

# 电感耦合等离子体质谱同时测定螺旋藻 保健品中16种元素含量

胡越, 丁宏, 李梦怡, 张隆龙, 董喆\*

(中国食品药品检定研究院, 北京 100050)

**摘要:** **目的** 建立微波消解-电感耦合等离子体质谱法同时测定螺旋藻保健品中Na、Mg、Al、K、Ca、Cr、Mn、Fe、Co、Ni、Cu、Zn、As、Se、Cd、Pb等16种矿物元素含量的方法。**方法** 螺旋藻保健品经处理后加入硝酸, 通过微波消解, 采用电感耦合等离子体质谱法对其中的16种矿物元素含量进行测定, 通过在线添加内标溶液对结果进行实时校正。**结果** 建立的方法16种元素线性关系良好( $r^2 \geq 0.99$ ), 检出限低, 精密性在8.61%以内, 加标回收率在86%~112%之间。**结论** 该方法操作简单、灵敏度高、准确可靠, 适用于螺旋藻保健品中多种矿物元素含量的同时测定。

**关键词:** 螺旋藻; 电感耦合等离子体质谱法; 矿物元素

## Simultaneous determination of the 16 kinds of mineral elements content in spirulina supplements by inductively coupled plasma-mass spectrometry

HU Yue, DING Hong, LI Meng-Yi, ZHANG Long-Long, DONG Zhe\*

(National Institutes for Food and Drug Control, Beijing 100050, China)

**ABSTRACT: Objective** To establish a method for simultaneous determination of 16 kinds of elements including Na, Mg, Al, K, Ca, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, As, Se, Cd, Pb in spirulina supplements by microwave digestion-inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS). **Methods** After treatment, spirulina supplements were added with nitric acid. The content of 16 mineral elements were determined by ICP-MS after microwave digestion. **Results** The correlation coefficient of working curves of this method were greater than 0.99. This method showed a low limit of detection, the relative standard deviations were under 8.61%, and the recoveries rates were in the range of 86%-112%. **Conclusion** This method is simple, sensitive and accurate, which is suitable for the simultaneous determination of multiple elements in spirulina supplements.

**KEY WORDS:** spirulina; inductively coupled plasma-mass spectrometry; mineral elements

## 1 引言

螺旋藻因在显微镜下呈螺旋丝状而得名, 是自然界中营养最丰富、最全面的生物之一。它属于蓝藻门、蓝藻

纲、螺旋藻属或节旋藻属, 富含多种蛋白质、氨基酸、维生素以及微量元素<sup>[1]</sup>。螺旋藻可以提高机体免疫力、抗衰老、降血脂、促进蛋白质合成、抗癌等, 具有极高的医疗保健价值, 因此被联合国粮农组织(Food and Agriculture

\*通讯作者: 董喆, 副研究员, 主要研究方向为食品安全检测。E-mail: dongzh2009@126.com

\*Corresponding author: DONG Zhe, Associate Professor, National Institutes for Food and Drug Control, No.2, Tiantanxili, Dongcheng District, Beijing 100050, China. E-mail: dongzh2009@126.com

Organization, FAO)、联合国世界食品协会誉为“21 世纪最佳的理想食品”,也被世界卫生组织评为“人类 21 世纪的最佳保健品”。螺旋藻作为保健品在我国已经生产应用了 20 多年,经国家食品药品监督管理局网站查询,以其为主要原料的保健食品共有 213 个品种,有着广大的市场需求<sup>[2-6]</sup>。

螺旋藻中含有丰富的微量元素,且这些元素均与有机物结合,易被人体吸收,降低对人体的毒副作用,能够有效调节机体免疫及酶的活性<sup>[7]</sup>。已发现的螺旋藻多数生长在碱性盐湖,作为一种水生藻类,在生长过程中会吸附某些重金属,它的生物富集作用不容忽视,而螺旋藻制品在加工过程中也容易被铅、镉、铬等重金属污染。目前国内对其微量单元素检测都有研究,由于螺旋藻含有丰富的矿物质,基体较复杂,在元素的测定过程中易产生干扰。螺旋藻中矿物质元素主要采用 X 射线荧光光谱分析法(X ray fluorescence)和原子吸收光谱法(atomic absorption spectrometry, AAS)进行分析<sup>[8,9]</sup>。X 射线荧光光谱分析法存在样品检出限高,样品前处理过程繁琐,造成样品污染与损失等缺点;原子吸收光谱法存在样品量大,测试周期长等缺点。电感耦合等离子体质谱法(inductively coupled plasma-mass spectrometry, ICP-MS)与原子吸收、原子荧光、电感耦合等离子体发射光谱相比,具有抗干扰性强,简便快速、灵敏度高、可同时测定多元素的优点<sup>[10]</sup>。

