

微波消解-电感耦合等离子体质谱法测定 铁皮石斛茎和花中多种矿质元素

黄彪^{1,2*}, 何伟³, 刘文静^{1,2}, 王红梅³, 李巍^{1,2}, 吴建衍¹

(1. 福建省农业科学院农业质量标准与检测技术研究所, 福州 350003;
2. 福建省农产品质量安全重点实验室, 福州 350003; 3. 福建连天福生物科技有限公司, 龙岩 366200)

摘要: **目的** 建立微波消解-电感耦合等离子体质谱(inductively coupled plasma-mass spectrometry, ICP-MS)法同时测定铁皮石斛茎和花中 8 种矿质元素 Na(钠)、Mg(镁)、K(钾)、Ca(钙)、Fe(铁)、Mn(锰)、Zn(锌)、Cu(铜)含量的方法。**方法** 样品经 HNO₃-H₂O₂ 微波消解前处理后, 由 ICP-MS 检测方法测定铁皮石斛茎和花中 8 种元素含量, 外标法定量。**结果** 8 种元素标准曲线线性范围内相关系数为 0.9994~0.9999。方法检出限为 11.3~298.7 μg/kg, 平均加标回收率为 86.2%~104.8%, 相对标准偏差为 0.8%~7.6%。**结论** 该方法快速、准确、灵敏度高, 可用于铁皮石斛中多元素的同时测定。

关键词: 铁皮石斛; 微波消解; 电感耦合等离子体串联质谱法; 金属元素

Determination of multiple mineral elements in *Dendrobium officinale* by microwave digestion-inductively coupled plasma-tandem mass spectrometry

HUANG Biao^{1,2*}, HE Wei³, LIU Wen-Jing^{1,2}, WANG Hong-Mei³, LI Wei^{1,2}, WU Jian-Yan¹

(1. Institute of Quality Standards & Testing Technology for Agro-Products, Fujian Academy of Agricultural Sciences, Fuzhou 350003, China; 2. Fujian Key Laboratory of Agro-products Quality & Safety, Fuzhou 350003, China; 3. Fujian, Liantianfu Biology Technology Co., Ltd, Longyan 366200, China)

ABSTRACT: Objective To establish a method for the simultaneous determination of 8 mineral elements (Na, Mg, K, Ca, Fe, Mn, Zn, Cu) in *Dendrobium officinale* samples by microwave digestion-inductively coupled plasma-tandem mass spectrometry (ICP-MS). **Methods** The samples were pre-treated with HNO₃-H₂O₂ microwave digestion, then the contents of 8 elements in stem and flower of *Dendrobium officinale* were determined by ICP-MS method and quantified by external standard method. **Results** The correlation coefficients in the linear range of the standard curve of 8 elements were 0.9994–0.9999. The limits of detection were 11.3–298.7 μg/kg, and the average recoveries were 86.2%–104.8%, with the relative standard deviations (RSDs) of 0.8%–7.6%. **Conclusion** The method is simple, rapid and accurate, which is suitable for simultaneous determination of 8 metal elements in *Dendrobium officinale*.

基金项目: 福建省属公益类科研院所专项(2019R1022-3)、福建省农业科学院青年英才计划项目(YC2017-9)、福建省农业科学院农产品质量安全创新团队项目(STIT2017-1-12)

Fund: Supported by the Public Welfare Project of Fujian Province (2019R1022-3), Young Talents Project of Fujian Academy of Agricultural Sciences (YC2017-9), and Innovation Team Project of Fujian Academy of Agricultural Sciences (STIT2017-1-12)

***通讯作者:** 黄彪, 博士, 助理研究员, 主要研究方向为农产品营养成分。E-mail: banbanhb1981@163.com

***Corresponding author:** HUANG Biao, Ph.D, Assistant Professor, Institute of Quality Standards & Testing Technology for Agro-Products, Fujian Academy of Agricultural Sciences, Fuzhou 350003, China. E-mail: banbanhb1981@163.com

KEY WORDS: *Dendrobium officinale*; microwave digestion; inductively coupled plasma-tandem mass spectrometry; metal elements

