DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20260119003
引用格式: 秦晓娟, 燕阔, 陈福尊, 等. 离子色谱法同时测定火腿肠中的亚硝酸盐和多种磷酸盐[J]. 食品安全质量检测学报, 2026, 17(12): 108–113.
QIN XJ, YAN K, CHEN FZ, *et al*. Simultaneous determination of nitrite and multiple phosphates in ham sausage by ion chromatography [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2026, 17(12): 108–113. (in Chinese with English abstract).

离子色谱法同时测定火腿肠中的亚硝酸盐和多种磷酸盐

秦晓娟, 燕　阔, 陈福尊, 云　鹏, 李　锦*, 刘玉欣
(河北省疾病预防控制中心, 石家庄　050021)

摘　要: 目的　建立离子色谱法同时测定火腿肠中亚硝酸盐和多种磷酸盐(正磷酸盐、焦磷酸盐、三聚磷酸盐、三偏磷酸盐)含量的分析方法。**方法**　样品经超声提取, 三氯甲烷除蛋白, 离子色谱-反相固相萃取柱净化后, 采用离子色谱仪测定。**结果**　亚硝酸盐在 0.01~4.00 mg/L, 正磷酸盐、焦磷酸盐、三聚磷酸盐、三偏磷酸盐在 0.10~40.00 mg/L 范围内呈良好的线性关系, 相关系数均大于 0.999。检出限分别为 0.06~0.60 mg/kg, 定量限为 0.20~2.00 mg/kg, 回收率在 89.4%~103.5%之间, 相对标准偏差为 1.4%~6.1%。**结论**　本研究方法灵敏度高, 准确可靠, 操作简单, 适用于火腿肠中亚硝酸盐和多种磷酸盐的同时测定。

关键词: 离子色谱法; 亚硝酸盐; 磷酸盐; 火腿肠

Simultaneous determination of nitrite and multiple phosphates in ham sausage by ion chromatography

QIN Xiao-Juan, YAN Kuo, CHEN Fu-Zun, YUN Peng, LI Jin*, LIU Yu-Xin
(*Hebei Provincial Center for Disease Control and Prevention*, *Shijiazhuang* 050021, *China*)

ABSTRACT: Objective　To establish a method for the determination of nitrite and multiple phosphates including phosphate, pyrophosphate, triphosphate and trimetaphosphate in ham sausage by ion chromatography. **Methods** The samples were ultrasonically extracted, deproteinized with chloroform, purified by ion chromatography-reversed phase solid phase extraction column, and then detected by ion chromatography. **Results**　There was a good linear relationship in the range of 0.01–4.00 mg/L for nitrite, and 0.10–40.00 mg/L for phosphate, pyrophosphate, triphosphate and trimetaphosphate, and the correlation coefficients were all over 0.999. The limits of detection were 0.06–0.60 mg/kg and the limits of quantitation were 0.20–2.00 mg/kg. The recoveries were between 89.4%–103.5%, and the relative standard deviations were between 1.4%–6.1%. **Conclusion**　This method is highly sensitive, accurate and reliable, with simple operation, making it suitable for the simultaneous determination of nitrite and

收稿日期: 2026-01-19
基金项目: 河北省医学科学研究指导性课题项目(20242156)
第一作者: 秦晓娟(1987—), 女, 硕士, 副主任技师, 主要研究方向为食品及饮用水质量与安全检测。E-mail: lanye1987032@126.com
***通信作者:** 李锦(1981—), 女, 硕士, 主任技师, 主要研究方向为食品及饮用水质量与安全检测。E-mail: hbcdc1208@163.com

various phosphates in ham sausage.

KEY WORDS: ion chromatography; nitrite; phosphates; ham sausage

0　引　言

亚硝酸盐具有防腐性和护色性质, 可与肉中的肌红蛋白结合生成玫瑰色亚硝基肌红蛋白, 增进肉的色泽, 所以在食品加工中被添加在香肠和腊肉中作为护色剂和防腐剂。亚硝酸盐具有一定的毒性, 人体过量误食会引发急性中毒, 长期过量摄入还存在潜在健康风险[1−4], 所以其在食品中的残留量一直是食品安全重点监测指标。磷酸盐是食品添加剂中应用广泛、用量较大的保水剂和品质改良剂, 常被用于肉制品加工过程, 过量摄入会导致机体钙磷流失[5−8], 因此食品中磷酸盐的限量管控同样十分重要。我国对食品中亚硝酸盐和磷酸盐含量有明确的限量标准。多数情况下, 在火腿肠等方便肉制品生产中, 亚硝酸盐和磷酸盐同时使用。

