

励磁等电势法检测粉丝中的硫酸铝钾含量

杨哪^{1, 2, 3}, 周宇益⁴, 徐振林², 孟嫚¹, 陈新文¹, 孙远明^{2*}

(1. 广东利诚检测技术有限公司, 广东中山 528436) (2. 华南农业大学食品学院, 广东广州 510642)
(3. 江南大学食品学院, 江苏无锡 214122) (4. 英都斯特(无锡)感应科技有限公司, 江苏无锡 214035)

摘要: 该研究建立了一种励磁等电势法测定食品中硫酸铝钾含量的分析方法。采用励磁等电势法, 向初级线圈施加频率 300~700 Hz 及励磁电压 5~20 V 的正弦交流信号, 分析次级线圈中不同质量分数的硫酸铝钾溶液电学特性。结果发现, 相同质量分数的硫酸铝钾溶液中, 励磁电压的变化对其体系各点对地电压的影响大于频率的变化。当硫酸铝钾溶液质量分数增加时, 随频率及励磁电压的增加, 体系电势差增大, 当励磁电压从 5 V 增加至 20 V 时, 20 mg/kg 硫酸铝钾溶液电势差提高 78.79%。励磁等电势法中各参数呈线性相关, 相关系数 (r) 为 0.94, 在 300 Hz, 20 V 下检测 4 种市售粉丝产品, 检测结果相对标准偏差均在 1.50% 以内, 励磁等电势检测具有良好的重复性, 且与化学法相比, 检测结果相对误差在 2.00% 以内, 励磁等电势法具有良好的准确性。励磁等电势法将粉丝的预处理料液作为次级线圈, 测定其电学特性来量化硫酸铝钾含量, 为食品中硫酸铝钾的检测提供了一种新方法。

关键词: 励磁等电势法; 硫酸铝钾; 频率; 励磁电压; 粉丝

文章篇号: 1673-9078(2022)03-293-298

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2022.3.0749

Determination of Aluminum Potassium Sulfate Content in Vermicelli Using an Excitation Equipotential Method

YANG Na^{1,2,3}, ZHOU Yuyi⁴, XU Zhenlin², MENG Man¹, CHEN Xinwen¹, SUN Yuanming^{2*}

(1. Guangdong Licheng Detection Technology Co. Ltd., Zhongshan 528436, China) (2. School of Food Science and Technology, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China) (3. School of Food Science and Technology, Jiangnan University, Wuxi 214122, China) (4. INDUC Scientific Co. Ltd., Wuxi 214035, China)

Abstract: Herein, an excitation equipotential method was established to determine the content of aluminum potassium sulfate in vermicelli. Sinusoidal AC signals with an excitation voltage of 5~20 V at 300~700 Hz were applied to a primary coil to analyze the electrical characteristics of aluminum potassium sulfate solution in a secondary coil (or sample coil). The impact of excitation voltages on ground voltages was greater than that of frequencies with the same mass fraction of aluminum potassium sulfate solutions. Increasing mass fractions of aluminum potassium sulfate solutions enhanced potential differences with increasing frequency and excitation voltage. On altering the excitation voltage from 5 V to 20 V, the potential difference of 20 mg/kg aluminum potassium sulfate solution increased by 78.79%. Parameters in the excitation equipotential method were linearly correlated, presenting a correlation coefficient (r) of 0.94. Four kinds of commercial vermicelli products were examined at 300 Hz and 20 V, and the relative standard deviations of detection results were within 1.50%. The excitation equipotential method exhibited repeatability. It also showed better accuracy than the chemical method, with relative errors for detection results within 2.00%. This excitation equipotential method helps analyze pretreated solutions of vermicelli at the secondary coil, determining its electrical characteristics to quantify the aluminum potassium sulfate content. This study provides a novel method for detecting aluminum potassium sulfate content in food.

