

# 电感耦合等离子体质谱法测定黑小麦中多种元素

聂西度<sup>1</sup>, 符 靛<sup>2\*</sup>, 唐莉娟<sup>3</sup>, 黄建华<sup>4</sup>

(1.湖南工学院材料与化学工程学院, 湖南 衡阳 421002; 2.长江师范学院化学化工学院, 重庆 涪陵 408100;

3.桂林市公安局刑侦支队, 广西 桂林 541213; 4.湖南中医药大学药学院, 湖南 长沙 410208)

**摘 要:** 建立黑小麦中B、Na、Mg、Al、K、Ca、Ti、V、Cr、Mn、Fe、Co、Ni、Cu、Zn、Se、Cd、Pb元素的分析方法。以硝酸和双氧水为混合试剂采用密闭微波消解法对黑小麦样品进行消解后用电感耦合等离子体质谱法进行分析。利用动态反应池技术有效地消除了分析过程中的质谱干扰, 选用Sc、Ge、Rh、Bi为内标元素校正基体效应和信号漂移。元素Mg、Al、K、Ca在0~10.00 mg/L线性范围内线性关系良好, 其余元素在0~50.00 µg/L内线性关系良好, 该方法测定黑小麦中18种元素的检出限在3.04~17.38 ng/L之间, 相对标准偏差为0.95%~12.50%, 采用国家一级标准物质小麦(GBW 10011)验证方法的准确度和精密度。黑小麦中B、Mg、K、Ca、Fe、Mn、Se含量远高于普通小麦, 而Na元素明显低于普通小麦。方法可用于黑小麦的质量控制和营养评价。

**关键词:** 黑小麦; 电感耦合等离子体质谱法; 多种元素; 动态反应池; 基体效应

## Determination of Multi-Elements in Triticale by Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry

NIE Xidu<sup>1</sup>, FU Liang<sup>2\*</sup>, TANG Lijuan<sup>3</sup>, HUANG Jianhua<sup>4</sup>

(1. College of Materials and Chemistry Engineering, Hunan Institute of Technology, Hengyang 421002, China;

2. School of Chemistry and Chemical Engineering, Yangtze Normal University, Fuling 408100, China;

3. Criminal Investigation Department, Guilin Public Security Bureau, Guilin 541213, China;

4. College of Pharmacy, Hunan University of Chinese Medicine, Changsha 410208, China)

**Abstract:** A method for simultaneous and quantitative determination of 18 elements including B, Na, Mg, Al, K, Ca, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Se, Cd and Pb in triticale was established. Samples were digested by using a mixture of HNO<sub>3</sub> and H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> in a closed-vessel microwave system, and the 18 elements in the test solution were then detected by inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS). The mass spectral interferences caused by polyatomic ions were corrected by dynamic reaction cell (DRC). Sc, Ge, Rh and Bi were used as internal standard elements to correct the matrix effect and signal drift. The linear ranges of Mg, Al, K and Ca were 0–10.00 mg/L, whereas those of the other elements were 0–50.00 µg/L. The limits of detection (LODs) of the 18 elements were in the range of 3.04–17.38 ng/L with relative standard deviations (RSDs) between 0.95% and 12.50%. The accuracy and precision of this method were confirmed by reference standard material (GBW 10011, wheat). The contents of B, Mg, K, Ca, Fe, Mn and Se in triticale were obviously higher than those in normal wheat, while the content of Na in triticale was lower than that in normal wheat. The technique presented in this study is useful for the quality control and nutritional evaluation of triticale.