目前亚硝酸盐和磷酸盐的检测方法主要有离子色谱法[9−13]、分光光度法[14−19]和连续流动分析法[20−21]等。分光光度法易受基质干扰, 且只能测定磷酸根总量, 多种磷酸盐不能分离测定; 离子色谱法分离效果好、定性定量准确, 是多种阴离子同时检测的优选方法。目前已有关于海产品、蔬菜及饮用水中亚硝酸盐和磷酸盐同时测定的分析研究[22−25], 但大多针对亚硝酸盐和磷酸根总量进行测定。针对火腿肠复杂基质样品, 现有前处理方法难以满足肉制品高脂肪、高蛋白基质的净化需求, 且亚硝酸盐和正磷酸盐、焦磷酸盐、三聚磷酸盐、三偏磷酸盐多组分同时分离检测的研究鲜见报道。本研究建立超声辅助萃取-固相净化-离子色谱法, 为火腿肠中亚硝酸盐和多种磷酸盐的安全监管提供了技术支撑。

1　材料与方法

1.1　材料与试剂

火腿肠样品购自石家庄市某大型超市。

4 种磷酸盐混合标准溶液[磷酸根(PO_4^{3-})、焦磷酸根($P_2O_7^{4-}$)、三聚磷酸根($P_3O_{10}^{5-}$)、三偏磷酸根($P_3O_9^{3-}$), 4 种离子质量浓度均为1000 mg/L, 基体10 mmol/L氢氧化钠(NaOH)]、PO_4^{3-}分析标准物质、$P_2O_7^{4-}$分析标准物质、$P_3O_{10}^{5-}$分析标准物质、$P_3O_9^{3-}$分析标准物质(质量浓度均为1000 mg/L, 基体纯水)(上海安谱科学仪器公司); 亚硝酸根离子标准溶液(以N计, 质量浓度 100 mg/L, 中国计量科学院); 三氯甲烷(色谱纯, 北京迈瑞达科技有限公司); NaOH(优级纯, 天津市永大化学试剂有限公司); KOH 淋洗液(优级纯, 美国Thermo Fisher Scientific 公司)。

1.2　仪器与设备

ICS-6000离子色谱仪(美国Thermo Fisher Scientific公司); IonPac™ AS11-HC 色谱柱(4 mm×250 mm)、IonPac™ AG11-HC 保护柱(4 mm×50 mm)(美国戴安公司); AL-204IC 电子分析天平(精度 0.1 mg, 瑞士梅特勒-托利多公司); XM-P30H 超声波清洗机[小美超声仪器(昆山)有限公司]; 3-30K 离心机(德国 Sigma 公司); Nova U 超纯水机(青岛普洛斯科技有限公司); 离子色谱-反相(ion chromatography-reversed phase, IC-RP)固相萃取柱(1 cc, 天津艾杰尔公司)。

1.3　实验方法

1.3.1　色谱条件

色谱柱: IonPac™ AS11-HC (4 mm×250 mm); 保护柱: IonPac™ AG11-HC (4 mm×50 mm); 淋洗液: KOH 淋洗液梯度淋洗, 梯度淋洗时间及KOH浓度见表1; 流速: 1.0 mL/min; 抑制电流: 186 mA; 柱温: 30 ℃; 进样量: 50 μL。

表 1　梯度淋洗时间及 KOH 浓度

Table 1　Time of gradient elution and concentration of KOH

时间/min	KOH 浓度/(mmol/L)	曲率
0	6	5
16.0	6	5
16.1	30	5
28.0	30	5
28.1	60	5
38.0	60	5
41.0	75	5
45.0	75	5
45.1	6	5
50.0	6	5

1.3.2　样品前处理

将火腿肠样品粉碎, 混合均匀, 称取 2.5 g(精确至0.1 mg)于50 mL离心管, 加入30 mL超纯水, 70 ℃超声提取 30 min, 每隔5 min振摇一次, 使样品完全分散。冷却至室温后转移至50.0 mL比色管, 定容混匀。取上清液10.0 mL于15 mL离心管, 加入1 mL三氯甲烷, 充分混匀, 于4 ℃下8000 r/min离心10 min。注射器取上清液, 依次通过IC-RP固相萃取柱、0.22 μm水性滤膜, 弃去前面3 mL, 收集后面洗脱液待测。样品中磷酸盐含量较高时, 测定前将待测液稀释适当倍数后再进行测定。