1 引言

铁皮石斛(*Dendrobium officinale*)是兰科石斛属中草药植物,位居“九大仙草之首”,被认为具有良好的保健作用。现代药理学研究表明铁皮石斛具有抗氧化、抗肿瘤、增强免疫等作用^[1-3]。铁皮石斛中不仅含有多糖、生物碱、氨基酸、多酚等对人体有益的活性成分^[4,5],而且还含有多种人体必需的无机元素^[6,7]。药用植物中的无机元素对其药效及品质有重要影响,无机元素可以通过本身或与其他有效成分的协同效应发挥药效作用^[8,9]。因此,建立快速、便捷、准确测定铁皮石斛中无机元素的方法具有重要的意义。

在样品无机元素检测过程中,样品前处理是其中极为关键的步骤,样品前处理方法直接影响分析的精密度和准确度。实验室样品常用的前处理方法主要包括干法灰化、湿法消解、微波消解。微波消解法是目前较为理想的样品前处理方法,具有处理速度快、试剂用量少、消解完全及损失量低等特点^[10,11]。目前对无机元素的测定方法主要有原子吸收光谱法(atomic absorption spectrometry, AAS)、原子荧光光谱法(atomic fluorescence spectrometry, AFS)、电感耦合等离子体原子发射光谱法(inductively coupled plasma-optical emission spectroscopy, ICP-OES)、电感耦合等离子体质谱法(inductively coupled plasma-mass spectrometry ICP-MS)。在众多分析检测方法中,电感耦合等离子体质谱法因具有检出限低、灵敏度高、基体效应小、线性范围宽和多元素同时测定等优点,已广泛应用环境、食品、药品、植物样品的检测分析^[12-14]。

以前市场上的铁皮石斛制品如石斛枫斗、胶囊、石斛粉主要是以石斛茎部原料加工成产品,近年来随着铁皮石斛多样性产品的不断丰富,对铁皮石斛花的化学成分深入研究也逐渐增多。研究表明,铁皮石斛花中含有丰富的多酚、类黄酮、氨基酸及无机元素^[15-17]。中草药植物不同药用部位活性成分含量会存在一定区别,目前有关铁皮石斛茎和花中金属元素含量比较的报道还较少。本研究建立微波消解-电感耦合等离子体质谱法对铁皮石斛茎和花部位的无机元素进行检测,以期对铁皮石斛的深入研究及多样性产品的综合开发提供相关数据支撑。

2 材料与方 法

2.1 仪器与试剂

2030 型电感耦合等离子质谱仪(日本岛津公司); TOPER 型微波消解仪、UT-400 型可调式电热板(上海屹尧仪器科技发展有限公司); Millipore Direct-Q5 超纯水仪(苏

州赛恩斯仪器发展有限公司); FW100 型高速万能粉碎机(天津市泰斯特仪器有限公司); XW-80A 旋涡混合器(上海医科大学仪器厂)。

Na(钠)、Mg(镁)、K(钾)、Ca(钙)、Fe(铁)、Mn(锰)、Zn(锌)、Cu(铜)元素标准溶液(1000 mg/L 或 10000 mg/L, 国家标准物质中心); ⁹Be、⁹⁰Co、¹¹⁵In、²⁰⁹Bi 标准调谐溶液(1000 μg/L, 日本岛津公司); 硝酸(电子级, 德国 Merck 公司); 硝酸、过氧化氢(优级纯, 上海国药集团化学试剂有限公司); 生物成分标准物质-苹果(GBW10019, 中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所); 实验用水为去离子水; 实验所用玻璃及聚四氟乙烯罐均用 HNO₃: H₂O(1:2, V:V)浸泡过夜, 清洗干净后用去离子水润洗烘干后备用。

实验用材料铁皮石斛茎和花样品(干样)(福建省龙岩市连城福建连天福生物科技有限公司)。

2.2 实验方法

2.2.1 溶液配制

Na(钠)、Mg(镁)、K(钾)、Ca(钙)、Fe(铁)、Mn(锰)、Zn(锌)、Cu(铜)元素贮备液由经国家认证并授予标准物质证书的单元素或多元素标准液(1000 mg/L 或 10000 mg/L)经硝酸溶液(5:95, V:V)稀释得到; 混合标准工作溶液由适量单元素标准贮备液或多元素混合标准贮备液经硝酸溶液(5:95, V:V)稀释得到, 各元素浓度如表 1 所示。

