

电感耦合等离子体发射光谱法测定网络销售 豆制品零食中的硼酸

巩佳第, 邢丽丽, 杜 洁, 潘 璐, 孙玉梅, 李 雅, 王荣慧, 余程凤*

(绿城农科检测技术有限公司, 杭州 310000)

摘 要: **目的** 建立电感耦合等离子体发射光谱法(inductively coupled plasma-optical emission spectrometry, ICP-OES)测定网络销售豆制品零食中硼酸含量的方法。**方法** 以 2.00%硫酸水溶液为提取剂, 10%三氯乙酸为沉淀剂, 超声提取样品中硼酸, 外标法定量。**结果** 硼在 249.678 nm 波长下, 0.01~1.00 mg/L 范围内与信号强度呈良好线性关系, 相关系数为 0.99967, 检出限(以硼酸计)为 0.006 mg/kg, 定量限为 0.018 mg/kg。豆制品零食样品中 3 水平的加标回收率为 95.74%~106.23%, 相对标准偏差(relative standard deviations, RSDs)为 0.16%~1.81%。采用本研究建立的方法对 140 批次的网络销售豆制品零食中硼酸的含量进行检测, 含量范围为 2.22~167.79 mg/kg, 且 82.14%的网络销售豆制品零食中的硼酸含量小于 50 mg/kg。**结论** 该方法前处理简单、检测速度快, 可用于豆制品零食类样品中硼酸的检测。

关键词: 硼酸; 电感耦合等离子体发射光谱法; 豆制品零食

Determination of boric acid in online selling bean products snacks by inductively coupled plasma-optical emission spectrometry

GONG Jia-Di, XING Li-Li, DU Jie, PAN Lu, SUN Yu-Mei, LI Ya,
WANG Rong-Hui, YU Cheng-Feng*

(Greentown Agrotech Testing Technology Co., Ltd., Hangzhou 310000, China)

ABSTRACT: Objective To establish a method for determining boric acid content in online selling bean products snacks by inductively coupled plasma-optical emission spectrometry (ICP-OES). **Methods** Boric acid in the sample was extracted by ultrasound with 2.00% sulfuric acid aqueous solution as the extracting agent and 10% trichloroacetic acid as the precipitating agent, and quantified by external standard method. **Results** A good linear relationship was established between 0.01–1.00 mg/L and signal strength at 249.678 nm, with the correlation coefficient of 0.99967, the limit of detection (calculated based on boric acid) was 0.006 mg/kg, limit of quantitation was 0.018 mg/kg. The recoveries at 3 spiked levels were 95.74%–106.23% and the relative standard deviations (RSDs) were 0.16%–1.81%. The method established in this study was used to detect the content of boric acid in 140 batches of online selling bean products snacks, the content range were 2.22–167.79 mg/kg, and 82.14% of the online selling bean products snacks had boric acid content less than 50 mg/kg. **Conclusion** This method is simple in pretreatment and rapid in

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFC1602800)

Fund: Supported by the National Key Research and Development Program of China (2018YFC1602800)

*通信作者: 余程凤, 工程师, 主要研究方向为食品、农产品质量安全分析检测。E-mail: 981885129@qq.com

*Corresponding author: YU Cheng-Feng, Engineer, Greentown Agrotech Testing Technology Co., Ltd., No.688 Binan Road, Binjiang District, Hangzhou 310000, China. E-mail: 981885129@qq.com

detection, and can be used for the detection of boric acid in bean products and snacks.

KEY WORDS: boric acid; inductively coupled plasma-optical emission spectrometry; bean products snacks

0 引言

硼是高等植物所必需的微量元素之一, 参与植物细胞的理化代谢活动, 在植物细胞结构、功能和酶的活性中有不可替代的作用^[1-4]。与其他作物相比, 豆类更易富集硼, 近几年的研究表明, 大豆、黑豆、红豆等豆类中的硼酸本底值检出率 100%, 最高可达到 406 mg/kg(以硼酸计)^[5-7]。豆制品中加入硼砂可增加韧性、改善口感, 能够起到一定的防腐效果。而摄入过量的硼会引发肝、肾等多脏器的蓄积性中毒^[8-10], 甚至造成生殖和发育毒性^[11-12]。近年来的研究显示, 硼在豆制品中形态多样, 甚至有些硼的形态如糖硼酸钙^[13]、脱羧硼酸糖酯^[14]等可能具有一定的营养保健作用, 但大豆及其制品中硼的形态仍以硼酸为主, 高达 84.7%~93.5%^[15-16]。1961 年食品添加剂联合专家委员会曾提出硼酸、硼砂不宜作为食品添加剂^[17]。1990 年欧洲经济共同体食品科学委员会经毒理学评价规定只可作为防腐剂用于鱼子酱, 限量为 4 g/kg^[18]。世界各国多禁止硼砂作为食品添加剂用于食品行业, 我国于 2008 年印发食品整治办〔2008〕3 号^[19], 将硼砂列入食品中可能违法添加的非食用物质名单。