IC-RP固相萃取柱使用前依次用10 mL甲醇、15 mL水通过, 静置活化30 min。

1.3.3　测　定

在仪器最佳状态下测定标准溶液和样品溶液。以待测

组分的质量浓度为横坐标(X, mg/L), 峰面积为纵坐标(Y)绘制标准曲线。以保留时间定性, 外标法定量。

1.4 数据处理

本研究使用 Excel 2016 进行数据的导入和整理, 并对实验数据进行处理和分析。

2 结果与分析

2.1 前处理条件的选择

2.1.1 提取温度的选择

根据 GB 5009.33—2025《食品安全国家标准 食品中亚硝酸盐与硝酸盐的测定》及 GB 5009.256—2025《食品安全国家标准 食品中多种磷酸盐的测定》规定, 肉制品中亚硝酸盐的提取采用超声提取 30 min 后, 在 75 ℃水浴中放置 5 min; 磷酸盐的提取采用 80 ℃超声提取 30 min。为保证回收率, 且亚硝酸盐和磷酸盐不分解, 本研究采取 70 ℃超声提取。

2.1.2 蛋白沉淀剂的选择

肉制品中常含有蛋白质、脂肪等物质, 检测前须除去。常用的蛋白沉淀剂有三氟乙酸、三氯乙酸、三氯甲烷、乙腈、乙醇等。等文献[26–27]分析了三氟乙酸、三氯乙酸、三氯甲烷、醋酸铅等沉淀蛋白的效果和对测定结果的影响。结果发现使用醋酸铅会出现混浊悬浮物, 三氟乙酸、三氯乙酸、三氯甲烷沉淀效果好, 但三氟乙酸和三氯乙酸对多聚磷酸盐的色谱峰产生干扰。本研究考察了三氯甲烷、乙腈和乙醇对蛋白沉淀效果的影响, 发现用三氯甲烷可以有效去除蛋白质, 且三氯甲烷有机相与水相分层明显, 不带入其他杂质干扰。因此采用三氯甲烷作蛋白沉淀剂。经研究, 取 10.0 mL 样品提取液, 加入 1 mL 三氯甲烷能将蛋白质、脂肪完全沉淀。

2.1.3 样品的净化

火腿肠样品基质较为复杂, 用三氯甲烷除去蛋白质后仍含有糖、色素等有机物质, 用 IC-RP 固相萃取柱可以有效去除。所以本研究采用三氯甲烷与 IC-RP 固相萃取柱相结合的方式进行净化。研究发现经过 IC-RP 固相萃取柱后收集的滤液澄清透明, 经 0.22 μm 水性滤膜过滤后可进行测定。

2.2 色谱条件的选择

2.2.1 淋洗条件的选择

淋洗液的浓度是影响分离效果的重要因素。考虑到亚硝酸盐容易洗脱, 磷酸盐较难洗脱, 同时不同形态的磷酸盐较难有效分离, 本研究采用梯度洗脱程序[28]。

本研究采用分段实验方法摸索洗脱条件, 用火腿肠加标样品分 4 段实验。(1)亚硝酸盐与氯化物的分离洗脱, 分别实验了 4 mmol/L 和 6 mmol/L KOH 等度洗脱条件。当 KOH 淋洗液浓度为 4 mmol/L 时, 亚硝酸盐与氯离子分离效果不理想, 分离度仅为 0.5。且氯离子浓度较大时, 会严重干扰亚硝酸盐的测定。KOH 浓度为 6 mmol/L 时, 氯离子和亚硝酸根可有效分离, 分离度为 1.7, 故选用 6 mmol/L 的 KOH。(2) PO_4^{3-}等度洗脱, 20 mmol/L 和 25 mmol/L 的 KOH 对低浓度的 PO_4^{3-}可以较好洗脱, 但 PO_4^{3-}浓度稍高时峰形拖尾不对称。30 mmol/L 的 KOH 对高、低浓度的 PO_4^{3-}都能有效洗脱, 且峰形对称, 所以 PO_4^{3-}的洗脱浓度确定为 30 mmol/L。(3) $P_2O_7^{4-}$、$P_3O_{10}^{5-}$和 $P_3O_9^{3-}$的分离。后两者在中低浓度的淋洗液下较难分离, 需采用较高强度的淋洗液浓度。KOH 浓度为 50 mmol/L 时, $P_3O_{10}^{5-}$和 $P_3O_9^{3-}$分离效果不理想, 且 $P_3O_{10}^{5-}$色谱峰拖尾, 60 mmol/L 则避免这一现象。(4)样品中其他组分的洗脱。最后采用 75 mmol/L 的淋洗液冲洗 5 min, 确保样品中其他组分从色谱柱中洗脱出来。综上考虑, 本研究采用梯度淋洗, 既保证各组分有效分离, 峰形较好, 又缩短了整个实验时间。

