

HPLC-FP法同时测定新品富硒竹笋中10种核苷类成分的含量

秦心睿, 聂晓兵, 袁高阳, 刘诗菡, 杨玉玉, 刘志新, 邱首哲, 郑丽, 杨硕, 范宝磊

Simultaneous Determination of Ten Nucleosides in New Selenium-enriched Bamboo Shoots by HPLC-FP

QIN Xinrui, NIE Xiaobing, YUAN Gaoyang, LIU Shihan, YANG Yuyu, LIU Zhixin, QIU Shouzhe, ZHENG Li, YANG Shuo, and FAN Baolei

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2023040170>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

主成分分析和聚类分析法研究刺玫果黄酮类成分HPLC指纹图谱

HPLC fingerprint of flavonoids in *Rosa davurica* by principal component analysis and cluster analysis

食品工业科技. 2017(24): 231-237 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2017.24.045>

HPLC法同时测定小根蒜中8种碱基和核苷类成分的含量

Simultaneous Determination of Eight Bases and Nucleosides Contents in *Allium macrostemon* Bunge. by HPLC

食品工业科技. 2018, 39(15): 249-254,259 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2018.15.044>

基于聚类分析的白茶高效液相色谱指纹图谱研究

HPLC Fingerprints of White Tea Based on Cluster Analysis

食品工业科技. 2021, 42(16): 255-262 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020100150>

冬虫夏草水提物HPLC指纹图谱及模式识别分析

HPLC Fingerprint and Pattern Recognition Analysis of Aqueous Extracts from *Ophiocordyceps sinensis*

食品工业科技. 2018, 39(22): 219-224 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2018.22.038>

基于离子液体辅助提取的羊肚菌HPLC指纹图谱分析

HPLC Fingerprint Analysis of *Morchella* by Ionic Liquid-assisted Extraction

食品工业科技. 2020, 41(19): 244-250,265 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020.19.038>

基于聚类分析和主成分分析法的杨梅营养品质评价研究

Evaluation of nutritional quality of red bayberry based on cluster analysis and principal component

食品工业科技. 2017(01): 278-280 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2017.01.047>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

秦心睿, 聂晓兵, 袁高阳, 等. HPLC-FP 法同时测定新品富硒竹笋中 10 种核苷类成分的含量 [J]. 食品工业科技, 2024, 45(8): 254-262. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2023040170

QIN Xinrui, NIE Xiaobing, YUAN Gaoyang, et al. Simultaneous Determination of Ten Nucleosides in New Selenium-enriched Bamboo Shoots by HPLC-FP[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(8): 254-262. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2023040170

· 分析检测 ·

HPLC-FP 法同时测定新品富硒竹笋中 10 种核苷类成分的含量

秦心睿¹, 聂晓兵¹, 袁高阳¹, 刘诗茵¹, 杨王玉¹, 刘志新², 邱首哲², 郑丽², 杨硕^{2,*}, 范宝磊^{3,*}

(1.湖北科技学院药学院, 湖北咸宁 437100;

2.湖北省咸宁市农业科学院, 湖北咸宁 437100;

3.湖北科技学院核技术与化学生物学院, 湖北咸宁 437100)

摘要:目的: 建立同时测定不同品种富硒竹笋中胞嘧啶、尿嘧啶、胞苷、次黄嘌呤、尿苷、胸腺嘧啶、腺嘌呤、鸟苷、胸苷、腺苷 10 种核苷类化合物含量的方法。方法: 运用 HPLC 法同时测定 21 种不同品种竹笋的核苷类化合物含量, 色谱柱为 Inertsil ODS-3 C₁₈, 流动相为乙腈-水(梯度洗脱), 检测波长为 260 nm, 流速为 0.8 mL·min⁻¹, 柱温为 30 °C, 进样量为 20 μL。绘制 21 种富硒竹笋的指纹图谱进行相似度评价, 确定共有峰, 并用主成分分析、相关性分析和聚类分析对 21 种不同富硒竹笋的核苷类化合物含量测定结果进行分析。结果: 10 种核苷类成分在 30 min 内达到分离, 线性关系良好 ($R^2 \geq 0.9990$), 精密度、稳定性、重复性、准确度试验 RSD 均小于 2%。不同品种富硒竹笋中 10 种核苷类成分含量与结构比差异明显, 并且核苷类化合物成分指标互相间存在着不同程度的相关性。通过主成分分析, 提取了 4 个主成分, 并确定了胸苷、胸腺嘧啶、腺苷、鸟苷为 4 项核心指标, 可用于评价不同品种富硒竹笋的品质; 通过相关性分析, 得出尿嘧啶与胞苷、鸟苷与胸苷、胸苷与腺苷等指标间相关性较高, 指标之间的含量会互相影响; 通过聚类分析, 得出新品富硒竹笋主要集中为一类, 市场上常见的富硒竹笋主要分为两类。结论: 该实验方法操作快速、简便, 重现性好, 可用于 21 种富硒竹笋中 10 种核苷类化合物的含量测定。同时, 测定结果为竹笋的后期高效开发和利用提供理论依据。

