DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20260314001
引用格式: 冯小燕, 钟果玉, 薛莉颖, 等. 高效液相色谱法检测固体饮料中 4 种嘌呤含量[J]. 食品安全质量检测学报, 2026, 17(13): 218–226.
Feng Xiaoyan, Zhong Guoyu, Xue Liying, et al. Determination of 4 kinds of purine content in solid beverages by high performance liquid chromatography [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2026, 17(13): 218–226. (in Chinese with English abstract).

高效液相色谱法检测固体饮料中 4 种嘌呤含量

冯小燕[1], 钟果玉[2], 薛莉颖[1], 陈华清[1], 李　丽[1], 王钦富[1*], 陈凤清[1*]
(1. 海南科技职业大学基础医学部, 海口　571137; 2. 海南省人民医院肝胆胰外科二区, 海口　570311)

摘　要: 目的　建立高效液相色谱法测定预包装食品中固体饮料的嘌呤含量, 并将其应用于市售预包装固体饮料检测的方法。**方法**　利用酸水解提取固体饮料中的 4 种嘌呤, 通过分离度和峰形筛选色谱柱, 优化流动相 pH、流速、柱温等检测条件, 并进行方法学验证。**结果**　采用 Sunniest C_{18} 色谱柱, 以 pH 为 3.68 的 10 mmol/L 甲酸铵溶液-甲醇(99:1, *V*:*V*)为流动相, 流速 1.0 mL/min, 柱温 30 ℃, 进样量 10 μL, 检测波长 254 nm, 4 种嘌呤完全分离且峰形良好。鸟嘌呤、腺嘌呤、次黄嘌呤在 1.00~40.00 mg/L 范围内线性关系良好(r^2≥0.9990), 黄嘌呤在 0.10~4.00 mg/L 范围内线性关系良好(r^2=0.9998); 检出限 0.01~0.14 mg/L, 定量限 0.04~0.46 mg/L; 加标回收率 88.00%~113.00%, 相对标准偏差为 0.05%~5.90%。11 种奶茶嘌呤含量为 6.66~30.46 mg/100 g, 11 种咖啡嘌呤含量为 5.28~26.11 mg/100 g。**结论**　该方法具有良好的精密度和准确度, 可用于固体饮料中 4 种嘌呤的同时检测, 为高尿酸血症及痛风人群的膳食选择提供科学依据。

关键词: 高效液相色谱法; 固体饮料; 嘌呤
中图分类号: TS278; O657.72　　**文献识别码:** A　　**文章编号:** 2095–0381(2026)13–0218–09

Determination of 4 kinds of purine content in solid beverages by high performance liquid chromatography

FENG Xiao-Yan[1], ZHONG Guo-Yu[2], XUE Li-Ying[1], CHEN Hua-Qing[1], LI Li[1], WANG Qin-Fu[1*], CHEN Feng-Qing[1*]
(1. *Department of Basic Medicine*, *Hainan Vocational University of Science and Technology*, *Haikou* 571137, *China*; 2. *Ward 2*, *Department of Hepatobiliary & Pancreatic Surgery*, *Hainan General Hospital*, *Haikou* 570311, *China*)

ABSTRACT: Objective　To establish a method for determining the purine content in prepackaged solid beverages by high performance liquid chromatography and to apply it to the analysis of commercially available ones. **Methods** The 4 kinds of purines were extracted from solid beverages using acid hydrolysis. Chromatographic columns were screened based on resolution and peak shape. Detection conditions, including mobile phase pH, flow rate and column

收稿日期: 2026-03-14
基金项目: 海南科技职业大学校级科研一般项目(HKKY2024-83); 海南科技职业大学校级科研团队项目(HKKY2024-TD-16)
第一作者: 冯小燕(1996—), 女, 硕士, 助教, 主要研究方向为慢病与代谢性疾病防治技术。E-mail: 18976943692@163.com
***通信作者:** 王钦富(1963—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为免疫与炎症。E-mail: qinfuwang@126.com
陈凤清(1962—), 女, 博士, 教授, 主要研究方向为中草药天然产物开发与研究。E-mail: 443891659@qqcom

temperature, were optimized, and method validation was performed. **Results**　Using a Sunniest C_{18} column, a mobile phase of 10 mmol/L ammonium formate solution at pH 3.68 methanol (99:1, *V*:*V*), a flow rate of 1.0 mL/min, a column temperature of 30 ℃, an injection volume of 10 μL, and a detection wavelength of 254 nm, the 4 kinds of purines were completely separated with good peak shapes. Guanine, adenine and hypoxanthine exhibited good linearity in the range of 1–40 mg/L (r^2≥0.9990), while xanthine showed good linearity in the range of 0.1–4.0 mg/L (r^2=0.9998); the limits of detection were 0.01–0.14 mg/L, and the limits of quantitation were 0.04–0.46 mg/L; spiked recovery rates were 88.00%–113.00%, with relative standard deviations were 0.05%–5.90%. The purine content in the 11 kinds of milk tea samples ranged from 6.66 mg/100 g to 30.46 mg/100 g, and in the 11 kinds of coffee samples, it ranged from 5.28 mg/100 g to 26.11 mg/100 g. **Conclusion**　This method exhibits good precision and accuracy and can be used for the simultaneous determination of 4 kinds of purines in solid beverages, providing a scientific basis for dietary choices among individuals with hyperuricemia and gout.

KEY WORDS: high performance liquid chromatography; solid beverage; purine

0　引　言

嘌呤是一种天然物质, 存在于人体所有细胞及几乎所有食物中。在人体内, 嘌呤代谢为尿酸[1], 尿酸作为一种抗氧化剂, 有助于防止活性氧。然而当尿酸的生成与排泄平衡被打破, 即生成过多或排出过少时, 便会诱发高尿酸血症(hyperuricemia, HUA)。HUA 被认为是痛风的“必要但不足”风险因素, 其表现为饮食中作为尿酸或内源性尿酸合成的基石的尿素摄入与其通过肾脏或胃肠道排出之间的失衡。HUA 的定义为血清浓度超过溶解阈值(>6.8 mg/dL 或 400 μmol/L), 可能由环境暴露引起, 尤其是与嘌呤摄入增加相关的因素(如饮食、酒精)或导致尿酸排泄减少的因素(如铅中毒、药物)[2]。