**Key words:** triticale; inductively coupled plasma mass spectrometry; multi-elements; dynamic reaction cell; matrix effect

中图分类号: O657.63

文献标志码: A

文章编号: 1002-6630(2015)12-0125-04

doi:10.7506/spkx1002-6630-201512023

小麦是世界上最重要的粮食作物之一, 其总产量及总贸易额均居粮食作物之首<sup>[1]</sup>。黑小麦是通过杂交和生物工程技术培育出来的特用型优质小麦黑色作物, 与普通小麦相比较, 黑小麦具高营养、高滋补、高免疫之功

能, 且加工性能优良, 成为当今食品工业领域人们重点关注的热点<sup>[2-4]</sup>。

人体所必需的微量元素主要来源于食物, 是构成细胞或体液、维持机体特殊生理功能酶系的特定生理成分或

收稿日期: 2014-10-24

基金项目: 重庆市教委重点科研项目(KJ1401209); 湖南省教育厅重点科研项目(14A035);

湖南省重点学科建设项目(湘教发[2011]76号)

作者简介: 聂西度(1964—), 男, 教授, 博士, 主要从事无机质谱分析方法研究与应用。E-mail: nxd1922@vip.sina.com

\*通信作者: 符靛(1987—), 女, 讲师, 博士, 主要从事食品分析方法研究与应用。E-mail: fuliang@vip.163.com

激活剂,对于维持人体的生长发育、新陈代谢、生理生化反应、遗传以及能量转换等方面有着极其重要的作用<sup>[5]</sup>。作为一种主要粮食作物,黑小麦中微量元素含量的高低,直接关系着产品的品质,影响人们的身体健康。因此,迫切需要建立快速准确的高灵敏度检测手段对其进行分析。

近年来,电感耦合等离子体质谱(inductively coupled plasma mass spectrometry, ICP-MS)法在无机元素的痕量分析上得到迅速发展,其可测定的元素涵盖了元素周期表中的绝大部分,具有灵敏度高、样品制备和进样技术简单、质量扫描速度快、运行周期短、所提供的离子信息受干扰程度小等优点,应用十分广泛<sup>[6-10]</sup>。刘虎生<sup>[11-13]</sup>、刘明<sup>[14]</sup>等采用ICP-MS法对小麦粉中超痕量稀土元素展开了系统研究,填补了我国国家标准样品中无稀土元素分量值的空白;Cakmak等<sup>[15]</sup>应用激光剥蚀(laser ablation, LA)-ICP-MS法对强化加锌小麦中的锌以及土壤中的锌进行了测定;王云霞等<sup>[16]</sup>采用LA-ICP-MS技术对小麦成熟籽粒中锌的空间分布进行了定量分析,并与酸消解溶液雾化进样ICP-MS法进行了对照实验,证实了分析方法的可靠性;张黛静等<sup>[17]</sup>采用ICP-MS-ICP-原子发射光谱系统和离体穗培养方法,准确测定了灌浆期不同浓度Cu、Cd处理对小麦籽粒营养元素及重金属元素含量的影响,有关黑小麦中无机元素的分析目前尚未见报道。本实验采用ICP-MS法测定黑小麦中B、Na、Mg、Al、K、Ca、Ti、V、Cr、Mn、Fe、Co、Ni、Cu、Zn、Se、Cd、Pb元素,应用动态反应池(dynamic reaction cell, DRC)技术有效地消除了复杂多原子离子质谱干扰,选用Rh为内标元素校正了基体效应和信号漂移,实现了黑小麦中多种元素的快速准确分析。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与试剂

B、Na、Mg、Al、K、Ca、Ti、V、Cr、Mn、Fe、Co、Ni、Cu、Zn、Se、Cd、Pb单元素标准溶液(10 μg/mL,使用时根据实验要求用2%硝酸-高纯水(V/V)(以浓硝酸为基准)为介质稀释),Mg、In、Ba、Ce、U调谐溶液 美国Perkin Elmer公司;Sc、Ge、Rh、Bi单元素标准溶液(10 μg/mL,使用时用2%硝酸-高纯水(V/V)为介质稀释成1.0 μg/mL混合内标溶液)、国家一级标准物质小麦(GBW 10011) 国家标准物质研究中心;硝酸、双氧水(均为优级纯);实验用水为超纯水,电阻率为18.25 MΩ·cm;所有器皿采用体积分数20%硝酸浸泡过夜后用超纯水冲洗干净。

### 1.2 仪器与设备

ELAN DRCe ICP-MS仪 美国Perkin Elmer公司;