2.2.2 柱温的选择

柱温是影响分离效果、保留时间及柱效的因素之一。钟志雄等[29]考察了温度对分离效果的影响, 温度升高, 离子的保留时间延长, 柱效增高, 分离效果较好。但当温度高于 35 ℃时, PO_4^{3-}分离柱效开始下降, 且 PO_4^{3-}、$P_3O_9^{3-}$和 $P_2O_7^{4-}$色谱峰的对称性变差。本研究尝试在 25 ℃和 30 ℃条件下进行分离。25 ℃时, 虽然各组分保留时间较 30 ℃稍短, 但 $P_3O_{10}^{5-}$和 $P_3O_9^{3-}$分离度小, 且 $P_3O_{10}^{5-}$出峰位置处有杂峰与之无法分离。30 ℃时, 各组分峰形对称, $P_3O_{10}^{5-}$和杂峰有效分离, $P_3O_{10}^{5-}$和 $P_3O_9^{3-}$分离度为 1.6, 能够完全分离。所以本研究中柱温设定为 30 ℃。30 ℃时, 各组分的离子色谱图见图 1。

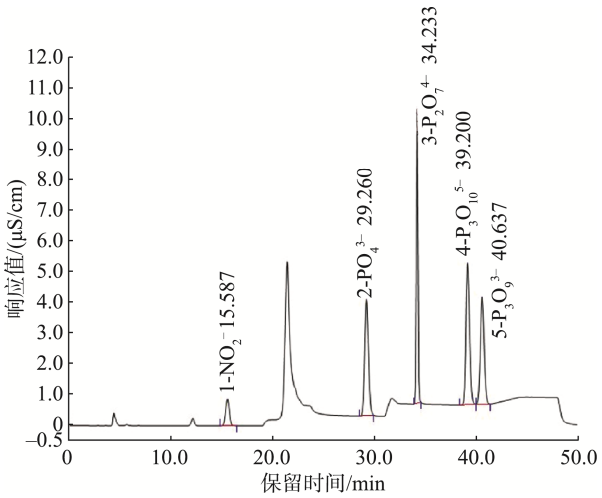


图 1 NO_2^-、PO_4^{3-}、$P_2O_7^{4-}$、$P_3O_{10}^{5-}$、$P_3O_9^{3-}$在 30 ℃柱温下的离子色谱图

Fig.1 Ion chromatogram of NO_2^-, PO_4^{3-}, $P_2O_7^{4-}$, $P_3O_{10}^{5-}$ and $P_3O_9^{3-}$ at a column temperature of 30 ℃

2.3　方法的线性范围、检出限和定量限

配制一系列质量浓度的 NO_2^-、PO_4^{3-}、$P_2O_7^{4-}$、$P_3O_{10}^{5-}$、$P_3O_9^{3-}$混合标准溶液进行测定, 以各组分的质量浓度为横坐标(X, mg/L), 峰面积响应值为纵坐标(Y), 绘制标准曲线。以 3 倍信噪比确定各组分的检出限(S/N>3)。按取样 2.5 g, 定容至 50.0 mL, 分别计算 NO_2^-、PO_4^{3-}、$P_2O_7^{4-}$、$P_3O_{10}^{5-}$、$P_3O_9^{3-}$的检出限和定量限。表 2 列出了各组分的线性范围、线性方程、相关系数、检出限和定量限。亚硝酸盐在 0.01~4.00 mg/L, 正磷酸盐、焦磷酸盐、三聚磷酸盐、三偏磷酸盐在 0.10~40.00 mg/L 范围内呈良好的线性关系, 相关系数均大于 0.999。检出限分别为 0.06~0.60 mg/kg, 定量限为 0.20~2.00 mg/kg。该方法灵敏度高, 能够满足火腿肠样品中亚硝酸盐和多种磷酸盐定量分析的要求。

表 2　线性范围、线性方程及检出限与定量限

Table 2　Linear ranges, linear equations, limits of detection and limits of quantitation

待测离子	保留时间/min	线性范围/(mg/L)	线性方程	相关系数	检出限/(mg/kg)	定量限/(mg/kg)
NO_2^-	15.587	0.01~4.00	Y=0.383X–0.0010	0.9996	0.06	0.20
PO_4^{3-}	29.260	0.10~40.00	Y=0.171X–0.0201	0.9996	0.60	2.00
$P_2O_7^{4-}$	34.233	0.10~40.00	Y=0.193X–0.0293	0.9995	0.60	2.00
$P_3O_{10}^{5-}$	39.057	0.10~40.00	Y=0.199X–0.0293	0.9998	0.60	2.00
$P_3O_9^{3-}$	40.637	0.10~40.00	Y=0.160X–0.0349	0.9999	0.60	2.00

