培技术要点及推广应用研究[J]. 湖北农机化, 2019, (2): 16.  
Zhang WM. Key points of edible fungi cultivation techniques and their popularization and application [J]. Hubei Agric Mech, 2019, (2): 16.
- [5] 刘思洁, 牛会坤, 方赤光, 等. 食用菌主要重金属污染及风险评价研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2018, 9(12): 3206-3211.  
Liu SJ, Niu HK, Fang CG, et al. Research progress on the main heavy metal pollution and risk assessment of edible mushrooms [J]. J Food Saf Qual, 2018, 9(12): 3206-3211.
- [6] 张旭, 刘华晶, 许修宏. 废弃物作培养料栽培食用菌研究现状[J]. 现代农业科技, 2012, (11): 79-80.  
Zhang X, Liu HJ, Xu XH. Research status of edible fungi cultivation with waste as culture material [J]. Mod Agric Sci Technol, 2012, (11): 79-80.
- [7] 刘朋虎, 雷锦桂, 王义祥, 等. 食用菌富集重金属主要特征与相关机制研究进展[J]. 热带作物学报, 2017, 38(12): 2407-2414.  
Liu PH, Lei JG, Wang YX, et al. Advances in research on characteristics and related mechanisms of heavy metal enrichment by edible fungi [J]. Chin J Trop Crop, 2017, 38(12): 2407-2414.
- [8] 杨樟贵, 柯乐芹, 张松成, 等. 食用菌铅镉重金属富集转化规律研究[J]. 中国农业信息, 2014, (21): 24-25.  
Yang ZG, Ke LQ, Zhang SC, et al. Enrichment and transformation of lead and cadmium in edible fungi [J]. China Agric Inform, 2014, (21): 24-25.

- [9] 王馨萍, 魏志刚, 陶艳丽, 等. 三种食用菌对镉元素富集作用的研究[J]. 食品安全导刊, 2015, (6): 97-98.  
Wang XP, Wei ZG, Tao YL, *et al.* Study on the enrichment of cadmium by three edible fungi [J]. *China Food Saf Magz*, 2015, (6): 97-98.
- [10] 刘焯潼, 陈秋生, 刘连强, 等. 平菇对重金属铅和镉吸收富集规律研究[J]. 食品工业, 2015, 36(10): 223-226.  
Liu YT, Chen QS, Liu LQ, *et al.* Dynamics of absorption and accumulation of pleurotus ostreatus accumulated heavy metals plumbum and cadmium from culture medium [J]. *Food Ind*, 2015, 36(10): 223-226.
- [11] Kokkoris V, Massas I, Polemis E, *et al.* Accumulation of heavy metals by wild edible mushrooms with respect to soil substrates in the Athens metropolitan area (Greece) [J]. *Sci Total Environ*, 2019, 685: 280-296.
- [12] Huang QQ, Jia Y, Wan YA, *et al.* Market survey and risk assessment for trace metals in edible fungi and the substrate role in accumulation of heavy metals [J]. *J Food Sci*, 2015, 80(7): 1612-1618.
- [13] 黄擎, 李维, 郭相, 等. 重金属在食用菌中的富集研究进展[J]. 中国食用菌, 2014, 33(2): 4-6.  
Huang Q, Li W, Guo X, *et al.* Research progress on accumulation of heavy metal in edible fungi [J]. *Edible Fungi China*, 2014, 33(2): 4-6.
- [14] 叶丽燕, 李哲. 我国食用菌栽培技术改良及其应用推广[J]. 中国食用菌, 2019, 38(4): 21-23.  
Ye LY, Li Z. Cultivation technology improvement and application extension of edible fungi in China [J]. *Edible Fungi China*, 2019, 38(4): 21-23.
- [15] 谭丽盈, 胡国辉. 微波消解电感耦合等离子体质谱法同时测定生姜药材中 6 种重金属元素含量[J]. 中国药业, 2019, 28(4): 25-28.  
Tan LY, Hu GH. Simultaneous determination of six heavy metal elements of *Zingiber officinale* by microwave digestion-ICP-MS [J]. *China Rad*, 2019, 28(4): 25-28.
- [16] 陈秋生, 张强, 殷萍, 等. 电感耦合等离子体质谱法同时测定冬枣中多种元素的含量[J]. 天津农业科学, 2015, 21(2): 5-8.  
Chen QS, Zhang Q, Yin P, *et al.* Study on simultaneous determination of multiple elements in Chinese winter jujube with inductively coupled plasma mass spectrometry [J]. *Tianjin Agric Sci*, 2015, 21(2): 5-8.
- [17] 陈秋生, 张强, 刘焯潼, 等. 电感耦合等离子体质谱法同时测定土壤中多种元素含量的研究[J]. 中国土壤与肥料, 2013, (4): 97-101.  
Chen QS, Zhang Q, Liu YT, *et al.* Study on simultaneous determination of multiple elements in soil with inductively coupled plasma mass spectrometry [J]. *Soil Fertilizers Sci China*, 2013, (4): 97-101.
- [18] 陈秋生, 刘焯潼, 张强, 等. 电感耦合等离子体质谱法同时测定食用菌中多种元素含量的研究[J]. 食品工业, 2013, (7): 212-214.  
Chen QS, Liu YT, Zhang Q, *et al.* Study on simultaneous determination of multiple elements in mushrooms with inductively coupled plasma mass spectrometry [J]. *Food Ind*, 2013, (7): 212-214.
- [19] 邓华阳, 吴燕梅, 陈孟君, 等. 微波消解-电感耦合等离子体质谱法测定畜禽粪便中 8 种金属元素[J]. 食品安全质量检测学报, 2019, 10(3): 745-749.  
Deng HY, Wu YM, Chen MJ, *et al.* Determination of 8 metal elements in livestock manure by microwave digestion-inductively coupled plasma mass spectrometry [J]. *J Food Saf Qual*, 2019, 10(3): 745-749.
- [20] GB 2762-2017 食品安全国家标准 食品中污染物限量 [S].  
GB 2762-2017 National food safety standards-Contamination limits in food [S].

(责任编辑: 王 欣)

## 作者简介



刘焯潼, 硕士, 助理研究员, 主要研究方向为农产品质量安全检测技术及风险评估研究。

E-mail: liuyetong198363@126.com



陈秋生, 硕士, 副研究员, 主要研究方向为农产品质量安全检测技术及风险评估研究。

E-mail: tjzbscqs@126.com