表 1 混合标准溶液各元素浓度
Table 1 Standard solution concentration

序号	元素	标准溶液系列浓度/(μg/L)
1	Na	200, 1000, 2000, 10 000, 20 000
2	Mg	200, 1000, 2000, 10 000, 20 000
3	K	400, 2000, 4000, 20 000, 40 000
4	Ca	400, 2000, 4000, 20 000, 40 000
5	Fe	10, 20, 100, 200, 1000
6	Mn	10, 20, 100, 200, 1000
7	Zn	5, 10, 50, 100, 500
8	Cu	5, 10, 50, 100, 500

2.2.2 样品消解条件

称取样品 0.500 g 茎或花干样粉末于微波消解内罐中, 加入 5 mL 硝酸, 放置 1 h, 再加入 1 mL 过氧化氢溶液, 旋紧罐盖, 按照微波消解仪标准操作步骤进行消解(消解条件见表 2)。消解完成后取出消解罐, 缓慢打开罐盖排气, 用少量水冲洗内盖, 将消解罐放在控温电热板上 100 °C 加热,

直到溶液剩约 1.0 mL, 放置架上冷却。将消解液用超纯水定容至 25 mL, 混匀得供试样品溶液; 同时做空白试验。精密量取 2.5 mL 供试样品溶液至 25 mL 容量瓶中, 以超纯水定容摇匀, 得 K(钾)、Ca(钙)、Mg(镁)、Fe(铁)元素供试样品液。

表 2 微波消解条件
Table 2 Microwave digestion condition

消解方式	步骤	控制温度/°C	升温时间/min	恒温时间/min
微波消解	1	120	5	5
	2	150	5	10
	3	190	5	20

2.2.3 仪器工作参数

以标准调谐溶液对仪器进行调谐, 以保证检测灵敏度和分辨率等指标达到检测要求, 通过多次优化射频功率、气体流量等相关工作参数, 确定的仪器工作条件见表 3。

2.3 统计分析

Excel 2007 对实验数据进行整理; DPS 7.05 对数据统计及差异显著性分析。

3 结果与分析

3.1 前处理条件优化比较

前处理过程, 对 3 种不同的前处理方法进行了比较。由表 4 可知, 3 种消解方法中湿式消解法消耗酸试剂最多, 微波消解法次之; 干法灰化法消耗时间最长, 微波消解法耗时最短。综合可知, 微波消解方法具有用时短/消耗试剂少的特点。

3.2 线性参数及检出限

对所配制的混合标准系列溶液利用 ICP-MS 进行测定, 绘制标准曲线, 得出线性回归方程, 结果见表 5。结果显示, 各元素的标准曲线线性关系良好, 相关系数为 0.9994 ~ 0.9999。对空白溶液进行 20 次平行测定, 以 3 倍标准偏差计算方法的检出限, 所测元素的检出限为 11.3 ~ 298.7 $\mu\text{g}/\text{kg}$, 可满足实际样品测定的要求。并在相同的前处理条件下, 对所配制的混合标准系列溶液利用 ICP-OES 进行测定, 绘制标准曲线, 得出线性回归方程, 并计算检出限, 结果见表 6。比较可以看出, ICP-MS 方法相对来说具有更低的检出限。

表 3 ICP-MS 仪器操作条件
Table 3 Operating conditions of ICP-MS

参数名称	参数	参数名称	参数
射频功率/W	1500	样品提升速率/(r/s)	0.3
等离子体气流量/(L/min)	15	雾化器	高盐/同心雾化器
载气流量/(L/min)	0.80	采样锥/截取锥	镍/铂锥
辅助气流量/(L/min)	0.40	采样深度/mm	8~10
氦气流量/(mL/min)	4~5	采集模式	跳峰
雾化室温度/°C	2.0	检测方式	自动