MARS-X微波消解系统 美国CEM公司;Milli-Q超纯水机 美国Millipore公司。

### 1.3 方法

#### 1.3.1 ICP-MS条件

通过ICP-MS仪的Tuning和Optimize功能,采用Mg、In、Ba、Ce、U调谐溶液对仪器进行最佳化调谐,得到氧化物和双电荷产率最低( $^{24}\text{Mg} > 50\,000$ 、 $^{115}\text{In} > 250\,000$ 、 $^{238}\text{U} > 20\,000$ )、灵敏度最高( $\text{CeO}^+/\text{Ce}^+ < 3\%$ 、 $\text{Ba}^{++}/\text{Ba}^+ < 3\%$ )的最优化ICP-MS工作参数,见表1。

表1 ICP-MS仪器的操作条件及参数  
Table 1 Operation parameters of ICP-MS

| 操作条件           | 参数   |
|----------------|--|
| 射频功率/W         | 1 100  |
| 冷却气流速/(L/min)  | 15.0   |
| 载气流速/(L/min)   | 0.90   |
| 辅助气流速/(L/min)  | 1.20   |
| 溶液提升量/(mL/min) | 1.0  |
| 透镜电压/V         | 8.5  |
| 进样锥            | Pt (1.1 mm)  |
| 截取锥            | Pt (0.9 mm)  |
| 重复次数           | 3  |
| 同位素选择          | $^{11}\text{B}$ 、 $^{23}\text{Na}$ 、 $^{24}\text{Mg}$ 、 $^{27}\text{Al}$ 、 $^{39}\text{K}$ 、 $^{40}\text{Ca}$ 、 $^{47}\text{Ti}$ 、 $^{51}\text{V}$ 、 $^{52}\text{Cr}$ 、 $^{55}\text{Mn}$ 、 $^{56}\text{Fe}$ 、 $^{59}\text{Co}$ 、 $^{60}\text{Ni}$ 、 $^{63}\text{Cu}$ 、 $^{66}\text{Zn}$ 、 $^{78}\text{Se}$ 、 $^{111}\text{Cd}$ 、 $^{208}\text{Pb}$ |

#### 1.3.2 微波消解条件

准确称取0.100 0 g粉状黑小麦样品于消解罐内,用少量水润湿后依次加入2 mL硝酸、1 mL双氧水,静置30 min后放入微波消解系统内进行消解,微波消解采用升温控制模式,工作参数见表2。消解完毕后,低温赶酸处理,冷却至室温后转入100 mL容量瓶中,用超纯水定容待测,同时制备空白样品。

表2 微波消解程序  
Table 2 Microwave digestion program

| 步骤 | 功率/W | 斜坡升温时间/min | 压力/kPa  | 温度/℃ | 保持时间/min |
|----|------|------------|---------|------|----------|
| 1  | 600  | 10         | 1 137.6 | 150  | 2        |
| 2  | 600  | 10         | 1 344.5 | 190  | 5        |

## 2 结果与分析

### 2.1 背景分析

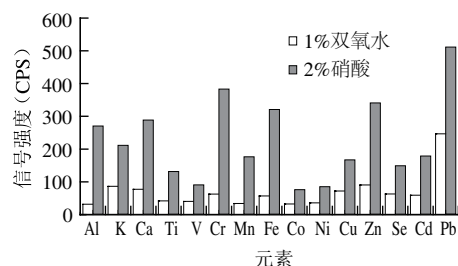


图1 待测元素在1%双氧水和2%硝酸溶液的背景分析

Fig.1 The contents of the background in 1% H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> and 2% HNO<sub>3</sub>

黑小麦中有机基质含量高,而硝酸和双氧水均能较好地消解有机基质,并且硝酸还是良好的微波吸收体,但单独采用硝酸消解时发现样品消解不彻底,在消解液中残存有少量残渣,而通过加入双氧水则可有效促进其残渣彻底消解。实验选择硝酸和双氧水为混合试剂消解样品。