关键词:核苷类化合物, 富硒竹笋, 高效液相色谱法 (HPLC), 指纹图谱, 主成分分析, 相关性分析, 聚类分析

中图分类号: TS255.7

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2024)08-0254-09

本文网刊:

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2023040170



Simultaneous Determination of Ten Nucleosides in New Selenium-enriched Bamboo Shoots by HPLC-FP

QIN Xinrui¹, NIE Xiaobing¹, YUAN Gaoyang¹, LIU Shihan¹, YANG Yuyu¹, LIU Zhixin², QIU Shouzhe², ZHENG Li², YANG Shuo^{2,*}, FAN Baolei^{3,*}

(1.College of Pharmacy, Hubei University of Science and Technology, Xianning 437100, China;

2.Xianning Academy of Agricultural Sciences, Xianning 437100, China;

3.College of Nuclear Technology and Chemical Biology, Hubei University of Science and Technology, Xianning 437100, China)

Abstract: Objective: To establish a method for simultaneous determination of cytosine, uracil, cytidine, hypoxanthine, uridine, thymidine, adenine, guanosine, thymidine and adenosine in different selenium-rich bamboo shoots. Methods: The

收稿日期: 2023-04-19

作者简介: 秦心睿 (2002-), 女, 大学本科, 研究方向: 药学, E-mail: 3028268081@qq.com。

* 通信作者: 杨硕 (1991-), 男, 硕士, 助理研究员, 研究方向: 蔬菜遗传改良, E-mail: 13476264186@163.com。

范宝磊 (1980-), 男, 博士, 教授, 研究方向: 药物分析, E-mail: fanbl_1980@163.com。

determination was performed on Inertsil ODS-3 C₁₈ column with mobile phase consisting of acetonitrile-water (gradient elution). The detection wavelength was set at 260 nm and the flow rate was 0.8 mL·min⁻¹. The column temperature was 30 °C, and the sample size was 20 μL. Fingerprints of 21 selenium-rich bamboo shoots were drawn for similarity evaluation of common peaks. The nucleosides of 21 selenium-rich bamboo shoots were analysed by principal component analysis, correlation analysis and cluster analysis. Results: 10 nucleosides were separated within 30 min, and the linear relationship was good ($R^2 \geq 0.9990$). RSDS of precision, stability, repeatability and accuracy tests were all less than 2%. Significant differences in the contents and structure ratio of 10 nucleosides were found in different selenium-rich bamboo shoots, and there were different degrees of correlation between nucleoside components. Four principal components were selected by principal component analysis. Thymidine, thymine, adenosine and guanosine were identified as four core indexes, which could be used to evaluate the quality of different selenium-rich bamboo shoots. The correlation between uracil and cytidine, guanosine and thymidine, thymidine and adenosine was high, and the contents of these indexes would influence each other. After cluster analysis, it was concluded that the new selenium-rich bamboo shoots were mainly concentrated in one category, and the common selenium-rich bamboo shoots in the market are mainly divided into two categories. Conclusion: The method was rapid, simple and reproducible, and could be used for the determination of 10 nucleosides in 21 selenium-rich bamboo shoots. At the same time, the results would provide a theoretical basis for the efficient development and utilization of bamboo shoots in the later period.

Key words: nucleoside compounds; bamboo shoots; high performance liquid chromatography (HPLC); finger-print; principal component analysis; correlation analysis; cluster analysis

富硒竹笋,禾本科竹亚科多年生常绿植物,是可食用竹种幼嫩的茎^[1-2],是一种备受人们欢迎的蔬菜,食用和栽培历史极为悠久。《本草纲目》中阐述了竹笋的药用功效:竹笋味甘、微寒、无毒^[3-4]、具有消渴、利水道^[5]、养气、清热化痰^[6]、爽胃^[7]等功效。现代研究表明,富硒竹笋含有丰富的核苷类成分^[8-9]、膳食纤维^[10]、蛋白质、氨基酸、脂肪、糖类、维生素和矿物质元素^[11-12],是优良的保健蔬菜,且具有较高的药用价值,有降低血糖、促进创面愈合、延缓衰老、增强免疫功能、抑制细胞突变的作用,还可调节胃肠道等药理作用,对肥胖、高脂血、高血压、肿瘤等疾病具有预防作用^[13]。

核苷类化合物是细胞的重要组成成分,作为生物活性成分,对机体的免疫系统、代谢系统、神经系统及心血管系统等有着很强的调节作用,例如抗血小板聚集、抗心律失常、抗氧化剂、抗癫痫以及抗肿瘤等,是改善人类健康和预防疾病的重要组成成分之一^[14-15]。竹笋作为传统的药食同源植物,应用多以水为溶剂进行加工,其水溶性活性成分的生物活性研究已经受到一定的关注,富硒竹笋具有紫外吸收的水溶性成分主要是核苷类物质^[16-17]。因此,核苷类成分的含量可作为评价食品和药品品质的指标,核苷是一类由含氮碱基与糖缩合而成的糖苷,是构成生命体 DNA 和 RNA 的基本物质,核苷类成分已经被证实是重要的生物活性成分,与富硒竹笋生物活性(抗肿瘤、抗癫痫、抗氧化等)具有一定的关联性^[18]。