表 4 不同前处理方法对比
Table 4 Comparison of different pretreatment methods

前处理方法	消解体系	酸用量	前处理时间/h	消解温度/°C
湿式消解	硝酸-高氯酸	硝酸 20 mL	4.0	120
		高氯酸 20 mL		180
微波消解	硝酸-过氧化氢	硝酸 5 mL	1.5	120
		过氧化氢 1 mL		150
				190
干法灰化	硝酸	硝酸 5 mL	9.0	550

表 5 ICP-MS 方法线性参数及检出限
Table 5 Linearity parameters and limits of detection of ICP-MS method

序号	元素	线性范围/($\mu\text{g/L}$)	线性方程	相关系数(r)	检出限/($\mu\text{g/kg}$)
1	Na	200 ~ 20 000	$Y = 0.009671X + 1523.7$	0.9998	31.8
2	Mg	200 ~ 20 000	$Y = 0.0006064X + 70.577$	0.9999	33.8
3	K	400 ~ 40 000	$Y = 0.002022X + 1910.4$	0.9994	89.2
4	Ca	400 ~ 40 000	$Y = 0.0001028X + 31.792$	0.9999	298.7
5	Fe	10 ~ 1 000	$Y = 17.70X - 14.122$	0.9998	88.8
6	Mn	10 ~ 1 000	$Y = 26.26X + 47.661$	0.9997	11.3
7	Zn	5 ~ 500	$Y = 10.69X + 40.124$	0.9999	16.17
8	Cu	5 ~ 500	$Y = 48.31X + 189.09$	0.9999	11.57

表 6 ICP-OES 方法线性参数及检出限
Table 6 Linearity parameters and limits of detection of ICP-OES method

序号	元素	线性范围/($\mu\text{g/L}$)	线性方程	相关系数(r)	检出限/($\mu\text{g/kg}$)
1	Na	200 ~ 10 000	$Y = 3429X - 269274.8$	0.9996	88.5
2	Mg	200 ~ 10 000	$Y = 1024X - 16751.7$	0.9999	614.5
3	K	200 ~ 10000	$Y = 1143X - 90174.4$	0.9997	609.5
4	Ca	200 ~ 1 000	$Y = 485.3X - 1588.1$	0.9999	1114
5	Fe	10 ~ 1 000	$Y = 466.5X - 1794.2$	0.9999	387.5
6	Mn	5 ~ 500	$Y = 3654X - 373.7$	0.9999	13.6
7	Zn	5 ~ 500	$Y = 135.1X + 37.5$	0.9997	31.9
8	Cu	5 ~ 500	$Y = 447.7X - 73.7$	0.9999	30.0

3.3 国家标准参考物质分析

采用建立的方法对国家标准参考物质 - 苹果(GBW 10019)重复测定 6 次, 相应结果见表 7, 测定的结果值均在参考范围内, 相对标准偏差(relative standard deviation, RSD%)均小于 4.0%, 表明该方法具有良好的准确性。

表 7 标准物质元素量值与实际测定值($n=6$)
Table 7 Standard and measurement values of mineral elements contents in apple standard samples ($n=6$)

元素	标准值	测量值	RSD/%
Na/(g/kg)	1.16 \pm 0.09	1.12	1.8
Mg/(g/kg)	0.39 \pm 0.06	0.37	2.2
K/(g/kg)	7.7 \pm 0.4	7.8	2.6
Ca/(g/kg)	0.49 \pm 0.01	0.48	0.8
Fe/(mg/kg)	16 \pm 2	16.8	3.6
Mn/(mg/kg)	2.7 \pm 0.2	2.6	0.7
Zn/(g/kg)	2.1 \pm 0.4	2.3	1.1
Cu/(g/kg)	2.5 \pm 0.2	2.4	1.6

3.4 重复性实验

分别精密称量铁皮石斛茎和花样品 0.500 g, 平行实验 6 次。按照 2.2.2 的方法进行样品前处理, 将供试样品液进行 ICP-MS 分析, 根据标准曲线方程得出元素平均含量并计算相对标准偏差, 结果见表 8。平行实验测得的元素含量相对标准偏差均小于 5.2%, 表明方法的重现性良好。