2.4　方法的回收率和精密度

准确称取火腿肠样品 2.5 g, 添加低、中、高 3 个水平的标准溶液, 每个加标水平平行测定 6 次, 按照 1.3.2 的步骤处理后进行测定, 并计算回收率和相对标准偏差(relative standard deviation, RSD), 如表 3 所示。结果表明各组分回收率在 89.4%~103.5%之间, RSDs 在 1.4%~6.1%之间, 符合定量分析的要求。样品及样品加标色谱图见图 2、图 3。

表 3　火腿肠中不同加标水平回收率及 RSDs (n=6)

Table 3　Recovery rates and RSDs at different spiking levels in ham sausage (n=6)

待测离子	本底值/(mg/kg)	加标量/(mg/kg)	平均回收率/%	RSDs/%
NO_2^-	5.0	3.0	94.4	5.6
		6.0	102.0	1.8
		30.0	101.2	1.6
PO_4^{3-}	907.3	200.0	97.2	6.1
		400.0	101.6	4.2
		800.0	103.5	3.2
$P_2O_7^{4-}$	322.4	40.0	96.8	1.4
		200.0	98.6	3.0
		400.0	101.9	1.9
$P_3O_{10}^{5-}$	ND	40.0	89.4	5.1
		200.0	90.2	2.0
		400.0	91.4	2.6
$P_3O_9^{3-}$	ND	40.0	92.5	2.6
		200.0	97.7	1.4
		400.0	103.0	1.9

注: ND 表示未检出。表 4 同。

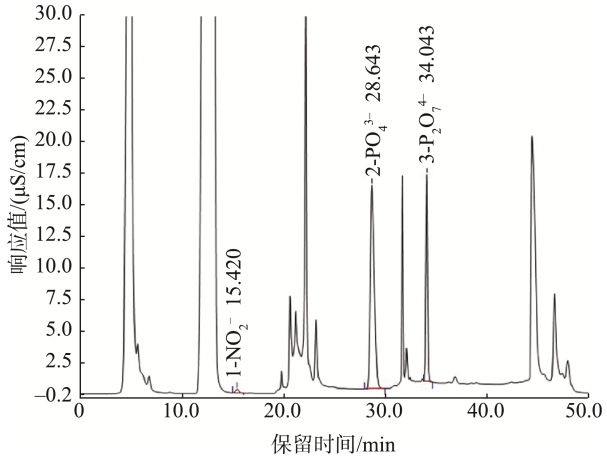


图 2　样品离子色谱图

Fig.2　Ion chromatogram of sample

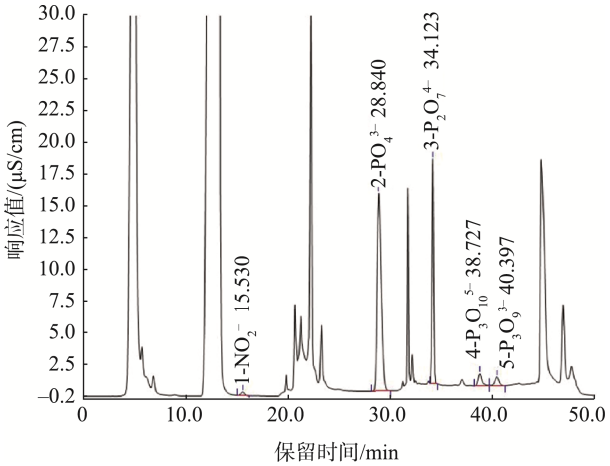


图 3　样品加标离子色谱图

Fig.3　Ion chromatogram of spiked sample

2.5 实际样品测定

本研究采用上述方法测定了市售的 20 份火腿肠样品中 NO_2^-、PO_4^{3-}、$P_2O_7^{4-}$、$P_3O_{10}^{5-}$和 $P_3O_9^{3-}$。火腿肠种类包含鱼肉肠、鸡肉肠、猪肉肠及鸡肉、猪肉混合肠等。测定结果见表 4。大部分火腿肠中含有亚硝酸盐，均低于国家限量标准。PO_4^{3-}和 $P_2O_7^{4-}$均被检出，$P_3O_{10}^{5-}$和 $P_3O_9^{3-}$的检出率分别为 70.0%、65.0%。GB 2760—2024《食品安全国家标准 食品添加剂使用标准》规定多种磷酸盐复合使用时，熟肉制品中最大使用量不超过 5.0 g/kg(以 PO_4^{3-}计)，20 份火腿肠样品中有 2 份超过该限量值。这也可能与生鲜肉中本身含磷较高有关系。有文献表明，猪、牛及家禽在饲养过程中，会使用含磷较高的饲料，致使生鲜肉中磷的本底含量较高，从而导致最终产品中磷酸盐含量高[30]。