目前硼酸的检测方法以分光光度法为主, 主要有姜黄素分光光度法、甲亚胺-H 分光光度法等^[20-21]。现行有效的 GB 5009.275—2016《食品安全国家标准 食品中硼酸的测定》中采用乙基己二醇-三氯甲烷溶液对样品中的硼酸进行富集、萃取, 利用质子化姜黄可与硼酸反应生成红色产物而通过分光光度法测定, 是目前国内应用最为广泛的检测方法。但该检测方法前处理操作烦琐、耗时长, 提取试剂三氯甲烷易挥发、毒性大, 不利于批量检测。近年来也有学者采用大型仪器进行检测研究, 如电感耦合等离子体原子发射光谱法、电感耦合等离子体质谱法等^[22-23], 其前处理方式往往以强酸体系高温消解为主, 但强酸体系高温条件下消解的样品一般取样量较少, 样品中脂肪含量较高时容易造成消解不完全, 导致检测结果差异较大。此外, 还有一些快速检测方法, 如姜黄试纸法、光纤传感器技术等^[24-25], 与大型仪器相比尽管能够节约检测成本, 但检出限相对较高, 其中姜黄试纸法样品需经烘干、炭化以及高温灰化等处理过程, 操作较为烦琐, 往往达不到快速检测的效果。由于硼在生物体中主要代谢形态为无机态的硼酸^[26], 采用常温浸提的前处理方式可提取大部分的硼酸^[27]。以豆类为主要原料的豆制品含有丰富的蛋白质、糖类、脂肪、维生素及矿物质, 而豆制品零食由于携带方便、食用便捷、口感有韧性和嚼劲, 深受现代人喜爱。近几年的调查研究多以豆

腐、腐竹等为基质, 对豆制品零食中硼的含量调查报道较少。本研究以网络销售豆制品零食为基质, 采用提取步骤简单的 2.00% 硫酸水溶液超声浸提, 利用毒性相对较小、干扰少的三氯乙酸作为蛋白沉淀剂, 电感耦合等离子体发射光谱法测定硼酸的含量, 为日常监管提供一定的理论依据。

1 材料与方法

1.1 仪器与试剂

5100 ICP-OES 电感耦合等离子体发射光谱仪(美国安捷伦科技有限公司); XM-500UVF 智能静音超声波清洗机[小美超声仪器(昆山)有限公司]; BSA224S 天平(精度为 0.1 mg, 德国赛多利斯公司); Milli-Q 去离子水发生器(美国 Millipore 公司); DFT-200A 高速粉碎机(温岭市林大机械有限公司)。

浓硫酸(优级纯, 永华化学股份有限公司); 亚铁氰化钾、硼酸、冰乙酸、三氯乙酸(分析纯, 上海凌峰化学试剂有限公司); 乙酸锌(分析纯, 西陇科学股份有限公司); 钪标准溶液(1000 mg/L, 有证标准物质单元素溶液, 国家有色金属及电子材料分析测试中心); 氩气(99.999%, 杭州今工特种气体有限公司)。

1.2 标准溶液的配制

乙酸锌溶液: 称取 220.0 g 乙酸锌, 先加 30 mL 冰乙酸溶解, 用一级水稀释至 1000 mL, 摇匀保存于聚丙烯容器中备用; 亚铁氰化钾溶液: 称取 106.0 g 亚铁氰化钾, 用一级水溶解并稀释至 1000 mL, 摇匀保存于聚丙烯容器中备用。

硼酸标准储备液 500.0 μg/mL: 称取在硫酸干燥器中干燥 5 h 后的硼酸 0.5000 g, 溶于水并定容至 1000 mL, 摇匀保存于聚丙烯容器中备用; 硼酸标准工作溶液 10.00 μg/mL: 取硼酸标准储备液 5.00 mL, 用一级水稀释至 250.0 mL, 摇匀保存于聚丙烯容器中备用。

钪标准储备液 100.0 mg/L: 吸取 5.00 mL 钪标准溶液到 50 mL 聚丙烯容量瓶中, 用 2.00% 硫酸水溶液定容至刻度, 摇匀备用。

系列标准溶液: 分别吸取硼酸标准工作液 0.10、0.50、1.00、2.00、4.00、8.00、10.00 mL 于 100.0 mL 聚丙烯容量瓶中, 再加入 1.00 mL 100.0 mg/L 的钪标准储备液, 用 2.00% 硫酸水溶液定容至刻度, 摇匀备用, 配制成的质量浓度分别为 0.01、0.05、0.10、0.20、0.40、0.80、1.00 mg/L。