3.5 回收率及精密度实验

根据各元素在铁皮石斛茎和花样品中的含量情况, 进行低、中、高水平加标回收实验, 每个水平平行测定 6 次。加标实验平均回收率 86.2% ~ 104.8%, 标准偏差 0.8% ~ 7.6%, 结果见表 9。实验结果表明分析方法准确度较好, 能满足检测的要求。

3.6 实际样品测定

利用建立的方法对铁皮石斛茎和铁皮石斛花中多种矿质元素进行测定, 结果见表 10。铁皮石斛茎中元素的含量顺序为 Ca>K>Mg>Fe>Mn>Na>Zn>Cu, Ca 元素在铁皮石斛茎中的含量为最高, 本研究测得铁皮石斛茎中元素含量高低顺序与张桂玲等^[6]的研究结果较为一致; 铁皮石斛花中元素的含量顺序为 K>Ca>Mg>Fe>Mn>Na>Zn>Cu, 与铁

铁皮石斛中元素含量有所不同的是在铁皮石斛花中 K 元素含量为最高,有其他研究者^[15]用 ICP-OES 测定铁皮石斛干花中多种元素含量结果也表明在铁皮石斛花中 K 元素含量高于其他所测元素。各元素在铁皮石斛茎和铁皮石斛花中的含量存在极显著性差异($P<0.01$),除 Ca 元素和 Mn 元素外,其他元素在铁皮石斛花中的含量均大于茎中的含量。

表 8 重复性实验测定结果($n=6$)
Table 8 Results of repetitive experiments ($n=6$)

元素	铁皮石斛茎 (mg/kg)	RSD/%	铁皮石斛花 (mg/kg)	RSD/%
Na	58.30	1.8	102.9	2.1
Mg	975.2	2.3	1392.6	1.9
K	9585	4.3	19583	4.3
Ca	10921	5.2	9618	3.9
Fe	252.3	2.2	845	2.8
Mn	189.9	1.6	156.1	1.9
Zn	21.62	1.1	28.65	0.9
Cu	2.581	1.4	3.906	1.7

表 9 方法回收率及相对标准偏差($n=6$)
Table 9 Recoveries and relative standard deviations of the method ($n=6$)

元素	加标量 (mg/kg)	茎		花	
		回收率/%	RSD/%	回收率/%	RSD/%
Na	12.5	93.2	3.6	95.2	5.5
	25.0	96.8	2.2	97.3	3.3
	50.0	98.9	1.6	101.2	2.1
	250	99.2	2.8	103.7	3.8
Mg	500	101.2	1.9	104.8	2.1
	1000	104.3	2.5	101.1	1.1
	2500	101.0	5.4	89.9	4.7
K	5000	103.8	4.9	98.7	4.1
	10000	92.9	3.3	91.4	1.9
	2500	95.7	7.6	93.0	4.6
Ca	5000	97.6	3.7	95.1	4.5
	10000	98.8	4.8	95.6	3.0
Fe	125	86.2	6.8	88.3	4.5
	250	92.1	4.3	94.2	5.2
	500	97.4	5.7	93.8	3.1
Mn	50	95.2	2.0	94.0	1.4
	100	98.2	1.2	97.1	2.6
	200	99.0	0.8	97.0	1.2
Zn	5.0	87.3	4.5	88.7	3.5
	10.0	90.4	4.1	90.3	4.0
	20.0	92.8	3.2	90.5	4.5
Cu	1.0	95.3	2.5	96.0	2.0
	2.0	98.6	2.3	98.4	2.8
	4.0	99.3	1.9	98.8	1.1

表 10 铁皮石斛茎和花中矿质元素含量($n=3$)
Table 10 Contents of mineral elements in *Dendrobium officinale* samples ($n=3$)