引文格式:

杨哪,周宇益,徐振林,等.励磁等电势法检测粉丝中的硫酸铝钾含量[J].现代食品科技,2022,38(3):293-298

YANG Na, ZHOU Yuyi, XU Zhenlin, et al. Determination of aluminum potassium sulfate content in vermicelli using an excitation equipotential method [J]. Modern Food Science and Technology, 2022, 38(3): 293-298

收稿日期: 2021-07-16

项目基金: 中国博士后科学基金项目(2020M682725); 国家自然科学基金面上项目(32172353); 江苏省优秀青年基金项目(BK20211582)

作者简介: 杨哪(1982-), 男, 博士, 副研究员, 研究方向: 食品电学检测与非热技术, E-mail: yangna@jiangnan.edu.cn

通讯作者: 孙远明(1956-), 男, 博士, 教授, 研究方向: 食品安全检测、食品化学与营养, E-mail: ymsun@scau.edu.cn

Key words: excitation equipotential method; aluminum potassium sulfate; frequency; excitation voltage; vermicelli

硫酸铝钾, 又称钾明矾, 作为一种膨松剂和稳定剂广泛应用于食品加工^[1]。红薯具有耐干旱和产量高的特点, 是我国的主要农作物之一, 红薯中淀粉含量约为 10%~30%, 其深加工产品红薯粉丝及粉条深受大众欢迎。粉丝加工过程中添加明矾, 可防止粉丝断裂, 改善粉丝口感^[2]。然而, 长期食用明矾超标的食品, 明矾中的铝元素在人体内过量累积且难以代谢, 对人体大脑产生不良影响^[3]。莫颂秩等^[4]研究发现, 慢性铝中毒导致小鼠认知能力发生障碍, 学习与记忆能力减弱。陈雅等^[5]发现 45.03 $\mu\text{mol/L}$ 硫酸铝钾抑制小鼠胚胎中脑细胞增殖, 而 3.92 $\mu\text{mol/L}$ 硫酸铝钾阻碍脑细胞分化。李亮等^[6]发现, 慢性铝中毒影响小鼠空间学习记忆能力, 且小鼠低密度脂蛋白降低。我国 GB 2760-2014 中明确规定, 粉丝中硫酸铝钾的残留物铝的质量分数不超过 200 mg/kg。

目前常见的硫酸铝钾残留物铝的检测方法包括铬天青 S 分光光度法, 电感耦合等离子体发射光谱法、石墨炉原子吸收法和电化学法。刘冬豪^[7]采用铬天青 S 分光光度法测定辣椒中的明矾, 检出限为 0.02 g/kg, 该方法需要使用硝酸和高氯酸等消解预处理, 操作过程复杂; 陈树娣等^[8]采用电感耦合等离子体发射光谱法测定蜂蜜中的铝含量, 检测限为 9.4 mg/kg, 检测精度高, 但需要专业操作人员, 检测成本相对较高; 薛巧如等^[9]采用石墨炉-原子吸收分光光度法测定复方氨基酸注射液中的铝含量为 5~40 ng/mL, 检测线性关系良好, 但铝的原子化程度高, 对石墨炉产生较大伤害, 不利于使用寿命; 郭蒙等^[10]采用伏安法测定食品中的铝含量, 其检出限为 2.2×10^{-8} mol/L。与 Pryor 等^[11]研究相似, 基于变压器的工作参数可表征电解质溶液理化特性。励磁等电势法依据变压器原理, 向初级线圈施加不同频率及励磁电压的正弦交流信号, 次级线圈中的样品溶液产生感应电势, 差异性感应电势根据不同样品溶液的理化特性分配在测量端和次级线圈中。因此, 通过检测感应电势的变化, 可分析次级线圈中样品特定成分的含量。而利用励磁等电势法测定食品中的硫酸铝钾鲜有报道。

本文采用励磁等电势检测分析不同质量分数硫酸铝钾溶液的电学特性, 并选取 4 种市售的粉丝产品检测其硫酸铝钾含量, 探究励磁等电势法检测粉丝中硫酸铝钾的可行性, 为食品中硫酸铝钾的检测提供新的方法。

1 材料与方

1.1 主要材料与试剂

3 种粉丝 (散装圆饼粉丝、散装长条粉丝和双塔红薯粉丝), 购于超市和 1 种散装长条粉丝购于自由市场; 氨水、盐酸、乙酸、乙酸钠、乙二胺四乙酸二钠、氯化锌、二甲酚橙指示剂和刚果红试纸 (所有试剂均为分析纯), 国药集团化学试剂有限公司。