本研究采用微波消解-电感耦合等离子质谱法同时测定螺旋藻保健品中 16 种矿物元素含量,利用碰撞/反应池技术减少同质异位素、多原子离子、双电荷离子的干扰,极大提高了检测速度,同时检测精密度高、检出限低、稳定性好,说明该方法分析速度快,操作简便,可以满足实验室对保健食品的检测要求,是一种值得推广的检测方法。对国内的 9 个品牌 12 个批次螺旋藻保健品中矿物元素含量进行了分析检测,发现不同产品各元素含量差异显著,以为保健品中矿物元素的规范测定提供参考。

## 2 材料与方 法

### 2.1 仪器与试剂

ICAP-Q 型电感耦合等离子质谱仪(美国 Thermo Fisher Scientific 公司); MARS5 型微波消解仪(美国 CEM 公司); Milli-Q 型超纯水机(德国 Sartorius 公司); BHW 09C 型敞开式电加热恒温炉(博通公司); AL204 型电子天平(美国 Mellter Toledo 公司,感量 0.1 mg)。

Na、Mg、Al、K、Ca、Cr、Mn、Fe、Co、Ni、Cu、Zn、As、Se、Cd、Pb 混合元素标准溶液(质量浓度分别为:Ca、K、Mg、Na 2000  $\mu\text{g/mL}$ , Al、Fe 500  $\mu\text{g/mL}$ , Cu、Mn、Zn 50  $\mu\text{g/mL}$ , As、Cd、Co、Cr、Ni、Pb、Se 5  $\mu\text{g/mL}$ )(批号 M2-MEB664154)、In、Re 单元素标准溶液(质量浓度均

为 1000  $\mu\text{g/mL}$ ,批号分别为 K2-IN653104、M2-RH656122,美国 Inorganic 公司); Ge(质量浓度为 1000  $\mu\text{g/mL}$ ,批号为 11720-2,国家有色金属及电子材料分析测试中心); Li、Co、In、U、Ba、Ce 质谱调谐液(质量浓度均为 1  $\mu\text{g/mL}$ ,美国 Thermo Fisher Scientific 公司); 硝酸(优级纯,国药集团有限公司)。

### 2.2 实验方法

#### 2.2.1 标准溶液配制

精确移取适量混合元素标准溶液,用 5%硝酸溶液逐级稀释,制备成浓度分别为 1.00、2.00、5.00、10.00、20.00 mg/L 的 Na、Mg、K、Ca 混合标准溶液;浓度分别为 0.25、0.50、1.25、2.50、5.00 mg/L 的 Al、Fe 混合标准溶液;浓度分别为 0.025、0.050、0.125、0.250、0.500 mg/L 的 Cu、Mn、Zn 混合标准溶液;浓度分别为 0.0025、0.0050、0.0125、0.0250、0.0500 mg/L 的 As、Cd、Co、Cr、Ni、Pb、Se 混合标准溶液。

精确移取适量 1 mL Ge、In、Re 标准溶液,用 5%硝酸溶液定容至 100 mL,得到 10 mg/L 标准储备液,然后精确移取 0.1 mL 内标储备液,用 5%硝酸溶液定容至 100 mL,得到 10  $\mu\text{g/L}$  内标工作液。

#### 2.2.2 样品液制备

螺旋藻保健品胶囊制剂取内容物,片剂经研磨混合均匀后分别准确称取 0.3 g 左右,置于干净的聚四氟乙烯消解罐中,加入 5 mL 硝酸使样品完全浸没,放入电加热恒温炉中 100  $^{\circ}\text{C}$  敞口预消解 30 min,观察黄烟冒完后取出消解罐静置冷却常温后,拧上罐盖,放入微波消解仪中消解,消解程序见表 1。