元素	铁皮石斛茎/(mg/kg)	铁皮石斛花/(mg/kg)
Na	58.15±0.35 ^{bb}	106.5±4.5 ^{aa}
Mg	955.0±27.0 ^{bb}	1360±54 ^{aa}
K	9540±78 ^{bb}	19600±600 ^{aa}
Ca	10620±472 ^{aa}	9785±315 ^{bb}
Fe	246.5±10.5 ^{bb}	856.0±11.0 ^{aa}
Mn	189.0±2.0 ^{aa}	156.5±0.5 ^{bb}
Zn	21.80±0.35 ^{bb}	28.90±0.40 ^{aa}
Cu	2.585±0.005 ^{bb}	3.975±0.125 ^{aa}

注:同一列不同小写字母表示差异显著, $P<0.05$;不同大写字母差异极显著, $P<0.01$ 。

4 结 论

本研究建立了微波消解-电感耦合等离子体串联质谱同时测定铁皮石斛中 8 种矿质元素的方法。该方法分析快速、检出限低、准确度高,是分析铁皮石斛中多种元素的可行方法。所测定元素在铁皮石斛不同部位含量表现出一定差异性:在铁皮石斛茎中, Ca 元素含量为最高;而在铁皮石斛花中, K 元素含量为最高。在铁皮石斛茎和花中都富含人体所必需的 Na、Mg、K、Ca 等常量元素与 Fe、Mn、Zn、Cu 等微量元素。本研究对铁皮石斛茎和花中多种矿质元素的测定比较可为研究铁皮石斛中微量元素与药效的内在联系以及用剂量提供参考,对铁皮石斛多样性产品的开发利用也有一定的实际意义。

参考文献

- [1] 马荣锋,唐川,汪雯瀚,等.霍山石斛与铁皮石斛的体外生物活性比较[J].食品工业科技,2019,40(12):26-30,37.
Ma RF, Tang C, Wang WH, et al. Comparison of biological activities *in vitro* of *Dendrobium huoshanense* and *Dendrobium officinale* [J]. Sci Technol Food Ind, 2019, 40(12): 26-30, 37.
- [2] 张义元,陈乃伟,丁重阳,等.铁皮石斛茎部和叶部多糖的性质和活性[J].食品与生物技术学报,2017,36(9):959-965.
Zhang YY, Chen NW, Ding ZY, et al. Characterization and bioactivity analysis of *Dendrobium officinale* stem and leaf polysaccharide [J]. J Food Sci Biotech, 2017, 36(9): 959-965.
- [3] Meng LZ, Lv GP, Hu DJ, et al. Effects of polysaccharides from different species of *Dendrobium*(Shihu) on macrophage function [J]. Molecules, 2013, 18(5): 5779-5791.
- [4] 鲍素华,查学强,郝杰,等.不同分子量铁皮石斛多糖体外抗氧化活性研究[J].食品科学,2009,30(21):123-127.
Bao SH, Zha XQ, Hao J, et al. *In vitro* antioxidant activity of polysaccharides with different molecular weights from *Dendrobium*