表 4 火腿肠样品中亚硝酸盐和多种磷酸盐含量
Table 4 Content of nitrite and various phosphates in ham sausages sample

待测离子	含量范围/(mg/kg)	平均值/(mg/kg)	检出率/%
NO_2^-	0.2~10.7	2.1	80.0
PO_4^{3-}	524.6~4939.1	3164.9	100.0
$P_2O_7^{4-}$	9.8~1539.7	384.0	100.0
$P_3O_{10}^{5-}$	ND~220.2	71.9	70.0
$P_3O_9^{3-}$	ND~149.5	53.5	65.0

3 结论与讨论

本研究建立了超声辅助萃取-固相净化-离子色谱法同时测定火腿肠中亚硝酸盐和多种磷酸盐含量的检测方法，并对市售的 20 份火腿肠样品进行检测。结果表明，相较于传统比色法，本方法准确可靠，灵敏度和精密度高，亚硝酸盐和多种磷酸盐同时处理、同时测定，节省人力物力。在进行加标实验过程中，三聚磷酸盐和三偏磷酸盐在低浓度水平加标时部分回收率偏低，可能在前处理提取及净化过程中存在一定损失，进而导致低浓度水平下回收率偏低，后续可结合实际需求探索低成本的前处理改良方案。在本研究的基础上，可进一步扩大样品范围，通过不同肉制品不同基质的比对验证该方法的普适性。

目前 GB 2760—2024 未对熟肉制品中磷酸盐的残留限量做明确规定，但建立精准的检测方法是开展风险评估的技术前提。本方法适用于火腿肠中亚硝酸盐和多种磷酸盐的同时测定，为火腿肠产品中该类添加剂的安全监管提供了技术依据和数据支撑，可以助力规范行业生产经营，保障消费者饮食安全。

参考文献

[1] 高彭, 马晓晨, 吕金昌, 等. 北京市 S 区居民熟肉制品中亚硝酸盐膳食暴露风险评估[J]. 中国食品卫生杂志, 2022, 34(4): 786−790.
GAO P, MA XC, LV JC, *et al*. Risk assessment of dietary exposure to nitrite in cooked meat products of residents in S District, Beijing [J]. Chinese Journal of Food Hygiene, 2022, 34(4): 786−790.

[2] MONIREH SS, ELHAM M, FATEMEH T, *et al*. Association of dietary nitrate, nitrite, and N-nitroso compounds intake and gastrointestinal cancers: A systematic review and meta-analysis [J]. Toxics, 2023, 11(2): 190.

[3] SOTIRIA K, ANTONIS Z, EMMANUELLA M. Dietary nitrate and nitrite and human health: A narrative review by intake source [J]. Nutrition Reviews, 2022, 80(4): 762–773.

[4] 杨丽, 冯寅花, 付鹏钰, 等. 2014—2023 年河南省市售散装即食熟肉制品中亚硝酸盐监测结果分析[J]. 现代疾病预防控制, 2024, 35(9): 641–646.
YANG L, FENG YH, FU PY, *et al*. Analysis of nitrite monitoring in bulk ready-to-eat cooked meat products in Henan Province, 2014—2023 [J]. Modern Disease Control and Prevention, 2024, 35(9): 641–646.

[5] 杨乾松, 邢通, 张林, 等. 磷酸盐添加对肉制品保水性和风味影响的研究进展[J]. 食品科学, 2025, 46(23): 359–366.
YANG QS, XING T, ZHANG L, *et al*. Research progress on the effects of phosphates on the water-holding capacity and flavor of meat products [J]. Food Science, 2025, 46(23): 359–366.

[6] WANG WQ, ZENG MM, CHEN QM, *et al*. Influence of phosphate marinades on the quality and flavor characteristics of prepared beef [J]. Molecules, 2025, 30(1): 202.

[7] 臧明伍, 孙焕, 史智佳, 等. 原料肉中磷酸盐本底含量状况调查与分析[J]. 食品工业科技, 2012, 33(9): 369–371.
ZANG MW, SUN H, SHI ZJ, *et al*. Investigation of background concentration of phosphate in raw meat [J]. Science and Technology of Food Industry, 2012, 33(9): 369–371.

[8] MOLINA RE, BOHRER BM, MEJIA SMV. Phosphate alternatives for meat processing and challenges for the industry: A critical review [J]. Food Research International, 2023, 166: 112624.