1.2 主要仪器与设备

励磁等电势检测设备 (根据变压器原理自制励磁电压 5~20 V, 频率 300~700 Hz), 广东利诚检测技术有限公司理化分析中心实验室自制; C-MAG 磁力搅拌器, 德国 IKA 公司; AL204 分析天平, 瑞士 Mettler Toledo 仪器有限公司; 低速大容量离心机, 上海安亭科学仪器厂。

1.3 试验条件与方法

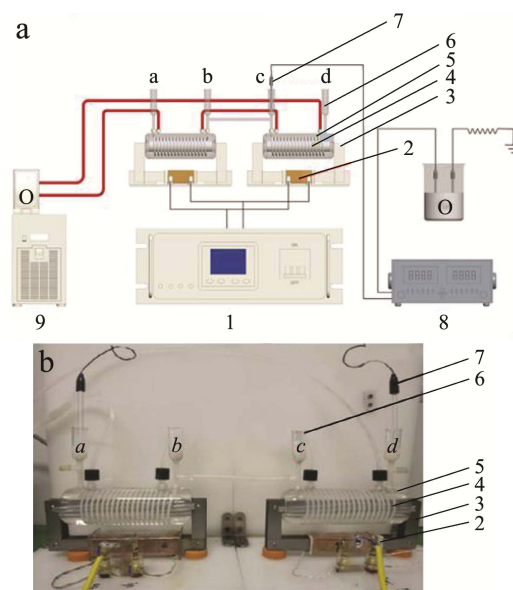


图 1 励磁等电势检测设备示意图

Fig.1 Schematic diagram of excitation equipotential equipment

注: 1. 电源; 2. 初级线圈; 3. 铁芯; 4. 次级线圈 (螺旋管道); 5. 恒温腔体; 6. 玻璃连接孔; 7. 铂电极; 8. 电压表; 9. 恒温循环水浴锅。

励磁等电势检测设备如图 1b 所示, 样品溶液经玻璃连接孔倒入后布满螺旋管道, 样品溶液经过 b、c 处管道相连, 形成两个绕向相同的次级线圈。设置恒温循环水浴温度为 30 $^{\circ}\text{C}$, 向初级线圈施加频率 300~700 Hz 和励磁电压 5~20 V 的正弦交流信号, 通过铂电极依次检测样品 o 和位点 a、b、c 和 d 之间的对地电压 V_{ao} 、 V_{bo} 、 V_{co} 和 V_{do} , 并测定 a、d 间的电势差 U_{ad} 。

将硫酸铝钾配置成质量分数为 10、20、30、40 mg/kg 的硫酸铝钾标准溶液，依次向初级线圈施加频率 300、400、500、600 和 700 Hz 及 5、10、15 和 20 V 的励磁电压，并测定次级线圈中 o 点和 a~d 四个检测点对地电压以及 a 和 d 检测位点间的电势差。并测定 4 种市售粉丝产品中硫酸铝钾含量，粉丝粉碎后，过 300 目筛，与去离子水按 1:10 的比例混合均匀，5000 g 离心 20 min，取上清液过 0.45 μm 水系滤膜过滤后检测，并按照 GB 1886.229-2016《食品安全国家标准 食品添加剂 硫酸铝钾》，采用化学法检测粉丝样品中硫酸铝钾含量。

1.4 数据分析

使用 ORIGIN 8.5 和 SPSS 22.0 进行制图及数据分析，每个样品重复检测 3 次，取其平均值。

2 结果与分析

2.1 频率对硫酸铝钾溶液对地电压的影响

向初级线圈施加 10 V 励磁电压，检测 20 mg/kg 硫酸铝钾溶液在不同频率下，次级线圈中 a~d 四个检测点对地电压的变化。从图 2 中可以发现，在一定励磁电压下，随频率从 300 Hz 增加至 700 Hz，硫酸铝钾溶液的对地电压保持不变，因此后续选择 300 Hz 为检测频率值。不同频率下，b 和 c 点对地电压基本相同，这与 Edwin 等研究结果一致，在同一磁通密度下，液体二次回路为等电位电池^[12]。Pryor 等利用变压器原理检测海水电导值，并认为电导值可采用基于变压器特性的电学参数来表征^[11]。与变压器原理相同，次级线圈中感应电压与初级线圈励磁电压有关，与频率不相关。励磁等电势法中，在相同励磁电压下，不同频率下的硫酸铝钾溶液感应电势无显著变化，测得各位点对地电压变化较小。