分别对体积分数1%双氧水和体积分数2%硝酸溶液进行分析,通过测定各待测元素的质谱信号强度(counts per second, CPS)来考察本实验过程中仪器背景和试剂空白所存在的本底污染,结果见图1。各元素在体积分数1%双氧水中的CPS值远小于在体积分数2%硝酸溶液中CPS值,表明在体积分数1%双氧水中所含各待测元素的本底值远低于体积分数2%硝酸溶液,而本实验样品中各待测元素的质量浓度远大于由体积分数2%硝酸溶液所带入的本底质量浓度,因此,由体积分数1%双氧水和体积分数2%硝酸溶液所带入的本底污染与样品中各待测元素的质量浓度相比较均可忽略不计。

## 2.2 干扰及校正

实验所测元素大多数处于轻质量元素和中质量元素,在质谱分析过程中易形成复杂的多原子离子质谱干扰,其中K、Ca、Cr、Fe、Se元素存在严重的质谱干扰,校正质谱干扰的方法主要有数学公式校正法、高分辨质谱分析法和碰撞反应池技术<sup>[18-21]</sup>。本实验采用DRC技术,通过向池内引入CH<sub>4</sub>来校正质谱干扰,考察1 μg/L混合标准溶液在采用DRC技术前后背景等效浓度(background equivalent concentration, BEC)、检出限以及相对标准偏差(relative standard deviation, RSD)的变化情况,结果见表3。DRC技术的使用,降低了待测元素BEC和检出限,提高了测量精密度,较好地校正了质谱干扰。其余待测元素B、Na、Mg、Al、Ti、V、Mn、Co、Ni、Cu、Zn、Cd、Pb质谱干扰轻微,可忽略不计,均选择标准模式进行测定。

表3 主要质谱干扰及DRC参数

Table 3 Main mass spectral interferences and optimum parameters of DRC

| 同位素              | 主要质谱干扰   | RPq  | CH <sub>4</sub> 流量/<br>(mL/min) | BEC/<br>(ng/L) | 检出限/<br>(ng/L) | RSD (n=6) /% |
|------------------|--|------|---------------------------------|----------------|----------------|--------------|
| <sup>39</sup> K  | <sup>38</sup> Ar <sup>1</sup> H、 <sup>23</sup> Na <sup>16</sup> O                                    | 0.25 | 0                               | 1 621.75       | 190.87         | 16.20        |
|                  |  | 0.45 | 0.3                             | 60.01          | 9.46           | 2.38         |
| <sup>40</sup> Ca | <sup>40</sup> Ar、 <sup>23</sup> Na <sup>17</sup> O、 <sup>23</sup> Na <sup>16</sup> OH                | 0.25 | 0                               | —              | —              | —            |
|                  |  | 0.75 | 1.3                             | 39.22          | 17.38          | 2.13         |
| <sup>52</sup> Cr | <sup>40</sup> Ar <sup>12</sup> C、 <sup>40</sup> Ca <sup>12</sup> C、 <sup>36</sup> Ar <sup>16</sup> O | 0.25 | 0                               | 967.05         | 316.64         | 28.39        |
|                  |  | 0.75 | 0.6                             | 28.33          | 11.29          | 1.71         |
| <sup>56</sup> Fe | <sup>40</sup> Ar <sup>16</sup> O、 <sup>40</sup> Ca <sup>16</sup> O、 <sup>38</sup> Ar <sup>18</sup> O | 0.25 | 0                               | 3 052.80       | 767.16         | 15.61        |
|                  |  | 0.55 | 0.6                             | 21.57          | 8.23           | 1.97         |
| <sup>78</sup> Se | <sup>40</sup> Ar <sup>38</sup> Ar、 <sup>38</sup> Ar <sup>40</sup> Ca                                 | 0.25 | 0                               | 1 072.76       | 359.82         | 35.14        |
|                  |  | 0.45 | 0.6                             | 85.02          | 21.34          | 2.21         |