表 1 微波消解程序  
Table 1 Time-temperature program for digestion

温度/ $^{\circ}\text{C}$	升温时间/min	保持时间/min
120	8	3
150	5	10
180	5	20

消解完毕后将消解罐取出冷却,开盖敞口放入电加热恒温炉中 120  $^{\circ}\text{C}$  加热赶酸至 2 mL 以下,用超纯水定容至 25 mL 得到样品溶液,用 5%硝酸稀释 20 倍得到稀释液,分别上机检测。同法制备空白溶液。

#### 2.2.3 仪器工作条件

用质量浓度均为 10 mg/L 的质谱调谐液对仪器进行最佳工作条件选择,使仪器灵敏度、氧化物、双电荷、分辨率等指标达到要求。仪器参考条件为射频功率:1550 W;冷却气氦气流速:14 L/min;雾化器氦气流速:1 mL/min;辅助气流速:0.8 L/min;采样深度:5 mm;雾化器:微流同心雾化器;雾化室温度:3  $^{\circ}\text{C}$ ;采样锥与截取锥类型:镍锥;

模式: KED; 碰撞气: 高纯氦气 (>99.999%), 流速: 4.2 mL/min; 进样速度: 40 r/min; 驻留时间: 0.02 s。同时引入待测样品溶液与内标混合溶液(Ge、In、Re 10  $\mu\text{g/L}$ )进行检测。

#### 2.2.4 样品测定

在优化的仪器条件下在线引入内标, 依次引入试剂空白、标准溶液、样品空白、样品溶液。根据元素质量数差别采用不同的内标进行校正, 每个样品取 3 个数值。以校正后的强度结果为纵坐标(Y), 质量浓度为横坐标(X), 绘制标准曲线, 根据标准曲线计算得到样品的质量浓度。

### 3 结果与分析

#### 3.1 线性范围

在仪器最佳条件下, 依次引入系列标准溶液, 在线添加内标溶液, 进行 ICP-MS 分析。以各元素标准溶液浓度为横坐标, 各元素与相应内标响应值的比值为纵坐标, 绘制标准曲线, 相关系数均大于 0.99。各元素线性方程、相关系数及线性范围见表 2。

#### 3.2 检出限与定量限

按 2.2.3 项下方法制备 11 份空白样品, 在优化后的实验条件下依次进样检测, 计算各元素的标准偏差, 以 3 倍标准偏差除以相应元素标准曲线的斜率, 得各元素的仪器检出限(limit of detection, LOD); 以 10 倍标准偏差除以相应元素标准曲线的斜率, 得各元素的仪器定量限(limit of

quantitation, LOQ)<sup>[11]</sup>。按照称样量 0.3 g, 定容至 25 mL 计, 计算各元素的方法检出限与定量限, 结果见表 3。

表 2 各元素线性方程、相关系数及线性范围  
Table 2 Linear equations, correlation coefficients and linear ranges for each element

元素	线性方程	相关系数	线性范围/(mg/L)
<sup>23</sup> Na	$Y=3694426X+223038$	0.9963	1.00~20.00
<sup>24</sup> Mg	$Y=1623364X+220423$	0.9947	1.00~20.00
<sup>27</sup> Al	$Y=547317X+27094$	0.9981	0.25~5.00
<sup>39</sup> K	$Y=1413495X+36169$	0.9959	1.00~20.00
<sup>44</sup> Ca	$Y=114426X+8987$	0.9989	1.00~20.00
<sup>52</sup> Cr	$Y=29484X+16838$	0.9976	0.0025~0.0500
<sup>55</sup> Mn	$Y=19679X+5023$	0.9949	0.025~0.500
<sup>57</sup> Fe	$Y=772035X+11764$	0.9989	0.25~5.00
<sup>59</sup> Co	$Y=53575X+612$	0.9986	0.0025~0.0500
<sup>60</sup> Ni	$Y=12909X+4836$	0.9952	0.0025~0.0500
<sup>63</sup> Cu	$Y=33381X+17721$	0.9942	0.025~0.500
<sup>66</sup> Zn	$Y=5302X+22096$	0.9967	0.025~0.500
<sup>75</sup> As	$Y=2568X+25$	0.9961	0.0025~0.0500
<sup>78</sup> Se	$Y=258X+27$	0.9969	0.0025~0.0500
<sup>111</sup> Cd	$Y=11527X+98$	0.9950	0.0025~0.0500
<sup>208</sup> Pb	$Y=143870X+55754$	0.9945	0.0025~0.0500