近年来, 随着全球居民饮食结构的改变及经济快速发展, HUA 和痛风的患病率稳步上升并呈年轻化趋势。中国 36~55 岁 HUA 检出率为 17.48%, 18~35 岁检出率为 30.40%[3]。澳大利亚人群中 HUA 的患病率在 10.5%~16.6%之间[4]。全球范围内, 痛风的患病率为 1%~4%, 发病率为 0.1%~0.3%。痛风在男性中比女性更常见, 比例在 3:1 至 10:1 之间[5]。国家健康与营养调查(2007—2016)显示, 约有 920 万美国人患有痛风[6]。因此, HUA 和痛风已成为重大的全球公共卫生问题。

黄琴等[7]研究发现, 人群每日含糖饮料摄入量与 HUA 发生风险间呈非线性关系, 每日摄入 250、500、1000 mL 含糖饮料的人群, 发生 HUA 风险增加值分别为 38%、52%、57%。相关研究显示, 饮用咖啡可能通过增加胰岛素浓度和降低胰岛素抵抗来降低 HUA 风险[8]。食用菌嘌呤含量较低, 不会引起 HUA, 相反可能对于预防 HUA 有益的作用[9–10]。相关研究表明, 谷物和豆类、植物和水果中的纤维摄入量增加, 成人血清尿酸水平降低, 谷物纤维摄入量与 HUA 呈显著负相关[11]。膳食纤维加速了葡萄糖依赖性胰岛素促泌多肽的产生, 并通过肠道菌群发酵产生短链脂肪酸, 从而减弱胰岛素反应, 增加胰岛素敏感性[12], 从而最终降低血清尿酸水平。因此, 低嘌呤饮食是预防和治疗 HUA 和痛风的关键, 甚至有研究数据表明, 零嘌呤饮食可以将血清尿酸浓度显著降低 13%~21%[13]。

面对固体饮料日益扩大的消费市场, 其嘌呤含量研究却明显滞后: 不仅基础数据缺乏, 相关的检测方法也亟待建立。毛细管电泳法用于检测中草药抑制剂的筛选, 进样精度低, 4 种嘌呤分离不彻底[14]。气相色谱法具有分析速度快的优势, 但嘌呤化合物挥发性较差, 应用受限[15]; 质谱法适用于定性鉴定, 定量测定优势不明显[16]。高效液相色谱法(high performance liquid chromatography, HPLC)分离效果好、精密度高、重复性稳定, 因此, 常被应用于嘌呤含量检测[17–19]。

因此, 本研究旨在建立适用于固体饮料的嘌呤提取 HPLC 检测方法, 对市售固体奶茶和咖啡的嘌呤含量进行检测, 以期完善食品嘌呤含量表, 为消费者尤其是 HUA 及痛风患者提供科学指导。

1　材料与方法

1.1　仪器与设备

福立 LC-5090Plus 高效液相色谱仪(自带自动进样器和紫外检测器, 浙江福立分析仪器有限公司); MIX-25 漩涡混匀仪(杭州米欧仪器有限公司); 雷磁 PHS-3cPH 计(pH 精度 0.01, 上海仪电科学仪器股份有限公司); KQ 5200 DE 超声震荡清洗器(昆山舒美超声仪器有限公司); SY-20 电热恒温水浴箱(绍兴苏珀仪器有限公司); 赛多利斯 BSA124S 电子天平(精度 0.001 g, 赛多利斯科学仪器北京有限公司); 福立 Sunniest C_{18} 色谱柱(250 nm×4.6 nm, 5 μm, 浙江福立分析仪器有限公司); 0.22 μm 滤膜(潍坊聚凯电子科技有限公司)。

1.2　材料与试剂

鸟嘌呤、腺嘌呤、次黄嘌呤、黄嘌呤标准品(色谱级, 纯

度≥98%)、甲酸铵(分析纯, 纯度≥99%)(上海源叶生物科技有限公司); 甲醇(色谱级, 纯度≥98%, 美国霍尼韦尔公司); 甲酸(分析纯, 纯度 88%)、氢氧化钠(分析纯, 纯度 97%)(上海易恩化学技术有限公司); 高氯酸标准溶液(浓度 0.1026 mol/L, 四川普西奥标准物质有限公司)。

1.3 样品采集

于本地大型超市及电商平台采集市售预包装固体饮料样品共 22 种, 其中奶茶 11 种(桂馥兰香奶茶、优乐美金桂乌龙奶茶、草莓味奶茶、原味奶茶、阿萨姆奶茶、麦香味奶茶、杨枝甘露奶茶等), 咖啡 11 种(雀巢 1+2 原味咖啡、南国咖啡、越南贡明咖啡、蜜雪冰城茉莉拿铁咖啡、GENLEN 蓝山风味咖啡、GENLEN 生椰拿铁、GENLEN 丝滑拿铁、黑山咖啡等)。样品密封保存于干燥阴凉处。

1.4 嘌呤标准品准备

嘌呤标准储备溶液(1000 mg/L): 分别准确称取 100 mg 鸟嘌呤、次黄嘌呤、腺嘌呤、黄嘌呤标准品置于 50 mL 烧杯中, 加入 10 mL 氢氧化钠溶液(0.1 mol/L)助溶、混匀, 转移至 100 mL 容量瓶, 蒸馏水定容至刻度, 即配制成 1000 mg/L 标准溶液。于 4 ℃保存, 保存期为 3 个月。

1.5 样品前处理

参照 Feng 等[20]样品嘌呤提取方法: 准确称取试样 0.2~0.4 g(精确至 0.001 g, 具体根据食物中嘌呤含量进行合理调整), 置于 10 mL 玻璃试管中, 加入 2 mL 10%高氯酸溶液混匀, 100 ℃中水浴 60 min, 迅速冰浴冷却, 取出冷却后加 10 mol/L 氢氧化钠溶液将 pH 调整至 7.0 后, 再用 5%甲酸调节 pH 至 3.68, 10 mmol/L 甲酸铵溶液(pH 为 3.68)定容 10 mL, 经滤纸过滤掉大部分沉淀后, 取上清液过 0.22 μm 的滤膜, 滤液待测。同时做空白试验。

1.6 色谱条件优化

1.6.1 甲酸铵的 pH

以 10 mmol/L 甲酸铵-甲醇(99:1, *V*:*V*)为固定条件, 甲酸铵分别设置 pH 为 3.20、3.46、3.68 和 3.80, 进样量 10 μL, 柱温为 30 ℃, 流速为 1.0 mL/min, 检测波长为 254 nm, 考察流动相在不同 pH 条件下对嘌呤色谱峰的分离影响程度。