1.3 实验方法

豆制品零食于网络随机购买, 选取了几种豆制品零

食中常见的产品类别,包括非发酵豆制品、发酵豆制品、大豆蛋白类制品、膨化豆制品等作为检测对象,随机购买数种样品。

称取经高速捣碎机捣碎的样品 2 g 左右(精确至 0.0001 g)于 50.00 mL 聚丙烯离心管中,加 20.00 mL 2.00%硫酸水溶液,再加入 0.50 mL 钼标准储备液,室温(20℃±5℃)下超声 10 min,加 2.00 mL 10%三氯乙酸,加水定容至 50.00 mL。摇匀,待上层溶液澄清后过滤,滤液备用。按照优化后仪器条件上机检测,仪器操作条件详见表 1。

表 1 仪器操作条件

Table 1 Operating conditions of instrument

仪器参数	参考值
波长	249.678 nm
射频功率	1.20 kW
辅助气流量	1.00 L/min
等离子体气流量	12.00 L/min
雾化气流量	0.70 L/min
观测高度	8.00 mm
观测方向	垂直

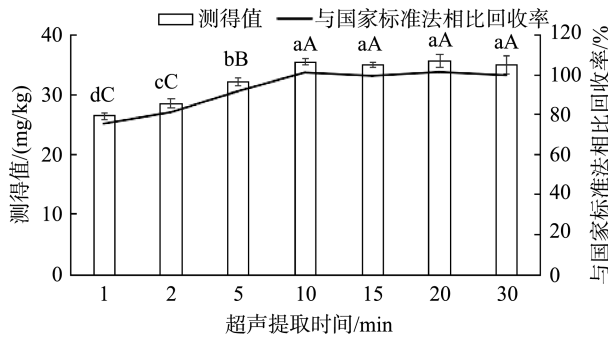
1.4 统计分析

采用 Excel 2016 对研究数据整理汇总, SPSS AU22.0 进行数据处理与统计分析。

2 结果与分析

2.1 超声提取时间的选择

选取豆制品零食经 GB 5009.275—2016 检测硼酸含量为 35.23 mg/kg 的样品作为研究基质。称取 6 组样品,每组样品超声提取时间分别为 1、2、5、10、15、20、30 min,重复测定 3 次,测定结果如图 1 所示。



注:不同小写字母表示不同超声提取时间之间硼酸测得值的差异显著($P<0.05$);不同大写字母表示差异极显著($P<0.01$)。

图 1 超声提取时间优化($n=3$)

Fig.1 Optimization of ultrasonic extraction time ($n=3$)

由图 1 可知,与国家标准检测结果相比,随着超声提取时间的增加,硼酸测得值明显增加。在超声时间 1、2、5 min 时,硼酸测得值分别为 26.47、28.53、32.17 mg/kg,不同超声提取时间之间硼酸测得值的差异显著($P<0.05$);同时,在超声时间为 5 min 时,与国家标准法硼酸测得值(35.23 mg/kg)差异极显著($P<0.01$)。当超声提取时间达到 10 min 时,样品中硼酸提取量逐渐平稳,测得值为 35.50 mg/kg,与国家标准法硼酸测得值的差异不显著($P>0.05$)。因此,为提高检测效率,同时保证硼酸的提取量,最终选择超声提取时间为 10 min。

2.2 提取试剂的选择

选取豆制品零食经 GB 5009.275—2016 检测硼酸含量为 15.00 mg/kg 的样品作为研究基质,比较以超纯水、2.00%硝酸水溶液、2.00%硫酸水溶液、2.00%盐酸水溶液(V:V)为提取试剂,考察不同提取试剂对豆制品零食中硼酸的提取量的影响。结果显示,4 种提取试剂的提取效率(以各提取试剂下硼酸提取量与国家标准方法的硼酸提取量的百分比计)分别为 85.31%、95.33%、97.33%、90.69%,2.00%硫酸水溶液提取效率相对最高,因此,本研究采用 2.00%硫酸水溶液作为提取试剂。

为进一步考察提取溶液酸度对硼酸提取量的影响,对样品中硫酸的加入量进行考察,结果如表 2 所示。

表 2 不同硫酸浓度对豆制品零食中硼酸提取量的影响($n=3$)

Table 2 Effects of different concentration of sulfuric acid on extraction of boric acid from bean products snacks ($n=3$)

硫酸浓度/%	测得值/(mg/kg)	RSDs/%
1.00	15.70±0.80 ^{aA}	5.10
2.00	15.86±0.19 ^{aA}	1.17
3.00	15.35±0.54 ^{aA}	3.49
4.00	14.22±0.41 ^{bA}	2.88
5.00	12.75±0.52 ^{cB}	4.04

注:相对标准偏差(relative standard deviations, RSDs),不同小写字母表示不同硫酸浓度下硼酸提取量与国家标准法的差异显著($P<0.05$);不同大写字母表示差异极显著($P<0.01$)。