注:—,无法测定。

黑小麦的主组成为有机介质,经硝酸和双氧水为混

合试剂采用密闭微波消解后,样品中的有机介质已破坏完全,基体组成复杂。考察基体对待测元素分析信号的影响,结果表明,本实验过程中的基体效应不明显,但考虑到内标元素能有效地校正分析信号的漂移,对分析信号具有显著的补偿作用<sup>[22-24]</sup>,本实验采用内标元素Sc、Ge、Rh、Bi有效地维持待测元素分析信号的稳定性。

## 2.3 标准曲线及检出限

将待测元素标准溶液配制成0.00、1.00、2.00、5.00、10.00 mg/L Mg、Al、K、Ca系列标准工作溶液和0.00、5.00、10.00、20.00、50.00 μg/L系列标准工作溶液,采用本法测定,并以各待测元素信号强度及标准溶液质量浓度的关系做标准曲线并进行线性回归分析,所得各标准曲线方程的线性相关系数不小于0.999 5。取空白溶液进行11次测定,以3倍标准偏差进行计算,得到各待测元素的仪器检出限,18个元素的仪器检出限在3.04~17.38 ng/L之间,结果见表4。

表4 元素的线性相关系数和检出限

Table 4 Linear correlation coefficients and limits of detection of 18 elements

| 元素 | 线性相关系数<br>(R <sup>2</sup> ) | 检出限/<br>(ng/L) | 元素 | 线性相关系数<br>(R <sup>2</sup> ) | 检出限/<br>(ng/L) |
|----|-----------------------------|----------------|----|-----------------------------|----------------|
| B  | 0.999 8                     | 16.21          | Mn | 1.000 0                     | 5.22           |
| Na | 0.999 9                     | 11.58          | Fe | 0.999 9                     | 8.23           |
| Mg | 0.999 9                     | 13.69          | Co | 1.000 0                     | 3.04           |
| Al | 1.000 0                     | 8.37           | Ni | 0.999 6                     | 10.51          |
| K  | 0.999 7                     | 9.46           | Cu | 0.999 9                     | 12.06          |
| Ca | 0.999 8                     | 17.38          | Zn | 1.000 0                     | 17.03          |
| Ti | 1.000 0                     | 8.25           | Se | 0.999 5                     | 21.34          |
| V  | 0.999 9                     | 7.21           | Cd | 0.999 8                     | 4.57           |
| Cr | 0.999 7                     | 11.29          | Pb | 1.000 0                     | 6.05           |

## 2.4 样品分析

表5 样品的分析结果(n=6)

Table 5 Analytical results of samples (n=6)

| 元素 | 标准物质参考值/<br>(μg/g) | 标准物质测定值/<br>(μg/g) | RSD/% | 样品1/<br>(μg/g) | 样品2/<br>(μg/g)  |
|----|--------------------|--------------------|-------|----------------|-----------------|
| B  | 0.55               | 0.58±0.02          | 3.45  | 2.16±0.075     | 5.01±0.082      |
| Na | 17±5               | 15.18±0.46         | 3.03  | 0.19±0.001     | 0.35±0.003      |
| Mg | 450±70             | 449.36±18.05       | 4.02  | 1 765.22±39.86 | 1 329.38±31.05  |
| Al | 104±10             | 106.32±3.68        | 3.46  | 156.15±3.23    | 207.63±5.87     |
| K  | 1 400±60           | 1 438.56±30.91     | 2.15  | 5 781.82±93.64 | 4 978.05±138.35 |
| Ca | 3 400±20           | 3 995.21±38.07     | 0.95  | 603.57±15.80   | 714.30±22.92    |
| Ti | 2                  | 2.11±0.052         | 2.46  | 0.28±0.14      | 5.32±0.12       |
| V  | 0.034±0.012        | 0.037±0.001        | 2.70  | 0.66±0.017     | 0.38±0.011      |
| Cr | 0.096±0.014        | 0.101±0.003        | 2.97  | 34.91±0.83     | 72.55±2.09      |
| Mn | 5.4±0.3            | 5.21±0.13          | 2.50  | 106.27±4.84    | 85.51±2.39      |
| Fe | 18.5±3.1           | 18.62±0.57         | 3.06  | 918.35±12.76   | 772.16±20.52    |
| Co | 0.008              | 0.008±0.001        | 12.50 | 0.78±0.019     | 1.46±0.013      |
| Ni | 0.06±0.02          | 0.072±0.003        | 2.78  | 13.34±0.87     | 9.61±0.45       |
| Cu | 2.7±0.2            | 2.85±0.11          | 3.84  | 16.08±0.92     | 22.57±0.80      |
| Zn | 11.6±0.7           | 12.08±0.55         | 4.55  | 37.15±1.04     | 23.76±0.68      |
| Se | 0.053±0.007        | 0.056±0.002        | 3.57  | 0.26±0.006     | 0.31±0.009      |
| Cd | 0.018±0.004        | 0.016±0.001        | 6.25  | 0.021±0.002    | 0.019±0.001     |
| Pb | 0.065±0.024        | 0.071±0.004        | 5.63  | 0.085±0.003    | 0.061±0.002     |