目前,小柴胡^[19]、熟地黄^[20]、半夏^[21]、食用菌^[22]、龙眼^[23]等药材和食材中已报道建立了核苷类物质的检测方法。但是竹笋中核苷类等含氮类化合物的液相检测方法报道较少,并且针对新品富硒竹笋中胞嘧啶、尿嘧啶、胞苷、次黄嘌呤、尿苷、胸腺嘧啶、腺嘌呤、鸟苷、胸苷、腺苷 10 种核苷的同时测定的报道

也相对较少^[24-25]。本研究采用 HPLC 法测定 21 种富硒竹笋中 10 种核苷类成分的含量,并采用主成分分析、相关性分析和聚类分析对其进行评价,比较 21 种富硒竹笋中化学成分的差异,探究 21 种竹笋的质量等同性,为解决竹笋基源单一的状况提供理论基础,为富硒竹笋的进一步高效开发利用和质量控制提供参考。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

富硒竹笋 共 21 种,主要包括两大类,分别为咸宁市农业科学院最新研发的新品富硒竹笋和市场上已有的富硒竹笋,所有实验所需富硒竹笋的品种认真检查,洗净、去除损坏部分,放入冰箱储存(2 °C)。21 种富硒竹笋的采样地点、采样时间和部位,如表 1 所示;磷酸二氢钾、磷酸 分析纯,国药集团化学试剂有限公司;甲醇、乙腈 色谱级,德国 Merck 公司;超纯水 实验室自制;对照品胞嘧啶(cytosine, CAS: 71-30-7)、尿嘧啶(uracil, CAS: 66-22-8)、胞苷(cytidine, CAS: 65-46-3)、次黄嘌呤(hypoxanthine, CAS: 68-94-0)、尿苷(uridine, CAS: 58-96-8)、胸腺嘧啶(thymine, CAS: 65-71-4)、腺嘌呤(adenine, CAS: 73-24-5)、鸟苷(guanosine, CAS: 118-00-3)、胸苷(thymidine, CAS: 50-89-5)、腺苷(adenosine, CAS: 58-61-7) 纯度质量分数均大于 98%,上海麦克林生化科技有限公司。

HPLC-16 岛津高效液相色谱仪 日本岛津公司;CM-RO-C2 实验室超纯水机 宁波丹斯博顿环保科技有限公司;FA2004B 电子分析天平 上海越平科学仪器有限公司;KQ3200DB 超声波清洗器 昆山市超声仪器有限公司;FSJ-A03D1 型粉碎机 广东佛山市尚电电器有限公司;SHZ-D(III)型循环水式多用真空泵 郑州博科仪器设备有限公司;

表1 21种富硒竹笋的基本信息
Table 1 Basic information of 21 selenium-rich bamboo shoots

分类	编号	品种	采样地点	采样时间	部位
新品富硒竹笋	X1	富硒竹X2	咸宁市咸安区	2022.10.12	笋尖
	X2	富硒竹X3	咸宁市咸安区	2022.10.12	笋尖
	X3	富硒竹Y1	咸宁市咸安区	2022.10.12	笋尖
	X4	富硒竹Y2	咸宁市咸安区	2022.10.10	笋尖
	X5	富硒竹Y3	咸宁市咸安区	2022.10.14	笋尖
	X6	富硒竹CK1	咸宁市咸安区	2022.10.02	笋尖
	X7	富硒竹CK2	咸宁市咸安区	2022.10.09	笋尖
	X8	富硒竹CK3	咸宁市咸安区	2022.10.11	笋尖
市场已有竹笋	S1	高节竹	咸宁市咸安区	2022.09.24	笋尖
	S2	雷竹	咸宁市咸安区	2022.09.24	笋尖
	S3	黄纹竹	咸宁市咸安区	2022.10.10	笋尖
	S4	黄甜竹	咸宁市咸安区	2022.09.14	笋尖
	S5	黄槽刚竹	咸宁市咸安区	2022.09.25	笋尖
	S6	角竹	咸宁市咸安区	2022.10.04	笋尖
	S7	石竹	咸宁市咸安区	2022.10.06	笋尖
	S8	富阳乌哺鸡竹	咸宁市咸安区	2022.09.28	笋尖
	S9	乌芽竹	咸宁市咸安区	2022.09.18	笋尖
	S10	甜笋竹	咸宁市咸安区	2022.09.25	笋尖
	S11	五月季	咸宁市咸安区	2022.10.12	笋尖
	S12	黄杆乌哺鸡竹	咸宁市咸安区	2022.10.07	笋尖
	S13	白哺鸡竹	咸宁市咸安区	2022.10.07	笋尖

DZF-6050 真空干燥箱 上海 Bullun 实业有限公司
医疗器械厂; VM-B 漩涡混合器 上海舍岩仪器有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1 溶液的制备