结果显示,随着硫酸浓度的增加,豆制品零食中硼酸测得值有降低的趋势。方差分析结果表明,当硫酸浓度在 1.00%~3.00%范围内,豆制品零食中硼酸测得值与国家标准法差异不显著($P<0.05$);硫酸浓度大于 4.00%时,硼酸的测得值有所降低,当硫酸浓度为 4.00%时,豆制品零食中硼酸测得值与国家标准法差异显著($P<0.05$);当硫酸浓度为 5.00%时,豆制品零食中硼酸测得值与国家标准法差异极显著($P<0.01$)。因此,为了节约成本同时保证硼酸的提取量,本研究选择 2.00%的硫酸浓度。

2.3 蛋白质沉淀剂加入量优化

由于豆制品零食中含有较高的蛋白质,经硫酸提取

后试样较为浑浊, 采用电感耦合等离子体发射光谱法(inductively coupled plasma atomic emission spectrometry, ICP-OES)直接检测容易堵塞雾化器, 且含碳有机物过高会导致炬管和冷锥上严重积碳, 损害炬管寿命, 不利于实现批量检测。为此, 本研究探讨了几种常用的蛋白沉淀剂, 同时考察了不同体积的蛋白沉淀剂对样品中硼酸检测的影响。常用蛋白沉淀剂有 95%乙醇、10%三氯乙酸、50%乙腈、亚铁氰化钾-乙酸锌等^[21]。由于加入 95%乙醇和 50%乙腈作为沉淀剂会引入过高的含碳有机物, 不利于 ICP 检测, 同时国家标准方法中采用亚铁氰化钾-乙酸锌作为蛋白沉淀剂, 因此本研究对比考察了 10%三氯乙酸和亚铁氰化钾-乙酸锌作为蛋白沉淀剂对样品中硼酸检测的影响。选取豆制品零食经 GB 5009.275—2016 检测硼酸含量为 19.17 mg/kg 的样品作为研究基质, 分别加入不同体积的蛋白沉淀剂, 结果如表 3 所示。

表 3 蛋白质沉淀剂加入量优化(n=3)
Table 3 Optimization of adding amount of precipitant in protein (n=3)

体积/mL	沉淀剂(平均值±标准偏差)/(mg/kg)	
	10%三氯乙酸	亚铁氰化钾-乙酸锌
1.00	18.88±0.91 ^a	18.35±0.53 ^a
2.00	19.35±0.78 ^a	18.29±1.15 ^a
3.00	19.25±0.71 ^a	18.75±0.86 ^a
4.00	18.83±0.99 ^a	18.17±1.45 ^a
5.00	18.47±1.03 ^a	18.45±1.11 ^a
6.00	19.35±0.92 ^a	18.63±1.13 ^a

注: 相同小写字母表示加入不同体积的蛋白沉淀剂后硼酸测得值与国家标准法无显著差异(P<0.05)。

方差分析结果表明, 加入两种蛋白沉淀剂后硼酸测得值与国家标准法无显著性差异(P<0.05)。随沉淀剂加入量增加, 尽管硼酸测得值无显著性差异, 但离心管中絮状沉淀增加, 蛋白质沉淀更完全。由于亚铁氰化钾-乙酸锌作为蛋白沉淀剂时引入大量的铁元素而干扰硼的分析谱线。为了获得澄清透明的上机待测液同时避免引入过多的含碳有机物, 本研究选择加入 2.00 mL 的 10%三氯乙酸作为蛋白沉淀剂。

2.4 仪器条件的优化

为了保证测试样品时仪器状态最佳, 对波长的选择、射频功率、雾化气流量等因素进行优化。硼的分析谱线主要有 182.577、249.678、249.772 nm, 灵敏度最高的谱线为 249.772 nm, 但在该波长下受 249.771、249.782 nm 两条铁谱线的干扰。249.678 nm 作为硼的次灵敏谱线, 共存元素谱线干扰相对较少, 因此本研究选择 249.678 nm 作为硼的分析谱线。射频功率和雾化气流量设定相对较低时信噪比随射频功率和雾化气流量提高而增加, 当射频功率超过 1.20 kW, 信噪比增加减缓^[23]。考虑到射频功率过大影响炬管寿命,

选择射频功率为 1.20 kW。当雾化气流量大于 0.70 L/min 时, 信噪比增加减缓甚至有下降趋势, 可能是由于雾化气流量过高导致单位时间内雾化器中液体过多, 影响雾化效率, 因此, 选择雾化气流量为 0.70 L/min。此外, 为了降低基体干扰, 本研究引入上机浓度为 1.00 mg/L 的钇元素^[28]。

2.5 标准曲线与检出限

按照 1.3 中的方法处理样品, 在优化的仪器工作条件下进行测定, 连续测量试剂空白溶液 20 次, 以 20 次空白值标准偏差 3 倍计算检出限。经计算仪器检出限为 0.006 mg/kg, 定量限为 0.018 mg/kg。以待测元素的浓度(X, mg/L)为横坐标, 以元素信号值强度(Y)为纵坐标进行线性拟合, 在 0.01~1.00 mg/L 浓度范围, 线性方程为: Y=9175.53X+1000.38, 相关系数 r 为 0.99967, 表明本研究所建立的方法线性相关系数较好, 满足分析检测要求。