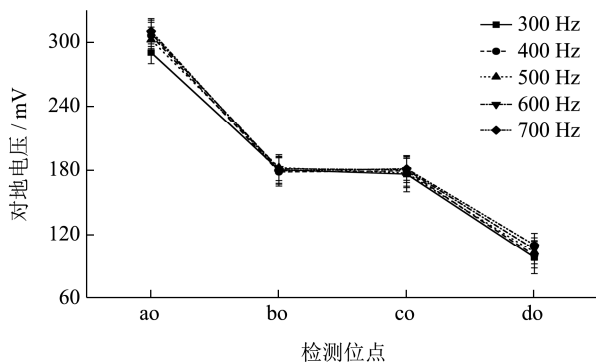


图 2 不同频率下硫酸铝钾溶液的对地电压

Fig.2 Voltages to ground of aluminum potassium sulfate solution under different frequencies

2.2 励磁电压对硫酸铝钾溶液对地电压的影响

初级线圈频率为 300 Hz，检测 20 mg/kg 硫酸铝钾溶液在不同励磁电压下，次级线圈中 a~d 四个检测点对地电压的变化。从图 3 中可以发现，随励磁电压从 5 V 提高至 20 V，硫酸铝钾溶液 V_{ao} 增大，20 V 下 V_{ao} 较 5 V 时增大 27.08%。而 V_{do} 则减小，20 V 下 V_{do} 较 5 V 时下降 96.49%。随励磁电压的增大，a 位点到 d 位点的对地电压下降趋势逐渐增加，因此后续采用 20 V 为检测励磁电压值，a 至 d 检测位点的电势差 U_{ad} 为电信号指标。与 Zakrevskii 等^[13]研究相似，交变电场作用下，聚合物薄膜中大分子迁移加速，电传率增加。Guo 等^[14]利用微波辅助萃取茶多酚，发现物理场作用下，提取时间缩短 97.70%，提取物稳定性提高。随励磁电压的增大，次级线圈中硫酸铝钾溶液感应电势增加，体系中带电离子碰撞几率增加，热运动加剧，离子传导增强，输出电压增大。

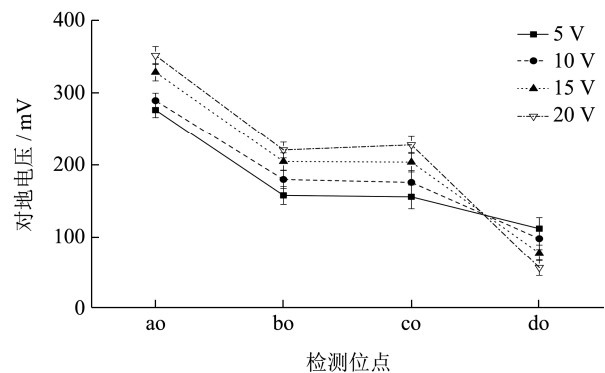


图 3 不同励磁电压下硫酸铝钾溶液的对地电压

Fig.3 Voltages to ground of aluminum potassium sulfate solution under different excitation voltages

2.3 频率对不同质量分数硫酸铝钾溶液电势差的影响

向初级线圈施加 20 V 励磁电压，检测不同质量分数的硫酸铝钾溶液在 300~700 Hz 频率下，次级线圈中电势差 U_{ad} 的变化。硫酸铝钾溶液呈酸性，在 30 °C 下其电导率随硫酸铝钾质量分数的提高而增加。从图 4 中可以发现，在不同频率下，硫酸铝钾溶液的 U_{ad} 保持在相对稳定的范围内，随硫酸铝钾溶液质量分数的增加，体系电势差增大。300 Hz，20 V 条件下，40 mg/kg 硫酸铝钾溶液的 U_{ad} 较 0 和 10 mg/kg 的 U_{ad} 分别增大 88.38% 和 42.37%。程树康等^[15]发现氯化钠溶液经磁场处理后，溶液中水分子磁矩发生偏转，削减