表 3 检出限与定量限  
Table 3 LOD and LOQ

元素	仪器检出限/(mg/L)	仪器定量限/(mg/L)	方法检出限/(mg/kg)	方法定量限/(mg/kg)
<sup>23</sup> Na	0.003	0.009	0.2	0.7
<sup>24</sup> Mg	0.01	0.04	1	3
<sup>27</sup> Al	0.02	0.06	2	5
<sup>39</sup> K	0.004	0.01	0.3	1
<sup>44</sup> Ca	0.01	0.04	0.9	3
<sup>52</sup> Cr	0.0001	0.0003	0.009	0.03
<sup>55</sup> Mn	0.0001	0.0005	0.01	0.04
<sup>57</sup> Fe	0.02	0.06	2	5
<sup>59</sup> Co	0.000006	0.00002	0.0005	0.002
<sup>60</sup> Ni	0.0007	0.002	0.06	0.2
<sup>63</sup> Cu	0.0003	0.001	0.02	0.08
<sup>66</sup> Zn	0.005	0.02	0.5	2
<sup>75</sup> As	0.00002	0.00005	0.001	0.005
<sup>78</sup> Se	0.00009	0.0003	0.008	0.03
<sup>111</sup> Cd	0.000006	0.00002	0.0005	0.002
<sup>208</sup> Pb	0.0003	0.001	0.02	0.08

### 3.3 方法准确度和精密度

取待测样品平行称量 6 份,按上述方法消解后用 ICP-MS 测定其含量,计算其相对标准偏差为 2.26%~8.61%;准确称取 0.3 g 左右样品,向其中加入定量的被测元素,测定其回收率为 86%~112%,见表 4,结果表明本法有较好的准确度和精密度。

### 3.4 实际样品检测分析

按照本方法对市场上 9 个品牌 12 批次螺旋藻保健品中矿物元素含量进行了分析检测,检测结果见表 5。根据检测结果可以看出螺旋藻保健品富含多种矿物元素,但对于不同的螺旋藻保健品,其中的各元素含量差异非常显著,这可能与其原料产地、种植过程、加工工艺等有关。其中 Zn、Cu、Mn、Fe 等微量元素在营养学中具有重要的意义,它们作用于不同酶,在体内的新陈代谢、物质传递中起到重要作用,Se 更是由于其抗氧化性,能够保护心血管、降低癌症发病率,在近年来受到中外学者的广泛关注,建议国标中增加对其含量的规范<sup>[12-14]</sup>。对比 GB/T 16919-1997《食用螺旋藻粉》<sup>[15]</sup>中污染元素  $As \leq 0.5 \text{ mg/kg}$ 、 $Pb \leq 2.0 \text{ mg/kg}$ 、 $Cd \leq 0.2 \text{ mg/kg}$  的规定,可以看出被检测样品含量均低于国标要求,为合格产品,然而螺旋藻国标中尚未规定 Cr 含量,在被检测的所有样本中均有 Cr 检出,考虑到 Cr 的毒害性,建议国标增加相应的限量指标。

## 4 讨论

### 4.1 消解体系选择

本实验采用微波消解对样品进行前处理,该方法具有操作安全,压力高,密闭性好,待测元素不易损失,消化彻底等优点,有效避免了其他复杂前处理可能带来的污染和损失。对样品消解采用高纯度的硝酸作为消解剂,同时制备空白样品溶液,可以有效避免消解剂引入的金属离子使得本底增高,同时消解产生的多原子离子较少,质谱干扰较小。螺旋藻保健品片剂基质中常含有硬脂酸盐、碳酸盐等,加酸后剧烈反应,消耗掉部分硝酸,要及时补加;部分样品基质含有少量二氧化硅作辅料,导致样品消解不彻底,为避免氢氟酸对质谱中炬管、雾化器等玻璃部件的腐蚀,且由于氢氟酸对身体的伤害较大,本实验采取过滤取滤液上机测试,没有使用氢氟酸。