1.6.2 流 速

以 pH 为 3.68 的 10 mmol/L 甲酸铵-甲醇(99:1, *V*:*V*)为流动相, 分别设置流速 0.6、0.8、1.0、1.2 mL/min 4 个组, 进样量 10 μL, 柱温为 30 ℃, 检测波长为 254 nm, 观察不同流速对 4 种嘌呤化合物的分离情况。

1.6.3 柱 温

以 pH 为 3.68 的 10 mmol/L 甲酸铵-甲醇(99:1, *V*:*V*)为流动相, 分别选择 25、30、35、40 ℃ 4 个温度, 进样量 10 μL, 流速为 1.0 mL/min, 检测波长为 254 nm, 对 4 种嘌呤化合物进行分离, 确定最适温度。

1.7 方法学验证

1.7.1 色谱条件分析

经优化后的色谱条件为: 使用福立 Sunniest C_{18} 色谱柱(250 mm×4.6 mm, 5 μm), 流动相为 10 mmol/L 甲酸铵(pH 为 3.68)和甲醇, 比例为(99:1, *V*:*V*), 流速 1.0 mL/min; 柱温 30 ℃, 检测波长 254 nm, 进样量 10 μL。

1.7.2 线性关系

精密吸取混合标准工作液, 按 1.7.1 色谱条件测定, 以质量浓度(*X*, mg/L)为横坐标, 峰面积(*Y*)为纵坐标绘制标准曲线。

1.7.3 精密度试验

取混合标准溶液(鸟嘌呤、腺嘌呤、次黄嘌呤各 10 mg/L, 黄嘌呤 1 mg/L), 连续进样 6 次进行精密度测试。

1.7.4 加标回收试验

本研究根据奶茶中 4 种嘌呤的浓度, 分别制备了高浓度(2:1)、中浓度(1:1)和低浓度(0.5:1)的加标样品。所有的加标样品均采用优化后样品预处理方法进行处理, 以评估各浓度的加标回收率和相对标准偏差(relative standard deviation, RSDs)。

1.7.5 样品测定

按公式(1)计算样品中各嘌呤组分的含量, 4 种嘌呤含量之和即为总嘌呤含量。

$$x=\frac{(C-C_0)\times V}{m\times 10} \tag{1}$$

式中: x 为试样中各嘌呤组分的含量, mg/100 g; C 为试样液中各嘌呤组分的质量浓度, mg/L; C_0 为空白对照, mg/L; V 为样品定容体积, mL; m 为试样称取量, g; 10 为单位转换系数。

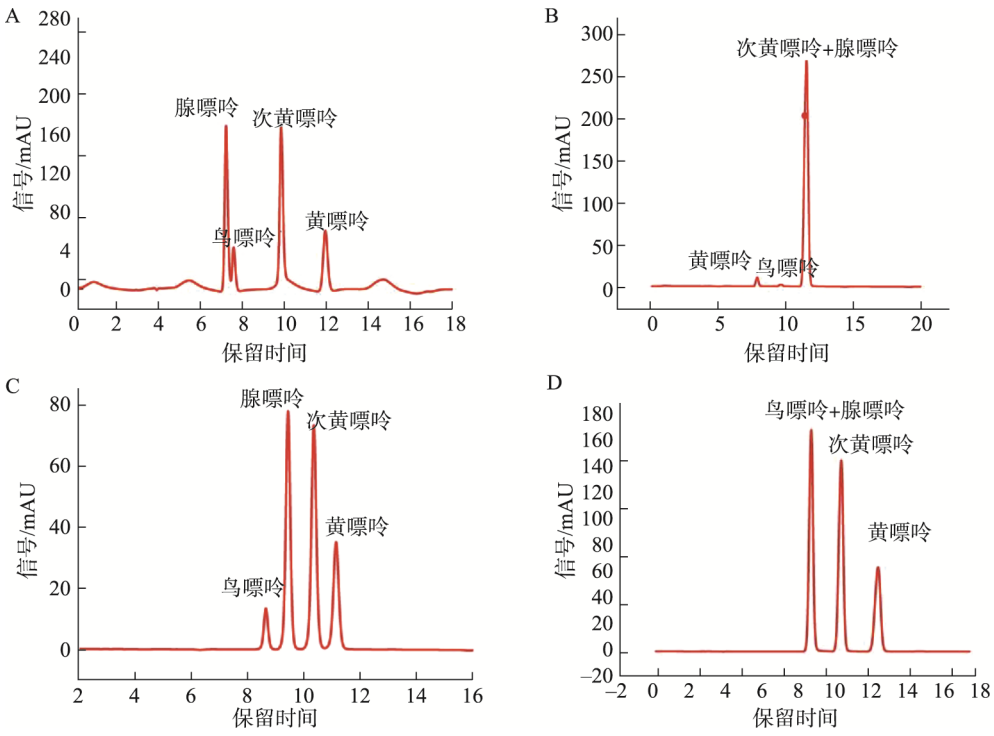
1.8 数据处理

采用 SPSS 22.0 软件进行统计学分析, 每个样本取 3 个平行样。多组间比较时, 若数据不符合正态分布或方差不齐, 则使用 Kruskal-Wallis H 检验; 若满足方差齐性, 则使用单因素方差分析。以 $P<0.05$ 为差异有统计学意义。

2 结果与分析

2.1 甲酸铵的最适 pH 确定

流动相中盐溶液的 pH 对 4 种嘌呤的分离效果具有显著影响[20], pH 的选择不仅要保证嘌呤活性不受影响, 还要保证 4 种嘌呤的完全分离。不同 pH 甲酸铵流动相对 4 种嘌呤的分离效果如图 1 所示。从图 1 中可以看出, 甲酸铵 pH 为 3.20 时(图 1A), 腺嘌呤和鸟嘌呤出现重合,不能完全分开;当 pH 增加到 3.46, 次黄嘌呤和腺嘌呤, 不能完全分开(图 1B); 当 pH 增加到 3.68 时 4 种嘌呤可以完全分离开, 且峰形尖锐、完整, 出峰效果好(图 1C)。当 pH 为 3.80 时, 腺嘌呤和鸟嘌呤出现重合, 不能完全分开(图 1D)。综上, 选择 pH 为 3.68 的甲酸铵溶液进行后续实验。



注：A. pH=3.20; B. pH=3.46; C. pH=3.68; D. pH=3.80。

图 1　甲酸铵溶液 pH 对 4 种嘌呤的分离效果的影响

Fig.1　Effects of pH of ammonium formate mobile phase on separation of 4 kinds of purines