了溶液的电泳效应, 电导率升高。孟嫚等^[16]利用电磁感应原理提取松茸多糖, 发现随频率的增加, 松茸多糖产量下降。随溶液中硫酸铝钾质量分数的提高, 体系电导率增加, 次级线圈中带电自由离子受到交变感应电势的影响, 发生往复运动, 促进离子传导, 体系电势差增大, 但不随初级线圈频率变化发生改变。

表 1 不同质量分数下硫酸铝钾溶液的电导率

Table 1 Conductivities of aluminum potassium sulfate solutions with different mass fractions

硫酸铝钾质量分数/(mg/kg)	电导率/(ms/cm)
0	0.01±0.01 ^c
10	1.35±0.18 ^d
20	1.88±0.19 ^c
30	2.63±0.22 ^b
40	3.57±0.29 ^a

注: 表中数值为 3 次测量平均值±相对标准偏差, 同一列中不同字母表明差异显著 ($p<0.05$)。

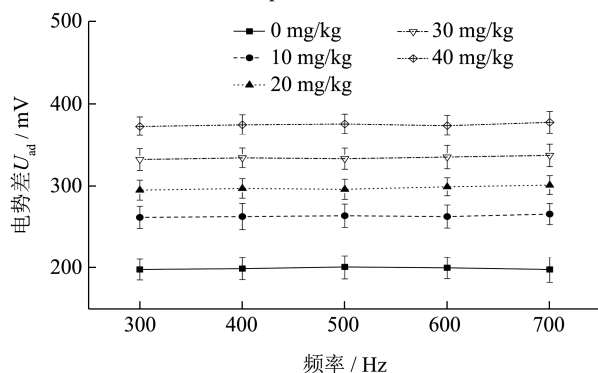


图 4 不同频率下硫酸铝钾溶液的电势差

Fig.4 Potential differences of aluminum potassium sulfate solution under different frequencies

2.4 励磁电压对不同质量分数硫酸铝钾溶液

电势差的影响

初级线圈频率为 300 Hz, 检测不同质量分数的硫酸铝钾溶液在 5~20 V 励磁电压下, 次级线圈中电势差 U_{ad} 的变化。从图 5 中可以发现, 硫酸铝钾溶液 U_{ad} 与励磁电压呈正相关, 且电势差变化趋势随硫酸铝钾质量分数的增加而增大。在 300 Hz 频率下, 当励磁电压从 5 V 增加至 20 V 时, 20 mg/kg 硫酸铝钾溶液 U_{ad} 提高 78.79%。ZhanG 等^[17]发现电场处理导致复合物中甲醇分子相对位置旋转, 电荷转移, 且极性发生改变。Qiu 等^[18]发现磁场作用下, 纳米沉淀物发生二次共沉淀, 其核化率增加。当溶液中硫酸铝钾质量分数增加, 体系中自由带电离子数量提高, 随初级线圈励磁电压的增大, 次级线圈中感应电压逐渐增大, 离子传导效率增加, 次级线圈电势能不断累积, 电势差变化趋势急剧增大。

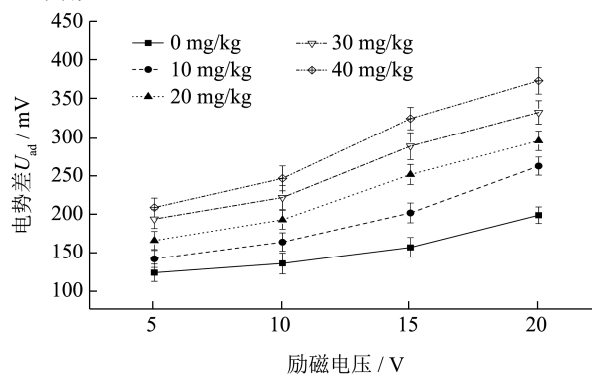


图 5 不同励磁电压下硫酸铝钾溶液的电势差

Fig.5 Potential differences of aluminum potassium sulfate solution under excitation voltages