采用国家标准物质小麦(GBW 10011)验证方法的准确度和精密度,平行测定小麦标准物质6次,结果见表5。各元素的测定值与元素所提供的参考值基本一致,表明方法的准确度良好,除元素Co以外,其余所有元素的RSD均低于6.26%,表明方法具有较高的精密度。

采用本法分别对2个黑小麦中的18种元素平行测定6次。黑小麦中与人体健康和生命有关的必需元素Ca、Mg、K、B、V、Cr、Mn、Fe、Co、Ni、Cu、Zn、Se的含量均显著高于普通小麦(GBW 10011),而人体必需的常量元素Na则明显低于普通小麦,黑小麦属于典型的高K低Na粮食作物;黑小麦中元素Al的含量与普通小麦相差不大,Al不是人体必需的微量元素,也无直接的毒性效应,但有研究表明,Al在人体中含量较多时,就会对人体产生危害<sup>[25]</sup>;黑小麦中的重金属元素Cd和Pb含量极低。分析结果表明,黑小麦是一种营养价值高、食用安全可靠的极佳粮食作物。

### 3 结 论

本实验应用微波消解-ICP-MS法测定黑小麦中B、Na、Mg、Al、K、Ca、Ti、V、Cr、Mn、Fe、Co、Ni、Cu、Zn、Se、Cd、Pb 18种无机元素。由于仪器背景和试剂空白所存在的本底污染可以忽略不计,采用DRC技术消除测定过程中的质谱干扰,提高分析结果的准确性。该方法能同时测定黑小麦中人体必需元素、有益元素及重金属元素,是一种简单、快速、有效的分析方法。通过对黑小麦中多种元素的分析,一方面可准确了解黑小麦中元素的组成及含量分布,另一方面可以掌握黑小麦中重金属元素的潜在危害水平。本研究结果对于正确了解黑小麦的营养价值及其实用安全性具有十分重要的参考意义。

### 参考文献:

[1] 马丽,康洁. 2个小麦新品种生理生化特性的研究[J]. 中国农学通报, 2012, 28(12): 39-43.  
[2] AGIL R, HOSSEINIAN F. Determination of water-extractable polysaccharides in triticale bran[J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2014, 34(1): 12-17.  
[3] RAKHA A, AMAN P, ANDERSSON R. Dietary fiber in triticale grain: variation in content, composition, and molecular weight distribution of extractable components[J]. Journal of Cereal Science, 2011, 54(3): 324-331.  
[4] ESTRADA-CAMPUZANO G, SLAFER G A, MIRALLES D J. Differences in yield, biomass and their components between triticale and wheat grown under contrasting water and nitrogen environments[J]. Field Crops Research, 2012, 128: 167-179.