- candidum* [J]. Food Sci, 2009, 70(21): 123–127.
- [5] 聂少平, 蔡海兰. 铁皮石斛活性成分及其功能研究进展[J]. 食品科学, 2012, 33(23): 356–361.
Nie SP, Cai HL. Research progress in bioactive components and functions of *Dendrobium officinale* [J]. Food Sci, 2012, 33(23): 356–361.
- [6] 张桂玲, 冉靛, 罗绪强. 两种荔波产铁皮石斛多糖、氨基酸及微量元素含量分析[J]. 时珍国医国药, 2017, 28(2): 296–298.
Zhang GL, Ran L, Luo XQ. Comparative analysis of polysaccharides, amino acids and trace elements in *Dendrobium officinale* from Libo [J]. Lishizhen Med Mat Med Res, 2017, 28(2): 296–298.
- [7] 栾洁, 辛甜, 储智勇, 等. 不同来源铁皮石斛多糖, 微量元素及氨基酸含量分析[J]. 时珍国医国药, 2014, 25(7): 1728–1729.
Luan J, Xin T, Chu ZY, et al. Dermination of Polysaccharide, trace elements and amino acids content in three types of *Dendrobium officinale* [J]. Lishizhen Med Mat Med Res, 2014, 25(7): 1728–1729.
- [8] 祁俊生, 徐辉碧, 周井炎, 等. 解表植物类中药中微量元素与功效关系[J]. 计算机与应用化学, 2003, 20(4): 449–452.
Qi JS, Xu HB, Zhou JY, et al. Studies on the amount of trace elements and efficacy in Chinese medicinal herbs for treating exterior syndromes [J]. Comput Appl Chem, 2003, 20(4): 449–452.
- [9] 王薇, 王玉秀, 徐泰国, 等. 8 种心血管类中药微量元素与药效的研究[J]. 西南民族大学学报(自然科学版), 2010, 36(1): 109–112.
Wang W, Ma YX, Xu TG, et al. Study on eight kinds of microscopic elements & effects of the Chinese medicine in cardiovascular [J]. J Southwest Univ Nat (Nat Sci Ed), 2010, 36(1): 109–112.
- [10] 曹洪斌, 申明金, 陈莲惠. 中药重金属元素测定方法的研究进展[J]. 西北药学杂志, 2016, 31(6): 654–658.
Cao HB, Shen MJ, Chen LH. Research progress of determination methods of heavy metals in traditional Chinese medicine [J]. Northwest Pharm J, 2016, 31(6): 654–658.
- [11] 王洁. 电感耦合等离子体发射质谱法同时测定茶叶中的 20 种元素[J]. 食品安全质量检测学报, 2018, 9(3): 51–53.
Wang J. Simultaneous determination of 20 elements in tea by inductively coupled plasma-mass spectrometry [J]. J Food Saf Qual, 2018, 9(3): 51–53.
- [12] 肖亚兵, 蔡国瑞, 王伟. 电感耦合等离子体质谱(ICP-MS)技术进展[J]. 食品研究与开发, 2013, 34(8): 124–129.
Xiao YB, Cai GR, Wang W. Progress in techniques of inductively coupled plasma mass spectrometry [J]. Food Res Dev, 2013, 34 (8): 124–129.
- [13] 邵丹丹, 王中缓, 张宏康, 等. 电感耦合等离子体质谱法联用技术应用研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2017, 8(9): 51–53.
Shao DD, Wang ZY, Zhang HK, et al. Application progress of inductively coupled plasma mass spectrometry hyphenated techniques [J]. J Food Saf Qual, 2017, 8(9): 51–53.
- [14] 陈玉娥, 孙杨杨, 钟慧怡, 等. 电感耦合等离子质谱法测定野菊花中多种无机元素[J]. 药物分析杂志, 2020, 40(3): 562–567.
Chen YE, Sun YY, Zhong HY, et al. Determination of inorganic elements in *Chrysanthemum Indici Flos* by ICP-MS [J]. Chin J Pharm Anal, 2020, 40(3): 562–567.
- [15] 辛小雪, 王雪香, 李明宇, 等. 铁皮石斛不同花期及花朵不同部位活性组分分析[J]. 浙江农林大学学报, 2019, 36(1): 200–205.
Xin XX, Wang XX, Li MY, et al. Active components of flowers in different flowering stages and floral structures of *Dendrobium officinale* [J]. J Zhejiang A&F Univ, 2019, 36(1): 200–205.
- [16] 曲继旭, 贺雨馨, 孙志蓉. 四种石斛花氨基酸和挥发性成分[J]. 浙江农林大学学报, 2019, 36(1): 200–205.
QU JX, He YX, Sun ZR. Comparison of amino acids and volatile constituents in four kinds of *Dendrobium* flowers [J]. J Zhejiang A&F Univ, 2019, 36(1): 200–205.
- [17] 张珍林, 韩邦兴, 刘莉彬. ICP-OES 测定铁皮石斛干花中多种元素[J]. 中国野生植物资源, 2020, 39(1): 4–8.
Zhang ZL, Han BX, Liu LB. Determination of multiple elements in dried *Dendrobium officinale* flowers by ICP-OES [J]. Chin Wild Plant Res, 2020, 39(1): 4–8.

(责任编辑: 韩晓红)

作者简介



黄 彪, 博士, 助理研究员, 主要研究方向为农产品营养成分。
E-mail: banbanhb1981@163.com