2.2　最佳流速的确定

在上述条件下，分别考察不同流速(0.6、0.8、1.0、1.2 mL/min)对嘌呤组分的分离效果，如图 2 所示。当流速为 0.6 mL/min 时，各组分的保留时间均增大，但此时各组分的色谱峰逐渐变宽，柱效降低，导致结果准确度降低(图 2A)，这与程庆红[21]研究一致。当流速达到 0.8 mL/min 时，鸟嘌呤和腺嘌呤的分离能力也随之减弱，峰间隔时间仅有 0.721 min(图 2B)。随着流速增加到 1.2 mL/min，减少了样品在柱中的停留时间，导致样品与固定相的接触减少，使得 4 种嘌呤组分的峰变窄同时保留时间均有所缩短，且峰面积逐渐变小，使检测准确度降低(图 2D)。此外，有研究指出长时间高流速会使柱压升高，损坏色谱柱，缩短其使用寿命[22]，因此选择流速 1.0 mL/min 可有效提高检测准确度，更好地保护色谱柱，进行后续实验。

2.3　最佳柱温的确定

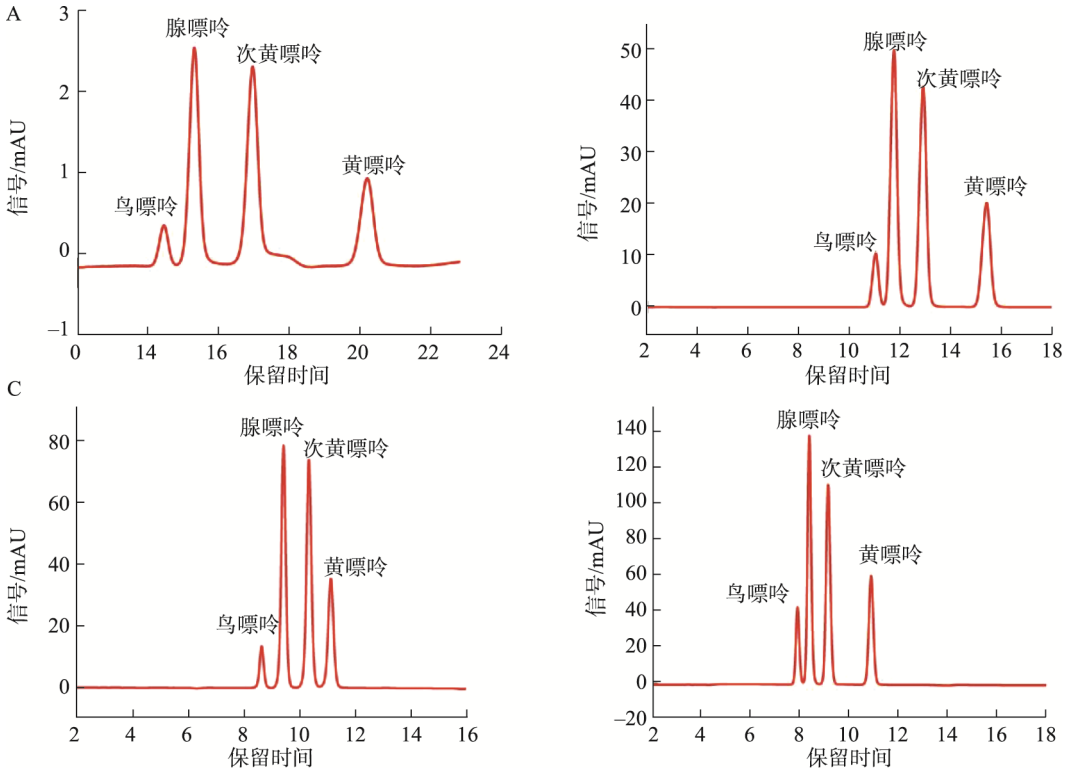
柱温对检测结果产生一定影响，腺嘌呤和黄嘌呤受温度影响较大，温度过高会分解[18]，如图 3 所示。因此，本研究比较不同柱温(25、30、35、40 ℃)对嘌呤检测效果的影响。当温度达到 40 ℃时，嘌呤不出峰，这可能与当柱温达到 40℃时，在流动相 pH 为 3.68 偏酸性条件下，高温可能会加速嘌呤类物质的水解或氧化分解有关[18]，因此在极低色谱峰信号下，紫外检测器检测不出相应的目标峰(图 3D)。温度 35 ℃时，嘌呤出峰的保留时间缩短，同时腺嘌呤和次黄嘌呤未完全分离(图 3C)。当温度为 25 ℃时，4 种嘌呤均出峰，峰形完整，但分离度良好，但鸟嘌呤与腺嘌呤出现部分重叠(图 3A)。鉴于保留时间、分离能力和实验环境，本研究选用 30 ℃作为最佳柱温。

2.4　线性关系、检出限和定量限

鸟嘌呤、腺嘌呤、次黄嘌呤质量浓度与峰面积在 1.00~40.00 mg/L 范围内显示出良好的线性关系，而黄嘌呤在 0.10~4.00 mg/L 范围内也表现出良好的线性关系(表 1)。回归方程可分别表示为：鸟嘌呤：Y=4465.3X+1756.7 (r^2=0.9990)、腺嘌呤: Y=24526X–7802 (r^2=0.9995)、次黄嘌呤：Y=24004X–9666.7 (r^2=0.9994)、黄嘌呤：Y=17317X+1523.2 (r^2=0.9998)。检出限和定量限分别为 0.01~0.14 mg/L 和 0.04~0.46 mg/L。线性范围和检出限优于先前研究[20]，因此，建立的 HPLC 具有较宽的线性范围和低检出限优势。