[5] 聂西度. 碰撞/反应池-电感耦合等离子体质谱在食品分析中的研究[D]. 长沙: 中南大学, 2013: 28.  
[6] SANZ-MEDEL A, MONTES-BAYON M, BETTMER J, et al. ICP-MS for absolute quantification of proteins for heteroatom-tagged, targeted proteomics[J]. Trends in Analytical Chemistry, 2012, 40: 52-63.  
[7] VERBOKET P E, BOROVINSKAYA O, MEYER N, et al. A new microfluidics-based droplet dispenser for ICP-MS[J]. Analytical Chemistry, 2014, 86(12): 6012-6018.  
[8] 刘虎生, 邵宏翔. 电感耦合等离子体质谱技术与应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005: 176-280.  
[9] 张萍, 谢华林, 刘宏伟, 等. ORS-ICP-MS测定食用植物油中的多种微量元素[J]. 中国粮油学报, 2014, 29(7): 108-111.  
[10] NOOKABKAEW S, RANGKADILOK N, MAHIDOL C, et al. Determination of arsenic species in rice from thailand and other asian countries using simple extraction and HPLC-ICP-MS analysis[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2013, 61(28): 6991-6998.  
[11] 刘虎生, 王耐芬, 刘明, 等. ICP-MS法对国标小麦粉中15种稀土元素的定值研究[J]. 环境化学, 1997, 16(2): 98-102.  
[12] 刘虎生, 王耐芬, 王小燕, 等. ICP-MS法检验小麦粉物料中超痕量级钼、钐和钇的均匀性[J]. 分析试验室, 2000, 19(2): 71-73.  
[13] 刘虎生, 王小燕, 王耐芬. ICP-MS法对人发和小麦粉中ng/g量级稀土元素的稳定性检验[J]. 理化检验: 化学分册, 2001, 37(8): 376.  
[14] 刘明, 刘虎生. 微波溶样ICP-MS法测定小麦的粒、茎、穗和叶中15种痕量稀土元素[J]. 质谱学报, 1998, 19(3): 1-5.  
[15] CAKMAK I, KALAYCI M, KAYA Y, et al. Biofortification and localization of zinc in wheat grain[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2010, 58(16): 9092-9102.  
[16] 王云霞, 杨连新. 激光剥蚀电感耦合等离子体质谱(LA-ICP-MS)定量分析小麦籽粒锌元素的空间分布[J]. 南京农业大学学报, 2011, 34(2): 18-22.  
[17] 张黛静, 姜丽娜, 张志娟, 等. ICP-MS/ICP-AES测定小麦穗离体培养籽粒营养元素及重金属含量[J]. 光谱学与光谱分析, 2011, 31(7): 1935-1938.  
[18] DOUGLAS D J. Some current perspectives on ICP-MS[J]. Canadian Journal of Spectroscopy, 1989, 34(2): 38-49.  
[19] BRADSHAW N, HALL E F H, SANDERSON N E. Communication. Inductively coupled plasma as an ion source for high resolution mass spectrometry[J]. Journal of Analytical Atomic Spectrometry, 1989, 4(8): 801-803.  
[20] 聂西度, 谢华林. 高分辨电感耦合等离子体质谱法测定食品膨松剂中的杂质元素[J]. 食品科学, 2013, 34(2): 155-158.  
[21] 王小如. 电感耦合等离子体质谱应用实例[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005: 258-266.  
[22] SUCHAROVÁ J. Optimisation of DRC ICP-MS for determining selenium in plants[J]. Journal of Analytical Atomic Spectrometry, 2011, 26(9): 1756-1762.  
[23] VASSILEVA E, HOENIG M. Determination of the total and extractable mass fractions of cadmium and lead in mineral feed by using isotope dilution inductively coupled plasma mass spectrometry[J]. Analytica Chimica Acta, 2011, 701(1): 37-44.  
[24] NARDI E P, EVANGELISTA F S, TOMEN L, et al. The use of inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS) for the determination of toxic and essential elements in different types of food samples[J]. Food Chemistry, 2009, 112(3): 727-732.  
[25] 关跃琳, 娜仁高娃, 张海燕. 食品中铝的测定方法及铝对人体健康影响的探讨[J]. 中国卫生检验杂志, 2012, 22(2): 221-222.