1.2.1.1 对照品溶液的配制 分别精密称取对照品胞嘧啶、尿嘧啶、胞苷、次黄嘌呤、尿苷、胸腺嘧啶、腺嘌呤、鸟苷、胸苷、腺苷各 10 mg 分别置于 10 个 10 mL 容量瓶中, 加入超纯水定容, 配置成质量浓度分别为 $1 \text{ mg} \cdot \text{mL}^{-1}$ 的单一对照品储备液, 用超纯水稀释定容得到核苷类成分浓度为 $20 \text{ } \mu\text{g}/\text{mL}$ 混合标准品储备液, 经 $0.45 \text{ } \mu\text{m}$ 滤膜过滤, 置于进样瓶中, 进 HPLC 系统分析。

1.2.1.2 供试品溶液的配制 取 21 种不同品种的新鲜富硒竹笋各约 4 g, 精密称定, 用移液管精密量取 20 mL 超纯水置于锥形瓶中, 放置 18 h 浸提, 超声 30 min, 过滤。滤液过 $0.45 \text{ } \mu\text{m}$ 滤膜, 取滤液作为供试品, 经 $0.45 \text{ } \mu\text{m}$ 滤膜过滤, 置于进样瓶中, 待测。

1.2.2 HPLC 色谱条件 用 Shimadzu LC-16 系统, Inertsil ODS-3, C_{18} 色谱柱 ($4.6 \text{ mm} \times 250 \text{ mm}$, $5 \text{ } \mu\text{m}$), 本实验选用了不同种流动相进行考察, 经过筛选, 从乙腈-水、甲醇-水、甲醇- $(0.02 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1})$ 磷酸二氢钾、乙腈- $(0.1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1})$ 磷酸二氢钾、甲醇- 0.1% 磷酸水、乙腈- 0.1% 磷酸水中进行从流动相的比例进行最优条件的选择。梯度洗脱程序为 0~5 min, 1% B; 5~10 min, 1%~5% B; 10~20 min, 5%~15% B; 20~25 min, 15%~5% B; 25~30 min, 5%~1% B; 设定柱温为

$30 \text{ } ^\circ\text{C}$, 流速为 $0.8 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$, 检测波长为 260 nm, 进样量为 $20 \text{ } \mu\text{L}$ 。

1.2.3 方法学验证

1.2.3.1 线性回归方程 精密吸取混合标准品储备液 2、10、20、40、80、120 μL 分别置于 2 mL 的量瓶中, 用移液管精密量取超纯水, 经定容、摇匀后配制得到 1、5、10、20、40、60 $\mu\text{g}/\text{mL}$ 的混合对照品溶液, 用 $0.45 \text{ } \mu\text{m}$ 滤膜过滤, 装入进样小瓶中, 按照质量浓度由低到高分别进样, 每个浓度提取配置混合标准品 3 份。横坐标(X)为质量浓度, 纵坐标(Y)为峰面积, 进行线性回归分析。

1.2.3.2 检出限(LOD)和定量限(LOQ)试验 将混合标准品溶液进行 HPLC 分析, 得到各核苷对照品溶液最小检出限和最小定量限。最小检出限和最小定量限定义为信噪比分别等于 3 和 10 对应的进样量。

1.2.3.3 精密度实验 精密吸取混合标准品溶液 $20 \text{ } \mu\text{L}$, 制备 6 份混合标准品溶液, 按色谱条件测定, 以峰面积计算 RSD。

1.2.3.4 重复性实验 精密量取供试品溶液 $40 \text{ } \mu\text{L}$, 制备 6 份混合标准品溶液, 待测, 记录峰面积, 并计算各核苷化合物含量来表示 RSD。

1.2.3.5 准确度实验 精密量取供试品溶液 $60 \text{ } \mu\text{L}$, 共 3 份, 再精密加入混合标准品溶液 1、20、60 μL , 一式三份进行 HPLC 色谱分析, 以计算相对标准偏差(RSD)。

1.2.4 富硒竹笋指纹图谱的建立 将 21 种富硒竹笋

对其 10 种核苷类化合物建立 HPLC 图谱,将所得的各色谱图导入《中药色谱指纹图谱相似度评价系统》(2012)中进行数据处理,设定以 S1 为参照图谱,时间窗宽度为 0.1 min,采用平均数生成对照图谱,经过多点校正、Mark 峰匹配生成 21 种富硒竹笋共有模式指纹图谱。

1.3 数据处理

绘制 21 种富硒竹笋的 HPLC 指纹图谱,采用《中药色谱相似度评价系统(2012 版)》进行相似度评价,确定共有峰;采用 SPSS 27.0 软件进行主成分分析,Origin 2021 版软件进行相关性分析和聚类分析从而对 21 种富硒竹笋中 10 种核苷类成分含量进行比较研究。

2 结果与分析

2.1 HPLC 条件的选择优化

流动相的组成也应被视为改善峰型的重要因素,本实验选用了不同种流动相进行考察。其结果如图 1 所示,显示同一条件下,甲醇作为有机相时,完全出峰的时间为 25 min,乙腈作为有机相时,完全出峰时间为 28 min。虽然甲醇作为有机相的保留时间小于乙腈作为有机相时的保留时间,但是前者的部分色