### 4.2 同位素的确定

测定元素时一般选择具有较大丰度值的同位素,但在实际应用中常存在同质异位素重叠、多原子离子、双电荷离子等质谱干扰因素,影响结果的准确性,故而可以选择丰度值较大、干扰少的同位素进行测定以消除干扰<sup>[16]</sup>。本实验中  $^{40}\text{Ar}$  对  $^{40}\text{Ca}$ 、 $^{40}\text{Ar}+^{16}\text{O}$  对  $^{56}\text{Fe}$ 、 $^{58}\text{Fe}$  对  $^{58}\text{Ni}$ 、

表 4 精密度与回收率( $n=6$ )  
Table 4 Precision and recovery of the method ( $n=6$ )

元素	本底值/(mg/kg)	RSD/%	加标量/(mg)	测得值/(mg/kg)	回收率/%
$^{23}\text{Na}$	4411	2.77	0.2	5209	89
$^{24}\text{Mg}$	3461	2.79	0.2	4257	89
$^{27}\text{Al}$	13875	4.17	0.05	325	107
$^{39}\text{K}$	13875	4.17	0.2	14881	112
$^{44}\text{Ca}$	1574	4.24	0.2	2460	99
$^{52}\text{Cr}$	0.82	8.43	0.0005	3.04	99
$^{55}\text{Mn}$	32.32	3.45	0.005	53.09	93
$^{57}\text{Fe}$	756	2.56	0.05	949	86
$^{59}\text{Co}$	0.18	3.12	0.0005	2.24	92
$^{60}\text{Ni}$	0.53	6.07	0.0005	2.61	93
$^{63}\text{Cu}$	0.71	2.26	0.005	19.95	86
$^{66}\text{Zn}$	10.19	5.35	0.005	27.79	90
$^{75}\text{As}$	0.11	3.82	0.0005	2.10	89
$^{78}\text{Se}$	0.082	6.95	0.0005	1.829	92
$^{111}\text{Cd}$	0.0056	5.84	0.0005	1.9486	87
$^{208}\text{Pb}$	0.119	8.61	0.0005	2.109	89

表 5 样品含量测定结果(mg/kg, n=2)  
Table 5 Result of sample test (mg/kg, n=2)

样品编号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
<sup>23</sup> Na	3231	6377	3371	2380	3421	2905	3326	5570	4964	2188	2450	7958
<sup>24</sup> Mg	2844	2276	1524	1999	2145	2361	2525	2275	1191	2381	1726	1994
<sup>27</sup> Al	21	161	123	26	97	15	62	99	190	56	97	228
<sup>39</sup> K	12502	11920	5849	9665	10377	10365	10577	8951	6027	1200	7322	9978
<sup>44</sup> Ca	590	4644	28290	859	879	503	1267	4017	19328	1447	736	1061
<sup>52</sup> Cr	0.33	1.66	0.66	0.33	0.92	0.24	0.55	0.89	0.89	0.074	0.78	0.86
<sup>55</sup> Mn	15.24	119.98	19.70	23.13	20.78	13.04	24.16	24.21	20.98	22.82	20.03	22.69
<sup>57</sup> Fe	311	523	257	269	626	235	567	367	296	385	740	416
<sup>59</sup> Co	0.27	0.17	0.14	0.73	0.15	0.26	0.14	0.20	0.15	1.4	0.35	0.27
<sup>60</sup> Ni	0.31	0.79	0.38	0.94	0.59	0.24	0.34	1.13	1.17	1.46	0.52	0.62
<sup>63</sup> Cu	1.34	1.41	1.14	0.99	1.13	1.05	0.53	1.01	1.34	1.63	1.13	0.94
<sup>66</sup> Zn	9.79	24.81	6.26	5.62	8.62	8.25	6.99	10.59	5.92	6.57	6.77	7.87
<sup>75</sup> As	0.239	0.125	0.132	0.067	0.086	0.205	0.081	0.462	0.166	0.070	0.117	0.275
<sup>78</sup> Se	0.060	0.095	0.210	0.067	0.071	≤0.03	0.079	≤0.03	0.097	0.056	0.503	0.111
<sup>111</sup> Cd	0.0905	0.0910	0.0340	0.0258	0.0148	0.0651	0.0045	0.0085	0.0606	0.0084	0.018	0.0317
<sup>208</sup> Pb	0.517	0.607	0.303	≤0.08	0.212	0.465	0.086	0.153	0.338	≤0.08	1.0	0.37