2.6 精密度与回收率

为了考察本研究所建立方法的精密度与准确度, 随机选取一种豆制品零食样品, 本底值为 16.20 mg/kg, 进行低、中、高 3 水平加标回收实验, 浓度为 10.00、50.00、100.00 mg/kg, 每个浓度水平平行测定 6 次。测定值分别为 25.54、66.30、117.21 mg/kg, 加标回收率分别为 95.74%、100.62%、106.23%, 测定值的 RSDs 分别为 1.81%、0.16%、0.93%, 满足 GB/T 27404—2008《实验室质量控制规范 食品理化检验》的要求, 表明本研究所建立方法的精密度和准确度满足分析检测要求。

2.7 网络销售豆制品零食中硼酸的含量

采用本研究建立的方法, 对随机购买的 140 批次网络销售豆制品零食中硼酸的含量进行检测, 检测结果见表 4。结果显示, 网络销售豆制品零食中硼酸检出率为 100%, 硼酸含量的范围为 2.22~167.79 mg/kg, 平均值 27.26 mg/kg。其中 82.14%的样品硼酸含量集中在 2.00~50.00 mg/kg 之间。大豆蛋白类制品、发酵豆制品和非发酵豆制品的中位值均低于平均值, 表明这 3 种类别的豆制品零食中硼酸含量相对较低。而膨化豆制品中硼酸含量相对较高, 可能是由于购买的膨化豆制品零售多为豆皮状态, 其制作工艺存在干制过程, 水分含量相对较少, 导致其硼酸含量相对较高。

表 4 网络销售豆制品零食中硼酸的含量(n=3)
Table 4 Content of boric acid in bean products snacks sold online (n=3)

豆制品零食 产品类别	样品数	硼酸均值 /(mg/kg)	硼酸含量 范围 /(mg/kg)	中位值 /(mg/kg)
大豆蛋白类 制品	34	16.51±17.09	2.28~96.29	13.37
发酵豆制品	37	22.22±29.28	2.22~167.79	15.63
非发酵豆制品	37	19.29±17.69	2.48~79.00	15.18
膨化豆制品	32	53.77±35.34	12.10~114.25	62.64

近年来,豆类及其制品中硼本底值调查中发现,不同产地本底值差异较大。其中 13 份调查研究涉及 25 个地区的豆类及其制品中硼含量最高值在 30~40 mg/kg(以硼酸计为 171~229 mg/kg)范围内相对较多,详见表 5。山东省 17 地级市的调查中提出了黄豆中硼本底值为 36.38 mg/kg(以硼酸计为 208 mg/kg),黑豆中为 41.63 mg/kg(以硼酸计为 238 mg/kg)^[5];吉林、黑龙江、辽宁 3 省份的调查中提出了大豆中硼本底值为 39.46 mg/kg(以硼酸计为 225 mg/kg)^[17];张文珠等^[37]对上海市售的 88 份豆类及其制品中硼酸的调查中显示,有 95.5%的样品硼酸含量小于 200 mg/kg,最高为 263 mg/kg。安徽省 16 地市的调查显示豆制品中硼含量与豆类差异不显著,豆类硼含量约为 5.52~34.24 mg/kg,豆制品中硼含量约为 4.83~43.68 mg/kg^[29]。本研究中 140 批次的网络销售豆制品零食中硼酸含量最高值为 168 mg/kg,均小于上述研究者给出的硼本底建议值。世界卫生组织(World Health Organization, WHO)建议成年人硼的平均摄入量为 1~13 mg/d^[39],假设每日摄入 100 g 豆制品零食,按 WHO 建议的最大摄入量 13 mg/d 计算:豆制品零食中硼的最大限量水平=每日允许摄入量/每日摄入的豆制品零食=(13 mg/d)/(100 g/d)=130 mg/kg。中国营养膳食指南(2022 版)推荐平均每天摄入大豆及坚果类 25~35 g,但 2010~2013 年中国居民营养与健康状况监测报告显示全国居民豆类及其制品平均摄入量仅

为 10.8 g/标准人日(折合成黄豆量)^[40]。不考虑人为添加硼酸的情况下,豆制品零食中硼酸含量大部分集中在 50 mg/kg 以下,远低于最大限量水平。

3 结 论

本研究通过优化超声时间、提取试剂、蛋白沉淀剂等前处理条件,建立了 2.00%硫酸超声萃取,ICP-OES 快速测定豆制品零食中硼酸含量的方法。2.00%硫酸水溶液超声萃取可有效提取豆制品零食中的硼酸,方法的加标回收率、精密度和检出限等性能指标均满足实验的要求。本方法前处理简单,结果准确可靠。