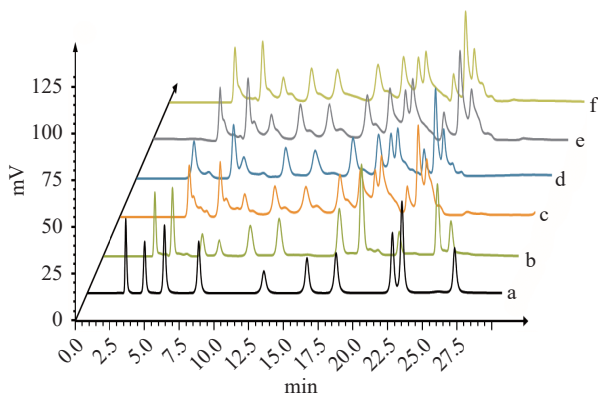


图 1 不同流动相的 HPLC 特征图谱

Fig.1 HPLC characteristic chromatogram of different mobile phases

注: a: 乙腈-水, b: 甲醇-水, c: 乙腈-0.1% 磷酸水, d: 甲醇-0.1% 磷酸水, e: 乙腈-(0.1 mol·L⁻¹)磷酸二氢钾, f: 甲醇-(0.02 mol·L⁻¹)磷酸二氢钾。

谱峰分离度 R 小于 1.5,且色谱峰宽,所以不宜采用甲醇作为有机相。乙腈作为有机流动相时有所改善,综合选择乙腈作为有机流动相。此外,溶液电离、流动相的 pH 对核苷类化合物的保留和选择性也有明显的影响。在水相中使用纯水作为流动相改性剂,以改善目标峰的拖尾现象,最终选用乙腈-水作为优选流动相,并进行梯度洗脱。在上述优化条件下,所有目标化合物可在 28 min 内完全地分离。最终确定色谱条件为以水(A)-乙腈(B)为流动相,梯度洗脱程序为 0~5 min, 1% B; 5~10 min, 1%~5% B; 10~20 min, 5%~15% B; 20~25 min, 15%~5% B; 25~30 min, 5%~1% B。

2.2 方法学验证

2.2.1 线性回归方程 线性关系考察结果发现,峰面积(Y)与浓度(X)之间具有良好的相关性($R^2 \geq 0.9990$),表明 10 种核苷类成分在其所在的浓度范围内线性关系良好,结果见表 2。

2.2.2 检出限(LOD)和定量限(LOQ)试验 将混合标准品溶液多次稀释分别进行 HPLC 分析,得到各核苷对照品溶液最小检出限和最小定量限的比值接近 1:3,表明在该条件下测得的结果相对准确,结果见表 2。

2.2.3 精密度、稳定性、重复性、准确度试验 根据精密度实验结果发现,各组分色谱峰的保留时间波动在 0.05 min 内,各核苷类成分峰面积的 RSD 在 0.31%~1.25% 范围内,表明仪器精密度良好;根据稳定性实验结果发现,以峰面积计算各核苷化合物的 RSD 在 0.75%~2.41% 范围内,供试品溶液在 48 h 内稳定性良好;根据重复性实验结果发现,混合标准品中各核苷类化合物含量的 RSD 在 0.43%~1.70% 范围内,表明该方法的重复性良好;根据准确度实验结果发现,各个核苷回收率平均值分别为胞嘧啶 92.34、尿嘧啶 98.73、胞苷 104.23、次黄嘌呤 90.42、尿苷 106.20、胸腺嘧啶 96.45、腺嘌呤 104.21、鸟苷 102.44、胸苷 97.23、腺苷 98.60, RSD 值均在 0.33%~0.79% 范围内,结果显示该方法对于确定 10 种目标化合物是准确的,结果见表 3。

表 2 目标化合物的回归方程、决定系数(R^2)、线性范围、检出限(LOD)和定量限(LOQ)

Table 2 Regression equation, coefficient of determination (R^2), linear range and LOD and LOQ of target compounds

名称	保留时间(min)	标准曲线方程	R^2	线性范围($\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$)	检出限(LOD)($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)	定量限(LOQ)($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)
胞嘧啶	3.702	$Y=44514X+33951$	0.9990	1.0~60	2.78	8.33
尿嘧啶	4.953	$Y=66160X-15461$	0.9998	1.0~60	10.43	32.64
胞苷	7.051	$Y=55004X-20110$	0.9998	1.0~60	3.74	14.66
次黄嘌呤	8.625	$Y=67007X-125362$	0.9997	1.0~60	15.26	47.20
尿苷	10.693	$Y=56799X-17368$	0.9997	1.0~60	5.47	17.80
胸腺嘧啶	12.793	$Y=72393X-32142$	0.9998	1.0~60	3.30	10.83
腺嘌呤	17.217	$Y=68469X+16655$	0.9997	1.0~60	7.40	24.64
鸟苷	18.824	$Y=98378X+334217$	0.9991	1.0~60	4.65	16.45
胸苷	21.459	$Y=61399X-23582$	0.9999	1.0~60	8.25	26.70
腺苷	24.204	$Y=87253X+2946.1$	0.9999	1.0~60	4.13	14.29