2.5 粉丝样品中硫酸铝钾的检测

表 2 粉丝样品中硫酸铝钾含量的测定

Table 2 Determination of aluminum potassium sulfate in vermicelli samples

样品	样品测定值 U_{ad}/mV			平均值 /mV	相对标准偏差 RSD/%	硫酸铝钾总含量 /(mg/kg) (励磁等电势法)	硫酸铝钾总含量 /(mg/kg) (化学法)	相对误差 (RE)%
	1	2	3					
A	272.31	275.62	270.03	272.65	1.03	144.13	141.51	1.85
B	268.51	263.22	265.75	265.83	1.00	127.08	125.05	1.62
C	208.32	206.23	209.44	208.00	0.78	-17.51	0	-
D	312.52	318.43	320.11	317.02	1.26	255.05	251.53	1.40

注: A: 超市散装圆饼粉丝; B: 散装长条粉丝; C: 双塔红薯粉丝; D: 自由市场散装长条粉丝。

利用 ORIGIN 8.5 分析溶液中硫酸铝钾含量 Y 与频率 X_1 、励磁电压 X_2 和电势差 X_3 的关系, 得到线性方程 $Y=-6.75-0.01X_1-2.20X_2+0.25X_3$, 相关系数(r)为 0.94, 该研究中粉丝样品的质量分数为 10%, 故其硫酸铝钾总含量为 $10Y$ 。在 20 V, 300 Hz 下测定 4 种市

售粉丝样品的电势差 U_{ad} , 并依据线性方程计算其硫酸铝钾总含量。从表 2 中可以发现, 样品 C 中硫酸铝钾总含量极低, 该样品中未添加硫酸铝钾, 检测样品 A~D 中硫酸铝钾总含量的相对标准偏差均在 1.50% 以内, 且与样品化学法检测结果相比, 相对误差均在

2.00%以内, 励磁等电势法具有良好的重复性和准确性。适量使用硫酸铝钾可改善食品品质, 唐欢欢等^[1]使用 2.63‰的明矾提高了粉丝的硬度、咀嚼性, 改善其蒸煮品质。然而, 范子玮^[2]发现明矾在改善粉丝品质的同时, 其 Al^{3+} 在胃部和肠道溶出率仅为 50%和 10%, 血液、肝脏和脑部等区域 Al^{3+} 含量显著升高。市售包装粉丝大多不含有硫酸铝钾, 样品 C 中检测数值极小, 该样品不含硫酸铝钾, 而散装产品则存在较大隐患, 励磁等电势法及化学法检测样品 D 中硫酸铝钾总含量分别为 255.05 mg/kg 和 251.53 mg/kg, 超过国标允许使用量, 因此, 可靠有效的检测技术为添加剂的规范使用提供了保障。

3 结论

本研究利用励磁等电势法, 以 300~700 Hz 频率及 5~20 V 励磁电压作为初级线圈电信号参数, 分析次级线圈中不同质量分数硫酸铝钾溶液的电学特性, 并检测 4 种市售粉丝产品种硫酸铝钾含量。研究发现, 硫酸铝钾溶液的对地电压随频率变化无显著差异, 随励磁电压的增加而增大。当硫酸铝钾溶液质量分数增加时, 不同频率下体系电势差维持在稳定范围内, 而随励磁电压的增加, 体系电势差急剧升高, 在 300 Hz 频率下, 当励磁电压从 5 V 增加至 20 V 时, 20 mg/kg 硫酸铝钾溶液 U_{ad} 提高 78.79%。硫酸铝钾溶液质量分数、频率、励磁电压和电势差呈线性相关, 相关系数 (r) 为 0.94。检测 4 种市售粉丝产品, 检测值相对标准偏差均在 1.50%以内, 且与化学法检测结果相比较, 测定结果相对误差均小于 2.00%, 试验具有良好的重复性和准确性。将粉丝的预处理料液作为次级线圈, 利用励磁等电势法测定其电学特性为食品中硫酸铝钾等添加剂的检测提供了一种新方法。