[9] 尤芳芳, 孙亚真, 宁水平, 等. 2018—2019 年洛阳市市售熟肉制品中亚硝酸盐含量分析[J]. 食品安全质量检测学报, 2021, 12(6): 2503–2507.
YOU FF, SUN YZ, NING SP, *et al*. Analysis of nitrite content in cooked meat products sold in Luoyang City from 2018 to 2019 [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2021, 12(6): 2503–2507.

[10] 张雪茹, 宋志超, 刘婷婷, 等. 常见市售袋装熟制牛肉产品的营养安全品质调查与分析[J]. 食品与发酵工业, 2020, 46(15): 282–288.
ZHANG XR, SONG ZC, LIU TT, *et al*. Investigation and analysis of nutrition, safety and quality of the cooked and packaged beef products in the market [J]. Food and Fermentation Industries, 2020, 46(15): 282–288.

[11] 赵欣, 项海龙, 李建超, 等. 蔬菜烹饪后在不同储藏条件下亚硝酸盐含量的变化分析[J]. 食品安全质量检测学报, 2024, 15(17): 121–126.
ZHAO X, XIANG HL, LI JC, *et al*. Analysis of nitrite content in fried vegetables under different storage conditions [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2024, 15(17): 121–126.

[12] 王艳春. 离子色谱法同时测定熟肉制品中亚硝酸盐和硝酸盐含量[J]. 卫生研究, 2009, 38(2): 212–213.
WANG YC. Simultaneous determination of nitrite and nitrate content in cooked meat products by ion chromatography [J]. Journal of Hygiene Research, 2009, 38(2): 212–213.

[13] 刘玲, 陈俊秀, 赵香梅, 等. 分光光度法测定肉制品中的亚硝酸盐[J].

实验室检测, 2023, 1(1): 12–16.
LIU L, CHEN JX, ZHAO XM, *et al*. Determination of nitrite in meat products by spectrophotometry [J]. Laboratory Testing, 2023, 1(1): 12–16.

[14] 邹晓华, 王丽. 肉制品中复合磷酸盐的微波灰化、分子光谱测定法[J]. 职业与健康, 2009, 25(15): 1612–1613.
ZOU XH, WANG L. Measurement of composite phosphate in meat products by microwave ashing and molecular spectroscopy [J]. Occupation and Health, 2009, 25(15): 1612–1613.

[15] 林静, 陈登锋, 杨明强, 等. 分光光度法和离子色谱法测定水中磷酸盐的比较[J]. 海峡预防医学杂志, 2023, 29(4): 68–70.
LIN J, CHEN DF, YANG MQ, *et al*. Comparison of the determination of phosphate in water by spectrophotometry and ion chromatography [J]. Strait Journal of Preventive Medicine, 2023, 29(4): 68–70.

[16] 凌约涛, 郭坚, 王帆. 碱液提取离子色谱法测定水产品中多聚磷酸盐的研究[J]. 食品工业科技, 2012, 33(19): 301–303.
LING YT, GUO J, WANG F. Determination of polyphosphates in aquatic products by alkali liquor extraction-ion chromatography [J]. Science and Technology of Food Industry, 2012, 33(19): 301–303.

[17] 孙亮, 肖海龙, 王红青, 等. 微波加热阻断分解后测定冻水产品中多聚磷酸盐 – 离子色谱法[J]. 中国卫生检验杂志, 2010, 20(11): 2766–2768.
SUN L, XIAO HL, WANG HQ, *et al*. Determination of polyphosphates in frozen seafood-ion chromatography after microwave heating [J]. Chinese Journal of Health Laboratory Technology, 2010, 20(11): 2766–2768.

[18] 刘佳, 沈娟, 詹玮, 等. 采用离子色谱检测肉及肉制品中多聚磷酸盐[J]. 食品与发酵工业, 2017, 43(9): 215–218.
LIU J, SHEN J, ZHAN W, *et al*. Determination of polyphosphates in meat and meat products by ion chromatography [J]. Food and Fermentation Industries, 2017, 43(9): 215–218.

[19] 王丽, 张丽, 励建荣. 免试剂离子色谱法检测水产品及其制品中的多聚磷酸盐[J]. 中国食品学报, 2011, 11(4): 203−211.
WANG L, ZHANG L, LI JR. Determination of polyphosphates in aquatic products and their products by free reagent ion chromatography [J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2011, 11(4): 203−211.

[20] 秦园, 钱志荣, 吴梅, 等. 生活用水中磷酸盐连续流动分析测定法[J]. 职业与健康, 2022, 38(11): 1465–1468.
QIN Y, QIAN ZR, WU M, *et al*. Determination of phosphate in domestic water by continuous flow analyzer [J]. Occupation and Health, 2022, 38(11): 1465–1468.