表3 精密度、稳定性、重复性、准确度试验结果 (RSD%, n=6)

Table 3 Test results of precision, repeatability, stability and accuracy (RSD%, n=6)

名称	精密度	稳定性	重复性	准确度
胞嘧啶	0.32	1.44	0.62	0.33
尿嘧啶	0.54	1.83	0.96	0.79
胞苷	0.31	1.56	1.52	0.53
次黄嘌呤	0.47	1.03	1.46	0.45
尿苷	0.74	2.41	0.43	0.38
胸腺嘧啶	0.56	0.75	1.28	0.41
腺嘌呤	0.53	1.33	1.70	0.74
鸟苷	1.25	1.24	0.92	0.68
胸苷	0.62	0.78	0.71	0.64
腺苷	0.44	0.94	0.53	0.43

2.3 样品的定量分析

按照 1.2.1 中的方法进行提取,按照 1.2.2 中的色谱条件分别对 21 种富硒竹笋的笋尖部分进行 HPLC 定量分析,根据得到的 10 种核苷类化合物的线性方程进行计算,最终得到的含量测定结果见表 4 和图 2。

由表 4 和图 2 可知,不同品种富硒竹笋中 10 种核苷类成分含量差异明显,且核苷类成分结构比(每个核苷类成分所占该样品核苷类成分总量比值)也不相同。21 种富硒竹笋中胞嘧啶、尿嘧啶、胞苷、次黄嘌呤、尿苷、胸腺嘧啶、腺嘌呤、鸟苷、胸苷、腺苷和总核苷类成分的平均含量分别为 0.9311、0.4965、0.8828、2.1497、1.2950、32.5135、0.2777、0.9400、18.2668、3.0507、59.8727 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 。其中,胸腺嘧啶含

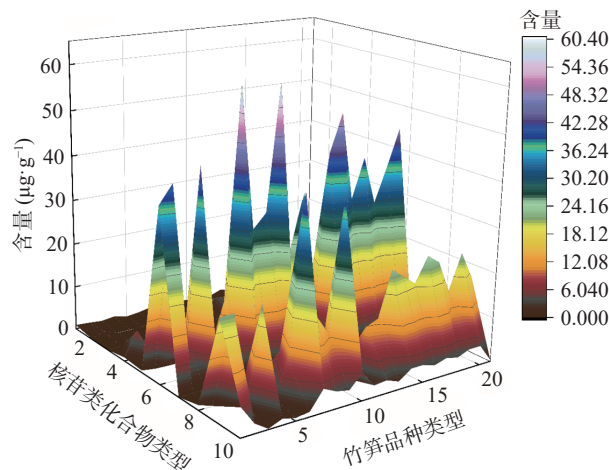


图2 21种富硒竹笋样品中10种核苷化合物的含量

Fig.2 Contents of 10 Nucleoside Compounds in 21 Selenium-enriched Bamboo Shoots

量最高,平均含量达 $32.5135 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$,胸腺嘧啶和胸苷的平均含量占 10 种核苷类化合物平均总量的 84.81%,而胞嘧啶、尿嘧啶、胞苷、腺嘌呤、鸟苷含量相对较低,占核苷总量的 5.89%。

2.4 富硒竹笋指纹图谱的建立

将不同品种的富硒竹笋按照上述方法制备供试品溶液进行 HPLC 分析,不同核苷类化合物均在 27 min 内洗脱出来,将所得的各色谱图导入《中药色谱指纹图谱相似度评价系统(2012 版)》中进行数据处理,生成核苷类化合物样品对照指纹图谱,如图 3。

对不同品种的富硒竹笋特征图谱分析,发现 1~10 号峰为所有样品溶液色谱峰中共有色谱峰,

表4 21种富硒竹笋样品中10种核苷化合物的含量($\bar{x}\pm s, n=3$)

Table 4 Contents of 10 nucleoside compounds in 21 selenium-enriched bamboo shoots ($\bar{x}\pm s, n=3$)