<sup>36</sup>Ar+<sup>14</sup>N+<sup>14</sup>N 对 <sup>64</sup>Zn、<sup>40</sup>Ar+<sup>40</sup>Ar 对 <sup>80</sup>Se、<sup>114</sup>Sn<sup>112</sup>Sn 对 <sup>114</sup>Cd<sup>112</sup>Cd 等存在干扰, 故而部分待测元素同位素的选择为 <sup>44</sup>Ca、<sup>57</sup>Fe、<sup>60</sup>Ni、<sup>66</sup>Zn、<sup>78</sup>Se、<sup>111</sup>Cd, 其他元素为丰度最高的同位素。同时采用碰撞池技术 (collision cell technology, CCT) 的动能歧视 (kinetic energy discrimination, KED) 模式消除相关的质谱干扰<sup>[17]</sup>。

### 4.3 内标元素的确定

在 ICP-MS 分析过程中, 分析信号会随着时间而发生漂移, 内标能够校正由于基体效应、电离效应、雾化效应、仪器信号波动产生的变化, 以保证测定结果的准确性。内标元素一般为样品本底中不含或者含量很低的元素, 且其质量数、电离能与分析元素接近且受干扰较少。

## 5 结 论

本方法采用微波消解-电感耦合等离子质谱法同时测定了螺旋藻保健品中 Na、Mg、Al、K、Ca、Cr、Mn、Fe、Co、Ni、Cu、Zn、As、Se、Cd、Pb 等 16 种元素, 操作简便, 检测结果准确可靠, 能够满足螺旋藻保健品中矿物元素的检测, 并通过对样品检测的结果分析为其质量标准提供了科学的实验依据。

### 参考文献

[1] 何善生, 王力, 李健, 等. 螺旋藻研究进展[J]. 食品工业, 2017, (12):

263-268.  
He SH, Wang L, Li J, *et al.* Advances in spirulina research [J]. Food Ind, 2017, (12): 263-268.  
[2] 包国良, 王茵. 螺旋藻中营养成分检测及其生物学活性研究[J]. 中国卫生检验杂志, 2012, (5): 1034-1036.  
Bao GL, Wang Y. Study on nutrients detection in spirulina and their biological activity [J]. Chin J Health Lab Technol, 2012, (5): 1034-1036.  
[3] 王文博, 孙建光, 徐晶. 螺旋藻产品活性物质检测与免疫功能研究[J]. 中国食品卫生杂志, 2011, (1): 54-61.  
Wang WB, Sun JG, Xu J. Bioactive compounds in spirulina products and their immunological functions [J]. Chin J Food Hyg, 2011, (1): 54-61.  
[4] 许娇红, 张熠, 杨秀静, 等. 螺旋藻多糖增强免疫力功能试验研究[J]. 海峡药学, 2018, (1): 31-33.  
Xu JH, Zhang Y, Yang XJ, *et al.* Experimental study on enhancing immunity of the spirulina polysaccharides [J]. Strait Pharm J, 2018, (1): 31-33.  
[5] 张文, 吴清平, 吴军林. 螺旋藻营养保健价值及开发应用进展[J]. 食品与发酵科技, 2013, (3): 89-92.  
Zhang W, Wu QP, Wu JL. The nutrition health value and research progress of spirulina [J]. Food Ferm Technol, 2013, (3): 89-92.  
[6] 罗艳, 涂晓琴, 赵薇, 等. 螺旋藻类保健食品中粗多糖的含量测定[J]. 海峡药学, 2018, (6): 63-64.  
Luo Y, Tu XQ, Zhao W, *et al.* Determination of polysaccharides in health food of spirulina [J]. Strait Pharm J, 2018, (6): 63-64.  
[7] 涂建国, 王鑫, 张玲, 等. 微波消解-电感耦合等离子体发射光谱法测试螺旋藻中矿物元素[J]. 生物化工, 2016, (6): 1-3.  
Tu JG, Wang X, Zhang L, *et al.* Microwave digestion-ICP-AES