采用本研究建立的方法,对 140 批次的网络销售豆制品零食中硼酸的含量进行检测。结果显示,网络销售豆制品零食中硼酸含量的范围为 2.22~167.79 mg/kg,82.14%的网络销售豆制品零食中的硼酸含量小于 50 mg/kg。同时在生活中人们食用豆制品零食仅作为休闲娱乐时的一种选择,而非长期大量食用,所以豆制品零食中硼酸的食用风险低,可以放心食用。但若摄入非法添加硼酸的豆制品零食,则可能增加硼酸的健康危害风险,甚至引起急性中毒。因此消费者购买时应避免选择三无产品,同时有关部门应加强相关食品中非法添加物的监管,更好地保证消费者的身体健康。

表 5 不同地区中豆类及其制品中硼的含量
Table 5 Content of boron in legume and its products in different areas

主要产地	豆类中硼的含量 /(mg/kg)	豆制品中硼的含量 /(mg/kg)	豆类中硼本底建议值 /(mg/kg)	参考文献
安徽	5.52~34.24	4.83~43.68	/	[29]
山东	9.17~40.06	/	41.63	[5]
吉林、黑龙江、辽宁	1.30~39.46	/	39.46	[17]
江西	26.20~71.00	/	/	[6]
广西、黑龙江、吉林、江苏	21.44~40.30	/	/	[30]
郑州、西安、甘肃	18.41~23.94	/	/	[31]
成都、遂宁、雅安、南充	32.13~39.16	/	/	[32]
深圳	7.98~19.50	/	25.00	[33]
广东	8.60~63.48	2.35~17.15	/	[34]
广州	2.99~34.73	/	/	[35]
广东(广州、韶关、河源)	12.51~23.27	/	/	[36]
上海市售	8.29~48.08	/	/	[37]
福建	0.17~2.43	/	/	[38]