2.5　方法重复性

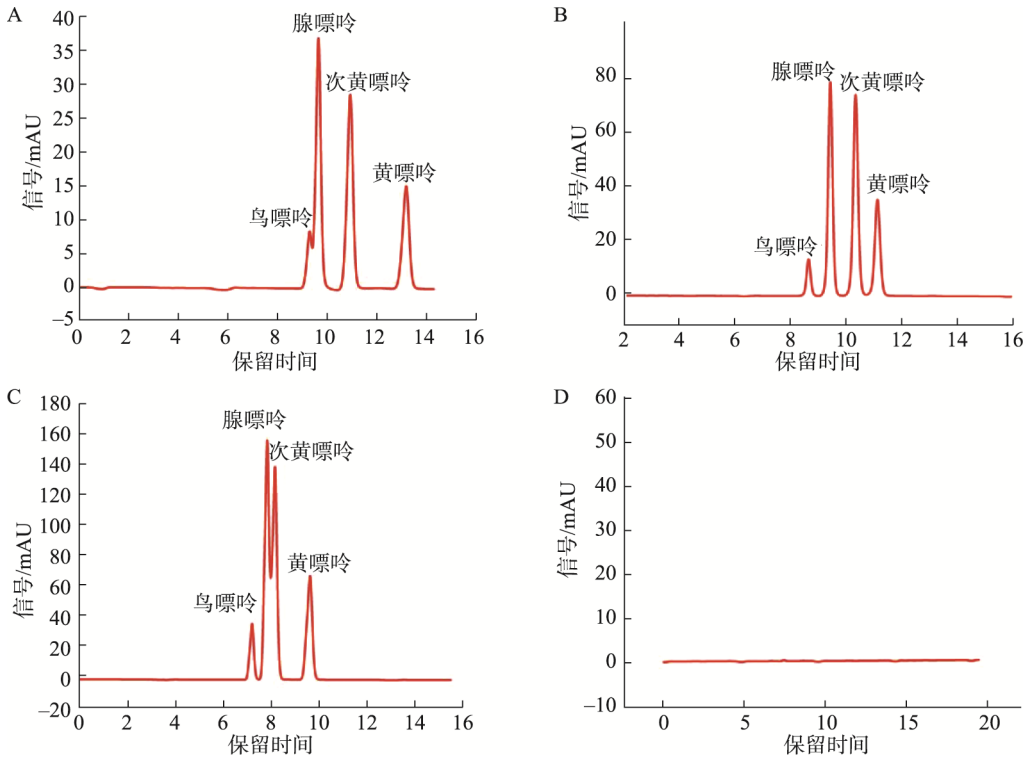
将嘌呤混合标准溶液，分 6 次进样，根据检测结果计算 RSDs，测定方法精密度。如表 2 所示，RSDs 在 1.45%~1.91%之间，表明该方法的精密度良好，符合食品理化检测要求。



注: A. 0.6 mL/min; B. 0.8 mL/min; C. 1.0 mL/min; D. 1.2 mL/min。

图 2 不同流速对 4 种嘌呤的分离效果的影响

Fig.2 Effects of different flow rates on the separation of 4 kinds of purines



注: A. 25 ℃; B. 30 ℃; C. 35 ℃; D. 40 ℃。

图 3 不同柱温对 4 种嘌呤的分离效果的影响

Fig.3 Effects of different column temperatures on the separation of 4 kinds of purines

表 1　嘌呤线性范围
Table 1　Linear range of purines

嘌呤种类	线性方程	线性范围/(mg/L)	决定系数(r^2)	检出限/(mg/L)	定量限/(mg/L)
鸟嘌呤	Y=4465.3X+1756.7	1.00~40.00	0.9990	0.14	0.46
腺嘌呤	Y=24526X–7802	1.00~40.00	0.9995	0.07	0.24
次黄嘌呤	Y=24004X–9666.7	1.00~40.00	0.9994	0.10	0.34
黄嘌呤	Y=17317X+1523.2	0.10~4.00	0.9998	0.01	0.04

表 2　HPLC 方法重复性检测(n=6)
Table 2　Repeatability test of the HPLC method (n=6)

嘌呤种类	平均值/(mg/L)	RSDs/%
鸟嘌呤	11.93	1.53
腺嘌呤	9.46	1.91
次黄嘌呤	9.23	1.72
黄嘌呤	0.76	1.45

2.6　方法准确性

本研究显示，4 种嘌呤的加标回收率为 88.00%~113.00%, RSDs≤5.90%(表 3)。表明该方法的回收率与 RSDs 优于先前的研究[9]。

2.7　实际样品测定

2.7.1　奶茶样品嘌呤含量

11 种奶茶样品的总嘌呤含量测定结果如表 4 所示。11 种奶茶嘌呤含量为 6.66~30.46 mg/100 g。雨小姐桂馥兰香奶茶嘌呤含量最高, 为 30.64 mg/100 g; 其次为优乐美金桂乌龙奶茶(23.39 mg/100 g)和亿巴度草莓味奶茶(20.49 mg/100 g), 琦悦杨枝甘露奶茶嘌呤含量最低, 为 6.66 mg/100 g。经单因素方差分析, 不同奶茶样品间嘌呤含量差异具有统计学意义(F=12.27, P<0.05)。F 表示组间变异(不同奶茶之间的真实差异)与组内变异(同一奶茶多次测量的随机误差)的比值, 该比值越大, 说明奶茶种类对嘌呤含量的影响越显著。因此, 不同奶茶间的嘌呤含量存在显著差异, 其中桂馥兰香奶茶含量最高(30.64 mg/100 g), 琦悦杨枝甘露奶茶含量最低(6.66 mg/100 g), 消费者尤其是高尿酸人群应优先选择嘌呤含量较低的奶茶产品。

2.7.2　咖啡样品嘌呤含量

11 种咖啡样品的总嘌呤含量测定结果如表 5 所示。11 种咖啡嘌呤含量为 5.28~26.11 mg/100 g。雀巢 1+2 原味咖啡嘌呤含量最高, 为 26.11 mg/100 g; 其次为南国咖啡(21.44 mg/100 g)和越南贡明咖啡(20.60 mg/100 g); GENLEN 蓝山风味咖啡(17.62 mg/100 g)和蜜雪冰城茉莉拿铁咖啡(17.18 mg/100 g); 春光椰奶咖啡嘌呤含量最低, 为 5.28 mg/100 g。经单因素方差分析, 不同咖啡样品间嘌呤含量差异具有统计学意义(F=4.48, P<0.05)。F 表示组间变异(不同咖啡之间的真实差异)与组内变异(同一咖啡多次测量的随机误差)的比值, 该比值越大, 说明咖啡种类对嘌呤含量的影响越显著。因此, 不同咖啡样品间嘌呤含量存在显著的差异性, 其中雀巢 1+2 原味咖啡嘌呤含量最高, 为 26.11 mg/100 g, 春光椰奶咖啡嘌呤含量最低, 为 5.28 mg/100 g。消费者尤其是高尿酸人群应优先选择嘌呤含量较低的咖啡产品。

表 3　加标回收率(n=3)
Table 3　Spike recovery rates (n=3)

嘌呤	样品测定值/(mg/100 g)	加标量/(mg/100 g)	检出量/(mg/100 g)	平均回收率/%	RSDs/%
鸟嘌呤	19.65	10.00	30.95	113.00	0.40
		20.00	41.30	108.00	0.50
		40.00	60.00	101.00	0.05
腺嘌呤	3.65	2.00	5.45	90.00	0.53
		4.00	7.30	91.00	0.40
		8.00	10.63	88.00	0.33
次黄嘌呤	4.30	2.00	6.15	93.00	1.23
		4.00	8.65	109.00	1.70
		8.00	11.90	95.00	0.30
黄嘌呤	0.88	0.50	1.35	94.00	2.10
		1.00	1.95	107.00	5.90
		2.00	2.95	104.00	1.20