- determination of mineral elements in spirulina [J]. *Biol Chem Eng*, 2016, (6): 1-3.
- [8] 王佳妮, 张晗, 洪子肖, 等. X射线荧光光谱法测定螺旋藻中 23 种微量元素[J]. *分析实验室*, 2016, (2): 130-134.  
Wang JN, Zhang H, Hong ZX, *et al.* Determination of 23 trace elements in spirulina using X-Ray fluorescence spectrometry [J]. *Chin J Anal Lab*, 2016, (2): 130-134.
- [9] 方倩, 马军国, 李效宇. 食用蓝藻螺旋藻和葛仙米中金属元素的分析[J]. *河南师范大学学报*, 2015, 43(6): 102-106.  
Fang Q, Ma JG, Li XY. Content determination of the metal elements in the edible algae spirulina and nostoc sphaeroides [J]. *J Henan Nor Uni*, 2015, 43(6): 102-106.
- [10] 李梦怡, 董喆, 费丽娜, 等. 微波消解-电感耦合等离子体质谱法测定保健食品中的 9 种元素[J]. *食品安全质量检测学报*, 2016, 7(3): 944-950.  
Li MY, Dong Z, Fei LN, *et al.* Determination of 9 kinds of elements in health food by microwave digestion-inductively coupled plasma mass spectrometry [J]. *J Food Saf Qual*, 2016, 7(3): 944-950.
- [11] GB/T 27415-2013 分析方法检出限和定量限的评估[S].  
GB/T 27405-2013 Detection limit and quantitative limit of analysis method [S].
- [12] 董国力. 微量元素铁、锌、碘、硒、氟与人体健康的相关性探究[J]. *中国当代医药*, 2013, (6): 183-184.  
Dong GL. Correlation analysis of trace elements iron, zinc, iodine, selenium and fluoride with human health [J]. *Chin Mod Med*, 2013, (6): 183-184.
- [13] 李青仁, 王月梅. 微量元素铜与人体健康[J]. *微量元素与健康研究*, 2007, (3): 61-63.  
Li QR, Wang YM. Trace element copper and human health [J]. *Stud Trace Elem Health*, 2007, (3): 61-63.
- [14] 吴茂江. 锰与人体健康[J]. *微量元素与健康研究*, 2007, (6): 69-70.  
Wu MJ. Manganese and human health [J]. *Stud Trace Elem Health*, 2007, (6): 69-70.
- [15] GB/T 16919-1997 食用螺旋藻粉[S].  
GB/T 16919-1997 Food grade spirulina powder [S].
- [16] 赵小学, 张霖琳, 张建平, 等. ICP-MS 在环境分析中的质谱干扰及其消除[J]. *中国环境监测*, 2014, (3): 101-106.  
Zhao XX, Zhang LL, Zhang JP, *et al.* Spectral interference and elimination of environmental analysis with ICP-MS [J]. *Environ Monit Chin*, 2014, (3): 101-106.
- [17] 董喆, 李梦怡, 潘炜娟, 等. 电感耦合等离子体质谱法测定化妆品中的 37 种元素[J]. *日用化学品科学*, 2015, (6): 20-25.  
Dong Z, Li MY, Pan WJ, *et al.* Determination of 37 elements in cosmetics by inductively coupled plasma-mass spectrometry [J]. *Deter Cosm*, 2015, 38(6): 20-25.

(责任编辑: 武英华)

## 作者简介



胡 越, 硕士, 主要研究方向为食品安全检测。

E-mail: zzmegg@126.com



董 喆, 硕士, 副研究员, 主要研究方向为食品安全检测。

E-mail: dongzh2009@126.com