参考文献

- [1] 何青峰, 杨玉梅. 食品添加剂明矾生产新工艺研究[J]. 无机盐工业, 2013, 45(9): 35-36
HE Qingfeng, YANG Yumei. Study on new technology of alum as food additive [J]. Inorganic Chemicals Industry, 2013, 45(9): 35-36
- [2] 孙震曦, 木泰华, 马梦梅, 等. 无明矾薯类鲜湿粉条的加工工艺优化及其理化特性[J]. 现代食品科技, 2020, 36(12): 153-160, 6
SUN Zhengxi, MU Taihua, MA Mengmei, et al. Processing technology optimization and physicochemical properties of alum-free fresh potato/cassava starch noodles [J]. Modern Food Science and Technology, 2020, 36(12): 153-160, 6
- [3] 欧阳爱国, 郑艺蕾, 李斌, 等. 太赫兹光谱技术对红薯淀粉中明矾含量的检测方法研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2020, 40(3): 727-732
OUYANG Aiguo, ZHENG Yilei, LI Bin, et al. Study on the detection method of alum content in sweet potato starch by terahertz spectroscopy [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2020, 40(3): 727-732
- [4] 莫颂轶, 张丽凤, 黄彦峰, 等. 慢性铝中毒小鼠学习记忆与大脑皮层 ACh、 β -EP、SOD 及 MDA 关系的研究[J]. 中国比较医学杂志, 2018, 28(7): 63-67
MO Songyi, ZHANG Lifeng, HUANG Yanfeng, et al. Relationships between learning and memory abilities and levels of ACh, β -EP, SOD, and MDA in the cerebral cortex of mice with chronic aluminum toxicities [J]. Chinese Journal of Comparative Medicine, 2018, 28(7): 63-67
- [5] 陈雅, 张本忠. 硫酸铝钾对小鼠胚胎中脑细胞增殖和分化的影响[J]. 中国职业医学, 2007, 34(6): 458-459
CHEN Ya, ZHANG Benzong. Effects of aluminum potassium sulfate on proliferation and differentiation of mouse embryo midbrain cells [J]. China Occupational Medicine, 2007, 34(6): 458-459
- [6] 李亮, 薛星莉, 李亚芹, 等. 亚慢性铝染毒对转人载脂蛋白 E4 基因小鼠 β -淀粉样蛋白含量及低密度脂蛋白家族的影响[J]. 环境与职业医学, 2020, 37(2): 103-110
LI Liang, XUE Xingli, LI Yaqin, et al. Effects of subchronic aluminum exposure on β -amyloid protein and low density lipoprotein family in transgenic mice with human apolipoprotein E4 gene [J]. Journal of Environmental & Occupational Medicine, 2020, 37(2): 103-110
- [7] 刘冬豪. 辣椒制品中明矾快速测定方法研究[J]. 中国调味品, 2012, 37(6): 89-91, 110
LIU Donghao. Rapid determination of alum in chilli products [J]. China Condiment, 2012, 37(6): 89-91, 110
- [8] 陈树娣, 郑晓彬. 深圳市散装蜂蜜中铝残留量的现状调查[J]. 现代食品, 2020, 18: 212-214
CHEN Shudi, ZHENG Xiaobin. The actuality investigation of aluminum residue in Shenzhen bulk honey [J]. Modern Food, 2020, 18: 212-214
- [9] 薛巧如, 刘冰滢, 陈子锋, 等. ICP-MS 与石墨炉原子吸收法测定复方氨基酸注射液中铝含量的比较[J]. 中国现代应用药学, 2021, 38(3): 318-322
XUE Qiaoru, LIU Bingying, CHEN Zifeng, et al. Comparison of graphite furnace atomic absorption spectrometry and ICP-MS for determination of aluminum in compound amino acid injection [J]. Chinese Journal of