注:表格中硼的含量均以硼计,换算系数硼酸为 5.72、硼砂为 8.83;/表示参考文献中未给出具体数据。

参考文献

- [1] ONUH AF, MIWA K. Regulation, diversity and evolution of boron transporters in plants [J]. *Plant Cell Physiol*, 2021, 62(4): 590–599.
- [2] WANG FH, AHAMMED GJ, LI GY, *et al.* Boric acid mediates self-incompatibility response by affecting sugar metabolism in radish [J]. *Int J Agric Biol*, 2020, 23(2): 288–294.
- [3] RIAZ M, YAN L, WU XW, *et al.* Boron supply maintains efficient antioxidant system, cell wall components and reduces aluminum concentration in roots of trifoliate orange [J]. *Plant Physiol Bioch*, 2019, 137: 93–101.
- [4] PRAKASH R, JOKHAN AD, SINGH R. Effects of foliar application of gibberellic acid, boric acid and sucrose on noni (*M. citrifolia* L.) fruit growth and quality [J]. *Sci Hort*, 2022, 301: 111098.
- [5] 冯伟, 田洪芸, 张海红, 等. 豆类、坚果及籽类中硼本底含量调查研究[J]. *食品安全导刊*, 2018, (29): 52–54.
FENG W, TIAN HY, ZHANG HH, *et al.* Investigation on boron content in beans, nuts and seeds [J]. *Chin Food Saf Magaz*, 2018, (29): 52–54.
- [6] 李金林, 刘林勇, 黄丽. 大豆及大豆制品中硼砂(硼酸)本底调查[J]. *江西食品工业*, 2012, (2): 44–45.
LI JL, LIU LY, HUANG L. Investigation of borax in soybean and soybean products [J]. *Jiangxi Food Ind*, 2012, (2): 44–45.
- [7] 陈莉莉, 陈江, 章荣华. 食品中硼本底值调查研究进展[J]. *浙江预防医学*, 2016, 28(4): 371–375.
CHEN LL, CHEN J, ZHANG RH. Research progress on background value of boron in food [J]. *Zhengjing J Prev Med*, 2016, 28(4): 371–375.
- [8] HADRUP N, FREDERIKSEN M, SHARMA AK. Toxicity of boric acid, borax and other boron containing compounds: A review [J]. *Regul Toxicol Pharm*, 2021, 121: 104873.
- [9] BOLT HM, BASARAN N, DUYDU Y. Effects of boron compounds on human reproduction [J]. *Arch Toxicol*, 2020, 94(3): 717–724.
- [10] KHALIQ H, JUMING Z, KE MP. The physiological role of boron on health [J]. *Biol Trace Elem Res*, 2018, 186(1): 31–51.
- [11] HACIOGLU C, KAR F, KACAR S, *et al.* High concentrations of boric acid trigger concentration-dependent oxidative stress, apoptotic pathways and morphological alterations in DU-145 human prostate cancer cell line [J]. *Bio Trace Elem Res*, 2020, 193(2): 400–409.
- [12] AKTAS S, KUM C, AKSOY M. Effects of boric acid feeding on the oxidative stress parameters in testes, sperm parameters and DNA damage in mice [J]. *J Trace Elem Med Bio*, 2020, 58: 126447.
- [13] MOGOSANU, GEORGE DAN, BITA, *et al.* Calcium fructoborate for bone and cardiovascular health [J]. *Biol Trace Elem Res*, 2016, 172(2): 277–281.
- [14] FAWCETT A, PRADEILLES J, WANG Y, *et al.* Photoinduced decarboxylative borylation of carboxylic acids [J]. *Science*, 2017, 357(6348): 283–286.
- [15] 黄丽, 李金林, 郭雪梅, 等. 大豆中硼形态研究及豆制品中硼形态调查[J]. *广东化工*, 2016, 43(19): 51–52.
HUANG L, LI JL, GUO XM, *et al.* The study and investigation of boron forms in soy and soy products [J]. *Guangdong Chem Ind*, 2016, 43(19): 51–52.
- [16] 马晓清, 汪东风, 徐莹, 等. 外源性硼酸在大豆制品-腐竹中的形态研究[J]. *中国食品学报*, 2019, 19(4): 258–265.
MA XQ, WANG DF, XU Y, *et al.* Studies on the forms of additional boric acid in soybean products-yuba [J]. *J Chin Inst Food Sci Technol*, 2019, 19(4): 258–265.
- [17] 宋筱瑜, 李凤琴, 刘兆平, 等. 中国 12 省市部分食品中硼本底含量调查及居民摄入量初估[J]. *卫生研究*, 2011, 40(4): 431–433.
SONG XY, LI FQ, LIU ZP, *et al.* Boron background value survey of some foodstuffs in 12 provinces of China and boron primary intake estimation of Chinese habitants [J]. *J Hyg Res*, 2011, 40(4): 431–433.
- [18] AGUILAR F, CREBELL R, DUSEMUND B, *et al.* Scientific opinion on the re-evaluation of boric acid (E 284) and sodium tetraborate (borax) (E 285) as food additives [J]. *Eur Food Saf Auth J*, 2013, 11(10): 3407.
- [19] 食品整治办〔2008〕3 号《食品中可能违法添加的非食用物质和易滥用的食品添加剂品种名单(第一批)》[Z].
List of illegal non-food substances and easily abused food additives may be added to food (first batch), the letter of office of food remediation [2008] No.3 [Z].
- [20] 林妮, 林起辉, 杨丽丹, 等. 甲亚胺-H 酸分光光度法测定饲料中硼的含量[J]. *粮食与饲料工业*, 2018, (12): 57–59, 63.
LIN N, LIN QH, YANG LD, *et al.* Determination of boron content in feed by spectrophotometer with azomethine-H acid [J]. *Cere Feed Ind*, 2018, (12): 57–59, 63.
- [21] 黄忠意, 张学英, 陈茵, 等. 食品中硼酸(硼砂)快速测定方法研究[J]. *粮食与油脂*, 2019, 32(2): 80–82.
HUANG ZY, ZHANG XY, CHEN Y, *et al.* Research on the fast determination of boric acid (borax) in food [J]. *J Cere Oils*, 2019, 32(2): 80–82.
- [22] 曾勇, 杨洋, 兰勤. 电感耦合等离子体质谱法测定大豆中硼含量的不确定度评定[J]. *食品安全质量检测学报*, 2021, 12(7): 2942–2946.
ZENG Y, YANG Y, LAN Q. Uncertainty evaluation for determination of boron in soybean by inductively coupled plasma mass spectrometry [J]. *J Food Saf Qual*, 2021, 12(7): 2942–2946.
- [23] 黄子伟, 邹斌享. 响应面法优选硼砂测定的 ICP 仪器条件研究[J]. *食品工程*, 2016, (2): 22–28.
HUANG ZW, ZOU BX. Optimization ICP instrument conditions for the determination of borax by response surface methodology [J]. *Food Eng*, 2016, (2): 22–28.
- [24] ERMAWATI FU, PRAHANI BK, YANTIDEWI M, *et al.* The performance of turmeric paper as an indicator of the borax content in crackers [C]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2021, 2110(1): 012014.
- [25] YUNianto M, ANDARESTA DP, ANWAR F, *et al.* Preliminary study on the use of optical fiber to detect borax content in meat [C]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2021, 1825(1): 012078.
- [26] HUNT CD. Dietary boron: Progress in establishing essential roles in human physiology [J]. *J Trace Elem Med Bio*, 2012, 26(2/3): 157–160.
- [27] 姚艳玲, 费贤明, 顾益. ICP-OES 快速检测豆制品中硼酸含量[J]. *中国卫生检验杂志*, 2011, 21(3): 588–589.
YAO YL, FEI XM, GU Y. Rapid determination of boric in bean products by ICP-OES [J]. *Chin J Health Lab Technol*, 2011, 21(3): 588–589.
- [28] 戴琪, 林晓娜, 吴艳燕, 等. 电感耦合等离子体原子发射光谱法测定化妆品中硼酸及硼酸盐含量[J]. *理化检验-化学分册*, 2013, 49(4): 394–397.
DAI Q, LIN XN, WU YY, *et al.* ICP-AES determination of boric acid and borate in cosmetics [J]. *Phys Test Chem Anal Part B*, 2013, 49(4): 394–397.
- [29] 崔杰, 刘柏林, 孟灿, 等. 2014–2018 年安徽省部分豆类及豆制品中硼