表 4 市售 11 种奶茶中嘌呤含量(mg/100 g)

Table 4 Purine content in 11 kinds of commercially available milk teas (mg/100 g)

产品	鸟嘌呤	腺嘌呤	次黄嘌呤	黄嘌呤	嘌呤总量
雨小姐桂馥兰香奶茶	14.68±0.81	6.54±1.91	6.75±1.73	2.67±1.26	30.64±3.82
优乐美金桂乌龙奶茶	19.56±0.25	1.76±0.06	1.50±0.08	0.64±0.08	23.39±0.47
亿巴度草莓奶茶	7.59±0.34	5.32±1.74	5.29±1.26	2.30±1.34	20.49±3.59
亿巴度阿萨姆奶茶	11.26±3.04	3.22±0.43	3.82±1.22	1.47±0.21	19.77±4.90
亿巴度原味奶茶	11.07±3.77	2.96±0.72	3.18±0.75	0.91±0.04	18.12±2.33
亿巴度麦香味奶茶	8.19±1.47	2.86±0.92	3.17±0.81	0.22±0.10	14.45±2.21
优乐美茉莉雪芽奶茶	6.97±0.49	1.70±0.11	1.71±0.03	0.14±0.09	10.51±0.53
优乐美港式奶茶	3.70±0.97	1.89±0.44	2.61±0.26	0.36±0.01	8.54±0.26
优乐美香草奶茶	4.30±0.64	1.93±0.05	2.05±0.23	0.00	8.28±0.45
优乐美香芋奶茶	0.82±0.05	2.57±0.65	3.69±1.72	0.70±0.12	7.77±0.74
琦悦杨枝甘露奶茶	0.77±0.15	2.19±0.25	2.93±0.40	0.77±0.29	6.66±0.29

表 5 市售 11 种咖啡嘌呤含量(mg/100 g)

Table 5 Purine content in 11 kinds of commercially available coffees (mg/100 g)

产品	鸟嘌呤	腺嘌呤	次黄嘌呤	黄嘌呤	嘌呤总量
雀巢 1+2 原味咖啡	17.43±0.43	2.80±0.19	4.17±0.76	1.74±0.19	26.11±0.57
南国生椰拿铁	9.91±0.24	2.81±0.06	3.44±0.62	5.29±0.51	21.44±2.14
越南贡明咖啡	10.77±2.21	4.07±0.23	4.44±1.10	1.33±0.66	20.60±0.42
GENLEN 蓝山风味咖啡	9.01±0.54	2.63±0.68	4.62±0.21	1.38±0.09	17.62±2.77
蜜雪冰城茉莉拿铁咖啡	6.68±0.16	5.22±0.57	4.93±0.56	0.35±0.09	17.18±0.07
GENLEN 丝滑拿铁	5.56±1.21	3.88±0.96	5.02±1.22	1.71±0.59	16.15±2.50
GENLEN 生椰拿铁	6.01±0.54	3.94±0.70	1.93±0.70	0.28±0.09	12.14±1.54
蜜雪冰城焦糖坚果咖啡	6.44±0.89	1.83±0.13	2.04±0.27	1.28±0.25	11.59±3.05
南国黑山咖啡	3.71±0.94	2.78±0.21	3.15±0.41	0.31±0.08	9.93±0.65
蜜雪冰城经典拿铁咖啡	2.78±0.16	3.36±0.81	1.79±0.25	1.40±0.11	9.51±1.01
春光椰奶咖啡	1.41±0.13	2.17±0.37	1.70±0.07	0.01±0.00	5.28±0.15

2.7.3 奶茶与咖啡嘌呤含量对比

奶茶样品的平均嘌呤含量为 16.62 mg/100 g, 咖啡样品的平均嘌呤含量为 15.27 mg/100 g, 两者差异无统计学意义(t=0.62, P>0.05)。两类固体饮料的嘌呤含量均低于 30 mg/100 g, 远低于动物内脏、浓肉汤等高嘌呤食物(通常>150 mg/100 g)[23]。此外, 不同食物中嘌呤的组成比例存在差异, 对血尿酸水平的影响也不同。Kang 等[24]将食物分为以腺嘌呤和鸟嘌呤为主和以次黄嘌呤为主两类。次黄嘌呤比其他嘌呤更易代谢为尿酸[25], 因此含次黄嘌呤较高的食物可能对血尿酸水平影响更大。本研究结果显示大部分奶茶和咖啡的嘌呤含量以鸟嘌呤和腺嘌呤为主, 例如奶茶样品中优乐美金桂乌龙奶茶、咖啡样品中的 GENLEN 生椰拿铁等样品, 鸟嘌呤和腺嘌呤占比显著高于其他嘌呤, 见表 4 和表 5。因此, 对于绝大部分健康人群而言, 饮用奶茶和咖啡几乎不会引起 HUA 或痛风。

3 讨论与结论

3.1 方法优化与前期研究的递进关系

本研究是本团队前期食品嘌呤检测体系的延续、优化与专项深化。前期已建立的 80 ℃超声辅助酸水解方法[20]主要面向 56 种多品类预包装食品的高通量快速筛查, 涵盖肉制品、薯片、调味品、米面制品、糖果及多种固体饮料, 具备快速、简便、通用性强等特点, 可满足大范围食品嘌呤含量普查需求[20]。但该方法为兼顾各类基质适用性, 采用了相对温和的提取条件, 更适用于低蛋白、低核酸、以游离嘌呤为主的食品类型。

本研究进一步聚焦奶茶、咖啡等高蛋白、高结合态嘌呤含量的固体饮料, 此类基质中嘌呤多与蛋白质、核酸结合, 水解难度更高。因此, 本研究在团队前期方法基础上进行专一基质的精准化升级, 采用 100 ℃沸水浴酸水解