- Modern Applied Pharmacy, 2021, 38(3): 318-322
- [10] 郭蒙,王林同,李丹,等.应用黄芩素测定食品中的痕量铝[J].分析实验室,2014,33(2):201-204
GUO Meng, WANG Lintong, LI Dan, et al. Application of baicalein in the determination of trace aluminum in food [J]. Chinese Journal of Analysis Laboratory, 2014, 33(2): 201-204
- [11] Pryor R W. Inductive conductivity measurement of seawater [C]. In Proceedings of the COMSOL Conference, 2013
- [12] Edwin M, Peter V. SCR drives - AC line disturbance, isolation, and short-circuit protection [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1974, IA-10(1): 88-105
- [13] Zakrevskii V A, Pakhotin V A, Sudar N T. Dielectric aging and dielectric degradation (breakdown) of polymer films in AC electric fields [J]. Physics of the Solid State, 2019, 61(10): 1915-1921
- [14] Guo Z X, Chen C, Yohannes A, et al. Microwave energy-assisted extraction of bioactive polyphenols with green technology based on magnetic ionic liquid and their stability under different conditions [J]. Physics of the Solid State, 2019, 268(1): 012072
- [15] 程树康,陈磊,李楠,等.磁场对 NaCl 溶液电导率影响的实验研究[J].高技术通讯,2010,20(10):1091-1095
CHENG Shukang, CHEN Lei, LI Nan, et al. Experimental research on effects of magnetic fields on the conductivity of NaCl solutions [J]. Chinese High Technology Letters, 2010, 20(10): 1091-1095
- [16] 孟曼,张延杰,杨哪,等.磁感应电场提取松茸多糖工艺优化[J].食品工业科技,2019,40(1):143-148
MENG Man, ZHANG Yanjie, YANG Na, et al. Efficient extraction of *Tricholoma matsutake* polysaccharide by magneto-induced electric field and its process optimization [J]. Science and Technology of Food Industry, 2019, 40(1): 143-148
- [17] Zhang S H, Chen W G, Shi H Y, et al. Theoretical studies of the influence of an intermolecular force and an electric field on the methanol Raman spectrum [J]. The Journal of Physical Chemistry C, 2020, 124(13): 6955-6963
- [18] Qiu N S, Yan J C, Zuo X W. A novel strategy for hierarchical structure in multicomponent nano-precipitated steels by high magnetic field aging [J]. Scripta Materialia, 2021, 191: 137-142
- [19] 唐欢欢,范子玮,邓利玲,等.明矾和魔芋葡甘聚糖对红薯粉丝品质的影响及相互作用机理[J].食品与发酵工业,2019,45(9):233-241
TANG Huanhuan, FAN Ziwei, DENG Liling, et al. Effects of alum and konjac glucomannan on the quality of sweet potato noodles and their interaction mechanisms [J]. Food and Fermentation Industries, 2019, 45(9): 233-241
- [20] 范子玮.明矾和 KGM 对红薯淀粉糊化回生特性的影响及粉丝中 Al^{3+} 在体内外代谢规律的研究[D].重庆:西南大学, 2018
FAN Ziwei. Effect of alum and KGM on pasting and retrogradation properties of sweet potato starch and the metabolism of Al^{3+} in noodles *in vitro* and *in vivo* [D]. Chongqing: Southwest University, 2018

(上接第 292 页)

- [20] 陈青川,杨惠芬.硼氢化钾溶液配制方式和保存时间对 HG-AFS 测锗的影响理化检验[J].化学分册,1997,33(4):179-180
CHEN Qingchuan, YANG Huifen. The effect of potassium boron hydroxide solution formulation and storage time on HG-AFS palladium testing was physically and chemically tested [J]. Physical Testing and Chemical Analysis (Part B: Chemical Analysis), 1997, 33(4): 179-180
- [21] 申利群,雷福厚,黄素玉.2,3-二氯-5,6-二氰基苯醌在有机反应中的应用进展[J].化学通报,2011,74(6):497-507
SHEN Liqun, LEI Fuhou, HUANG Suyu. Progress in the application of 2,3-dichloro-5,6-dicyanobenzoquinone in organic reactions [J]. Chemistry, 2011, 74(6): 497-507
- [22] 桑丽雅,朱晓华,郑百芹,等.水产品孔雀石绿和隐性孔雀石绿快速定量检测研究[J].食品研究与开发,2014,35(10):92-95
SANG Liya, ZHU Xiaohua, ZHENG Baiqin, et al. Study on the rapid and quantitative detection of malachite green and leucomalachite green in aquatic product [J]. Food Research and Development, 2014, 35(10): 92-95
- [23] 林泓,邓晓军,古淑青.一种基于检出概率模型的拉曼快检性能综合评价方法:中国,CN 110609030 A [P]. 2019.12.24. epub.cnipa.gov.cn
LIN Hong, DENG Xiaojun, GU Shuqing. A comprehensive evaluation method of Raman fast detection performance based on the detection probability model: China, CN 110609030 A [P]. 2019.12.24. epub.cnipa.gov.cn