样品编号	胞嘧啶 ($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)	尿嘧啶 ($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)	胞苷 ($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)	次黄嘌呤 ($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)	尿苷 ($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)	胸腺嘧啶 ($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)	腺嘌呤 ($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)	鸟苷 ($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)	胸苷 ($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)	腺苷 ($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)
X1	0.72±0.08	1.07±0.07	-	6.11±0.02	0.09±0.00	42.11±5.03	0.07±0.00	0.09±0.00	22.01±1.04	2.14±0.02
X2	0.13±0.01	0.15±0.01	0.29±0.04	1.42±0.01	-	6.84±0.23	0.26±0.01	0.18±0.02	2.08±0.04	0.68±0.04
X3	0.45±0.09	0.02±0.00	0.04±0.00	0.61±0.00	-	7.02±0.31	-	0.07±0.01	1.73±0.00	0.18±0.01
X4	0.90±0.11	0.09±0.00	-	0.83±0.01	0.47±0.02	38.14±2.87	-	1.12±0.03	21.75±2.03	6.40±0.43
X5	2.31±0.08	0.25±0.02	0.50±0.01	3.36±0.41	4.50±0.09	4.11±0.32	0.16±0.02	0.42±0.02	17.04±1.37	0.35±0.05
X6	0.82±0.01	-	-	12.47±1.02	0.00	44.87±4.03	0.25±0.04	0.14±0.01	22.44±1.68	1.36±0.00
X7	1.02±0.02	0.68±0.01	1.37±0.12	0.75±0.02	0.42±0.05	60.26±8.54	0.12±0.02	7.87±0.41	43.31±2.93	5.14±0.02
X8	0.46±0.01	0.25±0.03	0.49±0.05	0.90±0.01	0.03±0.00	16.56±2.01	0.02±0.00	0.38±0.01	9.31±0.74	1.12±0.01
S1	0.84±0.06	0.28±0.01	0.55±0.01	2.88±0.34	3.60±0.07	45.67±5.20	0.02±0.00	-	22.96±2.00	4.29±0.10
S2	0.76±0.01	0.19±0.01	0.37±0.02	7.96±0.73	5.75±0.03	37.35±2.04	0.02±0.00	-	15.11±1.01	4.29±0.01
S3	0.43±0.01	0.10±0.01	0.21±0.01	0.08±0.00	3.11±0.01	42.79±4.82	1.04±0.03	0.64±0.02	23.00±2.04	3.84±0.01
S4	0.64±0.04	2.91±0.33	5.83±0.08	0.34±0.01	0.36±0.00	23.16±3.04	-	-	1.09±0.00	2.59±0.02
S5	2.47±0.07	0.38±0.03	0.76±0.05	0.15±0.00	1.50±0.02	29.25±3.02	0.04±0.00	1.24±0.04	17.33±3.81	3.76±0.14
S6	1.28±0.13	1.27±0.01	2.54±0.21	1.71±0.13	0.70±0.01	40.41±3.23	-	-	24.19±2.43	3.84±0.05
S7	0.40±0.01	0.11±0.01	0.21±0.01	2.60±0.02	1.40±0.04	35.02±4.30	0.05±0.00	1.41±0.11	11.93±1.54	2.87±0.23
S8	1.12±0.04	0.26±0.03	0.51±0.00	0.62±0.01	0.08±0.00	32.28±3.79	3.46±0.01	0.43±0.02	12.88±1.29	3.17±0.39
S9	0.95±0.02	0.80±0.03	1.59±0.07	1.05±0.02	1.78±0.01	29.75±2.01	0.06±0.00	4.48±0.33	22.21±0.98	3.21±0.24
S10	0.76±0.02	0.60±0.01	1.20±0.02	0.29±0.01	0.88±0.00	59.68±3.93	0.00	0.28±0.02	40.43±3.20	6.12±0.64
S11	1.42±0.05	0.18±0.01	0.36±0.01	-	0.20±0.00	4.80±0.32	0.25±0.00	0.98±0.01	13.10±0.22	1.79±0.22
S12	0.86±0.09	0.56±0.03	1.12±0.02	1.03±0.02	1.56±0.07	31.55±3.21	-	-	18.76±1.23	3.04±0.24
S13	0.83±0.03	0.29±0.03	0.59±0.01	-	0.77±0.01	51.18±6.30	0.03±0.00	-	20.94±2.01	3.87±0.09