60 min, 通过高温强酸使结合态嘌呤完全释放, 同时避免超声空化效应带来的嘌呤降解与回收率波动。

3.2　前处理方法选择的科学性与优势

与本团队前期建立的 80 ℃超声水解法相比[20], 本研究采用的 100 ℃水浴酸水解更适配奶茶、咖啡等固体饮料基质, 具备明显科学性与必要性: (1)水解更彻底。100 ℃高温与强酸条件可有效断裂核酸磷酸二酯键及蛋白-嘌呤结合键, 使结合态嘌呤充分转化为游离嘌呤, 保证定量结果更接近真值[26]。(2)结果更稳定。恒温水浴体系温度均一、受热一致, 平行样间误差更小, 精密度与重复性更优, 符合食品理化检测质控要求[27]。(3)嘌呤更稳定。水浴加热无超声空化效应, 可避免次黄嘌呤、黄嘌呤等易降解组分被破坏, 提高回收率与结果可靠性。(4)方法更规范。该条件与国内食品嘌呤检测常用标准体系一致, 数据更具可比性、溯源性与权威性, 更适合用于精准定量与膳食指导。

与此同时, 本研究系统考察了流动相 pH、流速、柱温对分离效果的影响, 确定了最佳色谱条件, 使 4 种嘌呤达到基线分离。本研究方法线性范围宽(鸟嘌呤、腺嘌呤、次黄嘌呤 1.00~40.00 mg/L, 黄嘌呤 0.10~4.00 mg/L), 检出限低(0.01~0.14 mg/L), 能够满足不同嘌呤含量固体饮料的精准检测需求。

本研究流动相 pH 为 3.68, 与本团队前期研究采用的 pH 3.385 存在差异[20], 这一区别主要由色谱柱不同引起。前期研究使用 Agilent 5 TC-C_{18} 色谱柱, 而本研究使用 Sunniest C_{18} 色谱柱, 两种色谱柱在固定相结构、键合密度、耐酸性及硅醇基活性方面存在差异, 进而改变了嘌呤组分的保留行为、解离状态与分离趋势。因此, 本研究结合所用色谱柱的特性, 对流动相 pH 进行重新优化, 最终确定 pH 3.68 可使 4 种嘌呤实现基线分离、峰形对称、响应稳定, 说明色谱柱类型是影响嘌呤分离条件的关键因素, 针对不同色谱柱开展系统优化更能保证方法的可靠性[9]。

3.3　奶茶与咖啡嘌呤分布及膳食指导意义

本研究对 11 种奶茶、11 种咖啡的嘌呤含量进行系统测定, 结果显示两类饮品嘌呤含量整体偏低, 均属于低嘌呤食品, 从外源性嘌呤摄入角度, 不会明显增加 HUA 及痛风人群的代谢负担[28]。

但从整体尿酸代谢影响来看, 二者存在显著差异。奶茶类产品普遍添加果葡糖浆、白砂糖等成分, 大量摄入果糖会加速体内三磷酸腺苷(adenosine triphosphate, ATP)降解、促进嘌呤从头合成, 并减少肾脏尿酸排泄, 从而升高血尿酸水平[29]。因此, 即便奶茶本身嘌呤含量不高, 长期大量饮用仍会增加 HUA 风险。

咖啡中富含绿原酸、咖啡碱、多酚类活性物质, 多项研究证实咖啡可抑制黄嘌呤氧化酶活性、改善胰岛素敏感性并促进尿酸排泄, 长期适量饮用与较低的 HUA 风险呈负相关[30–32]。因此, 从代谢安全性角度, 咖啡更适合高尿酸血症及痛风人群饮用[33]。

3.4　结　论

本研究建立了适用于固体饮料中 4 种嘌呤同时检测的高效液相色谱-紫外检测法, 方法学验证结果表明该方法灵敏度高、准确度好、重复性强。对 11 种奶茶和 11 种咖啡的检测发现, 均属低嘌呤食品。因此, 本研究不仅为固体饮料中嘌呤检测提供了可靠依据, 也为 HUA 及痛风人群的膳食选择选择提供了参考。

参考文献

[1] Shi Yi, Wang Ting, Zhou X E, et al. Structure-based design of a hyperthermostable AgUricase for hyperuricemia and gout therapy [J]. Acta Pharmacologica Sinica, 2019, 40(10): 1364–1372.

[2] Helget L N, Msikuls T R. Environmental triggers of hyperuricemia and gout [J]. Rheumatic Diseases Clinics of North America, 2022, 48(4): 891–906.

[3] 郭金杰, 李兆龙, 于海啸. 某地区高尿酸血症患者分布特点及危险因素分析[J]. 实用检验医师杂志, 2025, 17(1): 60–62.
Guo Jinjie, Li Zhaolong, Yu Haixiao. Analysis of distribution characteristics and risk factors of hyperuricemia patients in a certain region [J]. Journal of Practical Laboratory Physicians, 2025, 17(1): 60–62.

[4] Pathmanathan K, Robinson P C, Hill C L, et al. The prevalence of gout and hyperuricaemia in Australia: an updated systematic review [J]. Semin Arthritis Rheum, 2021, 51(1): 121–128.

[5] Singh J A, Gaffo A. Gout epidemiology and comorbidities [J]. Semin Arthritis Rheum, 2020, 50(3S): S11–S16.

[6] CHEN XM, YOKOSE C, RAI SK, et al. Contemporary prevalence of gout and hyperuricemia in the United States and decadal trends: the national health and nutrition examination survey, 2007—2016 [J]. Arthritis Rheumatol, 2019, 71(6): 991–999.

[7] 黄琴, 吴少霞, 黄芳, 等. 膳食含糖饮料摄入与高尿酸血症风险相关性的 meta 分析[J]. 实用预防医学, 2022, 29(7): 787–791.
Huang Qin, WU Shaoxia, Huang Fang, et al. Sugar-sweetened beverages intake and the risk of hyperuricemia: a meta-analysis [J]. Practical Preventive Medicine. 2022, 29(7): 787–791.

[8] Choi H K, Curhan G. Coffee, tea, and caffeine consumption and serum uric acid level: the third national health and nutrition examination survey [J]. Arthritis Rheum, 2007, 56(6): 2049–2055.

[9] 刘红霞, 范秀芝, 殷朝敏, 等. 高效液相色谱法同时检测食用菌中的 4 种嘌呤[J]. 食品安全质量检测学报, 2025, 16(2): 178–186.
Liu Hongxia, Fan Xiuzhi, Yin Chaomin, et al. Simultaneous determination of four purines in edible fungi by high-performance liquid chromatography [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2025, 16(2): 178–186.

[10] Chen Ying, Li Hong yan, Cai Yun fei, et al. Anti-hyperuricemia bioactive peptides: a review on obtaining, activity, and mechanism of action [J]. Food Function, 2024, 15(11): 5714–5736.

[11] Zhu Qianrang, Yu Lianlong, Li Yuqian, et al. Association between dietary fiber intake and hyperuricemia among Chinese adults: analysis of the China adult chronic disease and nutrition surveillance [J]. Nutrients, 2022, 14(7): 1433.