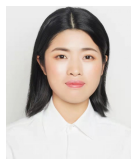
- 含量[J]. 卫生研究, 2020, 49(1): 145–147.
- CUI J, LIU BL, MENG C, *et al.* Boron content in beans and bean products in Anhui Province from 2014 to 2018 [J]. J Hyg Res, 2020, 49(1): 145–147.
- [30] 沈丹萍. 不同产地大豆中矿质元素及异黄酮含量分析[D]. 苏州: 苏州大学, 2014.
- SHEN DP. Content analysis of mineral elements and isoflavones in soybean from different producing areas [D]. Suzhou: Soochow University, 2014.
- [31] 杨大鹏, 刘晶. ICP-AES 法测定大豆及其产品腐竹中硼含量[J]. 粮油食品科技, 2016, 24(4): 83–85.
- YANG DP, LIU J. Determination of difference of boron content in soybean and its product yuba by ICP-AES [J]. Sci Technol Cere Oils Foods, 2016, 24(4): 83–85.
- [32] 陈代伟, 万渝平, 叶梅, 等. 大豆及豆制品中硼含量测定及其迁移行为研究[J]. 食品与发酵科技, 2013, 49(1): 73–75.
- CHEN DW, WAN YP, YE M, *et al.* Determination and migration behavior of boron in soybean and soybean products [J]. Food Ferment Sci Technol, 2013, 49(1): 73–75.
- [33] 邓宏玉, 张念, 张贵伟, 等. 深圳市食品中硼本底含量的调查研究[J]. 广东化工, 2014, 41(3): 35–36.
- DENG HY, ZHANG N, ZHANG GW, *et al.* Boron background value survey of foodstuffs in Shenzhen [J]. Guangdong Chem Ind, 2014, 41(3): 35–36.
- [34] 李凯文, 邹志辉, 叶蔚云, 等. 食品中硼含量测定与居民硼摄入量评估[J]. 中国公共卫生, 2014, 30(11): 1441–1443.
- LI KW, ZOU ZH, YE WY, *et al.* Determination of boron content in foods and assessment of dietary boron intake of habitants in Guangzhou City [J]. Chin J Public Health, 2014, 30(11): 1441–1443.
- [35] 区子阳, 李凯文, 赵雅芬, 等. 姜黄素分光光度法测定广州市售食品中硼含量[J]. 中国食品卫生杂志, 2012, 24(2): 119–123.
- QU ZY, LI KW, ZHAO YF, *et al.* Determination of boron in foods from Guangzhou by curcumin spectrophotometer [J]. Chin J Food Hyg, 2012, 24(2): 119–123.
- [36] 钟宏星, 李长成, 曾史俊, 等. 广东地区豆类天然硼砂含量的分析[J]. 广东化工, 2016, 43(13): 39–40, 36.
- ZHONG HX, LI CC, ZENG SJ, *et al.* Investigation of borax in beans in Guangdong area [J]. Guangdong Chem Ind, 2016, 43(13): 39–40, 36.
- [37] 张文珠, 郑翌, 葛宇. 食品中硼酸及硼酸盐污染分布研究[J]. 食品安全质量检测学报, 2020, 11(13): 4242–4247.
- ZHANG WZ, ZHENG Y, GE Y. Study on pollution distribution of boric acid and borate in food [J]. J Food Saf Qual, 2020, 11(13): 4242–4247.
- [38] 杨艳, 陈宏靖, 李鑫, 等. 福建省部分食品中硼含量的本底值调查研究[J]. 中国预防医学杂志, 2016, 17(4): 299–302.
- YANG Y, CHEN HJ, LI X, *et al.* Background value of boron in some food products in Fujian Province [J]. Chin Prev Med, 2016, 17(4): 299–302.
- [39] WHO. Environ Health Criteria [R]. 1998.
- [40] 赵丽云, 何宇纳. 中国居民营养与健康状况监测报告之一: 2010–2013 年膳食与营养素摄入状况[M]. 北京: 人民卫生出版社, 2018.
- ZHAO LY, HE YN. Dietary and nutrient intake part I of the national surveillance report on nutrition and health in China from 2010 to 2013 [M]. Beijing: People's Medical Publishing House, 2018.

(责任编辑: 张晓寒 于梦娇)

作者简介



巩佳第, 硕士, 工程师, 主要研究方向为食品、农产品等质量安全分析检测。
E-mail: jiadig@163.com



余程凤, 工程师, 主要研究方向为食品、农产品质量安全分析检测。
E-mail: 981885129@qq.com