[21] 肖细炼, 陈燕波, 魏立, 等. 双通道在线连续流动分析法同时测定环境水样中总磷和磷酸盐[J]. 中国无机分析化学, 2024, 14(5): 521−529.
XIAO XL, CHEN YB, WEI L, *et al*. Simultaneous determination of total phosphorus and phosphate in environmental water samples by dual channel online continuous flow analysis [J]. Chinese Journal of Inorganic Analytical Chemistry, 2024, 14(5): 521−529.

[22] 邵宏宏, 周向阳, 王琦, 等. 离子色谱法同时测定海产品中的硝酸盐、亚硝酸盐和多聚磷酸盐[J]. 食品科学, 2014, 35(20): 248–252.
SHAO HH, ZHOU XY, WANG Q, *et al*. Simultaneous determination of nitrate, nitrite and polyphosphates in seafood by ion chromatography [J]. Food Science, 2014, 35(20): 248–252.

[23] 杨敏, 杨树科, 王炯, 等. 离子色谱法测定白菜中的硝酸盐、亚硝酸盐、磷酸盐及总磷、总氮[J]. 食品科学, 2010, 31(18): 216−219.
YANG M, YANG SK, WANG J, *et al*. Determination of nitrate, nitrite, phosphate, total phosphorus and total nitrogen in vegetables using ion chromatography [J]. Food Science, 2010, 31(18): 216−219.

[24] 杨笑, 杨毅华, 陈波. 离子色谱法同时测定饮用水中溴酸盐、亚氯酸盐、氯酸盐、亚硝酸盐氮、磷酸盐含量[J]. 中国无机分析化学, 2015, 5(3): 20–23.
YANG X, YANG YH, CHEN B. Determination of bromate, chlorite, chlorate, nitrite nitrogen and phosphate in drinking water by ion chromatography [J]. Chinese Journal of Inorganic Analytical Chemistry, 2015, 5(3): 20–23.

[25] 郝志明, 周文俊, 肖艳萍. 冷冻鱼糜及制品中磷酸盐测定的研究[J]. 现代食品科技, 2011, 27(12): 1542–1543.
HAO ZM, ZHOU WJ, XIAO YP. Detection of phosphate in frozen surimi and frozen surimi-based products [J]. Modern Food Science and Technology, 2011, 27(12): 1542–1543.

[26] 陈笑梅, 池浩超, 黄超群, 等. 沸水阻断多聚磷酸盐分解离子色谱法检测水产品中的多聚磷酸盐[J]. 分析化学, 2008, 36(10): 1403–1406.
CHEN XM, CHI HC, HUANG CQ, *et al*. Determination of polyphosphates in aquatic products by ion chromatography after inhibition by boiling water [J]. Chinese Journal of Analytical Chemistry, 2008, 36(10): 1403–1406.

[27] 李锦, 燕阔, 刘玉欣, 等. 固相萃取-超滤离心-离子色谱法测定冰淇淋和雪糕中的硫氰酸盐[J]. 中国卫生检验杂志, 2015, 25(10): 1937–1939.
LI J, YAN K, LIU YX, *et al*. Determination of thiocyanate in icecream by SPE-ultrafiltration centrifugation-ion chromatography [J]. Chinese Journal of Health Laboratory Technology, 2015, 25(10): 1937–1939.

[28] 邓光辉, 胡炜, 黄科林, 等. 离子色谱法检测三聚磷酸盐中不同形态磷酸盐的研究[J].食品科学, 2009, 30(10): 153–155.
DEND GH, HU W, HUANG KL, *et al*. Ion chromatography for content determination of various phosphate forms in tripoly-phosphate [J]. Food Science, 2009, 30(10): 153–155.

[29] 钟志雄, 李攻科. 离子色谱法测定海产品中磷酸盐、焦磷酸盐、偏磷酸盐和总磷[J]. 色谱, 2009, 27(4): 499–504.
ZHONG ZX, LI GK. Determination of phosphate, pyrophosphate, metaphosphate and total phosphorus in seafood by ion chromatography [J]. Chinese Journal of Chromatography, 2009, 27(4): 499–504.

[30] 张俭波, 鲁杰, 杨大进, 等. 生鲜肉及肉制品中磷酸盐含量调查分析[J]. 中国食品卫生杂志, 2008, 20(4): 298–300.
ZHANG JB, LU J, YANG DJ, *et al*. Investigation on phosphate content in fresh meat and meat product [J]. Chinese Journal of Food Hygiene, 2008, 20(4): 298–300.

(责任编辑: 安香玉　蔡世佳)