[12] Lattimer J M, Haub M D. Effects of dietary fiber and its components on metabolic health [J]. Nutrients, 2010, 2(12): 1266–1289.

[13] Han Shangting, Xu Meihua. Research progress on the relationship between dietary nutrients and hyperuricemia [J]. Modern Preventive Medicine, 2019, 46(22): 4070–4072, 4088.

[14] Qi Yanfei, Li Youxin, Bao J J. Development of a capillary electrophoresis method for analyzing adenosine deaminase and purine nucleoside phosphorylase and its application in inhibitor screening [J]. Analytical Biochemistry, 2016(506): 31–44.

[15] Chen H J, Zhang L, Cox J, et al. DNA adducts of 2, 3-epoxy-4-hydroxynonanal: detection of 7-(1',2'-dihydroxyheptyl) - 3H-imidazo[2,1-i] purine and 1, N6-ethenoadenine by gas chromatography/negative ion chemical ionization/mass spectrometry [J]. Chemical Research in Toxicology, 1998, 11(12): 1474–1480.

[16] Svitounov D, Solbu M D, Jenssen T G, et al. Development of quantitative assay for simultaneous measurement of purine metabolites and creatinine in biobanked urine by liquid chromatography-tandem mass spectrometry [J]. Scandinavian Journal of Clinical and Laboratory Investigation, 2022, 82(1): 37–49.

[17] Takayanagi F, Fukunchi T, Yamaoka N, et al. Measurement of the total purine contents and free nucleosides, nucleotides, and purine bases composition in Japanese anchovies (*Engraulis japonicus*) using high-performance liquid chromatography with UV detection [J]. Nucleosides Nucleotides Nucleic Acids, 2020, 39(10-12): 1458–1464.

[18] Kaneko K, Yamanobe T, Fujimori S. Determination of purine contents of alcoholic beverages using high performance liquid chromatography [J]. Biomedical Chromatography BMC, 2010, 23(8): 858–864.

[19] Qu Xin, Sui Jianxin, Mi Nasha, et al. Determination of four different purines and their content change in seafood by high-performance liquid chromatography [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2017, 97(2): 520–525.

[20] Feng Xiaoyan, Ma Hongkun, Zou Lina, et al. Determination of purines in prepackaged food using optimum acid hydrolysis followed by high performance liquid chromatography [J]. Food Chemistry, 2023, 417: 135813.

[21] 程庆红. 海鲜食品中嘌呤类物质的提取与测定[D]. 长春: 吉林大学, 2008: 89.
Cheng Qinghong. Extraction and determination of purines in seafood [D]. Changchun: Jilin University, 2008: 89.

[22] 任丽琨. 基于 HPLC 的嘌呤碱基检测方法的建立及海水鱼嘌呤脱除探究[D]. 锦州: 渤海大学, 2019: 96.
Ren Likun. Establishment of a method for purine base detection by HPLC and investigation of purine removal in marine fish [D]. Jinzhou: Bohai University, 2019: 96.

[23] 谷传玲. 痛风病人的饮食清单[J]. 安全与健康, 2018(1): 54.
Gu Chuanling. Diet list for gout patients [J]. Safety & Health, 2018(1): 54.

[24] Kang Lu, Liu Ju, Zhang Hongyang, et al. Improved ultra-high performance liquid chromatographic method for simultaneous determination of five gout-related metabolites in human serum [J]. Journal of Separation Science, 2021, 44(5): 954–962.

[25] Kaneko K, Aoyagi Y, Fukuuchi T, et al. Total purine and purine base content of common foodstuffs for facilitating nutritional therapy for gout and hyperuricemia [J]. Biological & Pharmaceutical Bulletin, 2014, 37(5): 709–721.

[26] 陈冬芬, 邓祖跃. RP-HPLC 测定硫鸟嘌呤片的含量及有关物质[J]. 中国现代应用药学, 2009, 26(10): 831–833.
Chen Dongfen, Deng Zuyue. RP-HPLC determination of content and related substances of thioguanine tablets [J]. Chinese Journal of Modern Applied Pharmacy, 2009, 26(10): 831–833.

[27] 宋敏杰, 李婷婷, 任丽琨, 等. 贮藏和解冻方式对大菱鲆嘌呤含量的影响[J]. 中国食品学报, 2020, 20(7): 143–150.
Song Minjie, Li Tingting, Ren Likun, et al. Effects of storage and thawing methods on purine content of turbot [J]. Chinese Journal of Food Science, 2020, 20(7): 143–150.

[28] 朱博文, 周蔚然, 方艺, 等. 中国中青年人群不同类型饮品摄入与高尿酸血症的相关性研究[J]. 上海医学, 2025, 48(6): 342–349.
Zhu Bowen, Zhou Weiran, Fang Yi, et al. Correlation between different types of beverage intake and hyperuricemia in young and middle-aged Chinese population [J]. Shanghai Medical Journal, 2025, 48(6): 342–349.

[29] 车荧娟, 陈妍, 陈婷婷, 等. 高脂、高脂高果糖饮食对大鼠高尿酸血症的影响[J]. 食品与机械, 2024, 40(7): 126–131.
Che Yingjuan, Chen Yan, Chen Tingting, et al. Effects of high-fat and high-fat high-fructose diets on hyperuricemia in rats [J]. Food and Machinery, 2024, 40(7): 126–131.

[30] Bae J, Park P S, Chun B Y, et al. The effect of coffee, tea, and caffeine consumption on serum uric acid and the risk of hyperuricemia in Korean Multi-Rural Communities Cohort [J]. Rheumatology International, 2015, 35(2): 327–336.

[31] Wang Hong, Wang Yu, Li Yan, et al. Accumulation of flavor precursors and markers belonging to different primary processing coffea arabica beans [J]. Food Chemistry, 2025, 495(Pt 3): 146610.

[32] Van D R, Hu F B. Coffee consumption and risk of type 2 diabetes: a systematic review [J]. JAMA, 2005, 294(1): 97–104.

[33] 中华医学会内分泌学分会. 中国高尿酸血症与痛风诊疗指南(2019)[J]. 中华内分泌代谢杂志, 2020, 36(1): 1–13.
Chinese Society of Endocrinology, Chinese Medical Association. Guidelines for the diagnosis and management of hyperuricemia and gout in China (2019) [J]. Chinese Journal of Endocrinology and Metabolism, 2020, 36(1): 1–13.

(责任编辑: 蔡世佳 韩晓红)