注:“-”表示没有此类核苷类化合物。

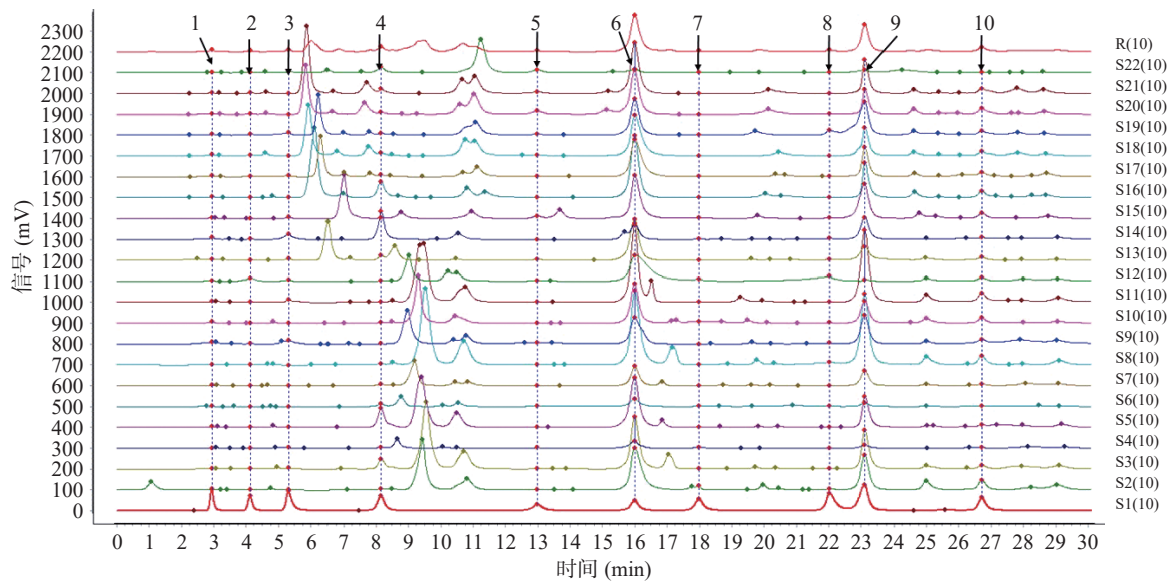


图 3 混合标准品及样品提取物中核苷类成分的 HPLC 特征图谱

Fig.3 HPLC characteristic chromatogram of nucleosides in mixed standard and sample extracts

注: 1-胞嘧啶; 2-尿嘧啶; 3-胞苷; 4-次黄嘌呤; 5-尿苷; 6-胸腺嘧啶; 7-腺嘌呤; 8-鸟苷; 9-胸苷; 10-腺苷。

10 个峰依次为胞嘧啶、尿嘧啶、胞苷、次黄嘌呤、尿苷、胸腺嘧啶、腺嘌呤、鸟苷、胸苷、腺苷。且 10 个峰的峰面积和分离度较大, 因此说明不同品种的富硒竹笋含有的核苷类化合物大致相同, 但是含量有所差异。

以 S1 为对照图谱, 计算共有峰的保留时间的 RSD, 结果见表 5。从中得出每个峰号的共有峰数量代表不同品种中含有的核苷类化合物的种类, 特征图谱分析结果与实验结果相一致。计算不同品种的富硒竹笋核苷类化合物的色谱图和对照图谱之间的相似度, 结果见表 5, 从相似度结果来看, 本实验收集的不同品种的富硒竹笋样品之间核苷类化合物有一定的差异性, 说明富硒竹笋不同品种中均有一定的应用价值, 其在富硒竹笋核苷类化合物质量方面能够发挥积极的作用。

2.5 主成分分析 (PCA)

应用 SPSS 分析软件对所有样品中 10 种核苷类成分含量进行主成分分析。提取标准为特征值 > 1, 得到 4 个主成分。其中, 第一主成分的方差贡献率为 27.543%; 第二个主成分的方差贡献率为 48.916%; 第三个主成分的方差贡献率为 62.069%; 第四个主成分的方差贡献率为 74.390%, 包含的信息量大, 贡献率最高。主成分得分系数矩阵见表 6。由表 6 可知, 主成分 1 与胸腺嘧啶、鸟苷、胸苷、腺苷 4 个成分的

相关性高于其他核苷类成分, 相关系数在 0.562~0.918 之间; 主成分 2 与尿嘧啶、胞苷 2 个成分的相关性高于其他核苷成分, 相关系数在 0.926~0.941 之间; 主成分 3 与次黄嘌呤、尿苷 2 个成分的相关性高于其他核苷类成分, 相关系数在 0.482~0.689 之间; 主成分 4 与胞嘧啶、腺嘌呤 2 个成分的相关性高于其他核苷类化合物, 相关系数在 0.223~0.805 之间。主成分分析结果见表 6 和图 4。

将 SPSS 分析软件给出的主成分得分系数乘以主成分相对应的特征值的平方根, 得到 4 个主成分每个指标所对应的系数, 关系如下:

$$F_1 = 0.06X_{\text{胞嘧啶}} + 0.05X_{\text{尿嘧啶}} + 0.05X_{\text{胞苷}} - 0.03X_{\text{次黄嘌呤}} + 0.07X_{\text{尿苷}} + 0.53X_{\text{胸腺嘧啶}} - 0.05X_{\text{腺嘌呤}} + 0.34X_{\text{鸟苷}} + 0.55X_{\text{胸苷}} + 0.53X_{\text{腺苷}}$$

$$F_2 = -0.05X_{\text{胞嘧啶}} + 0.63X_{\text{尿嘧啶}} + 0.64X_{\text{胞苷}} - 0.3X_{\text{次黄嘌呤}} - 0.24X_{\text{尿苷}} - 0.05X_{\text{胸腺嘧啶}} - 0.10X_{\text{腺嘌呤}} + 0.06X_{\text{鸟苷}} - 0.13X_{\text{胸苷}} + 0.03X_{\text{腺苷}}$$

$$F_3 = 0.33X_{\text{胞嘧啶}} + 0.20X_{\text{尿嘧啶}} + 0.19X_{\text{胞苷}} - 0.42X_{\text{次黄嘌呤}} + 0.60X_{\text{尿苷}} - 0.03X_{\text{胸腺嘧啶}} - 0.48X_{\text{腺嘌呤}} - 0.2X_{\text{鸟苷}} - 0.02X_{\text{胸苷}} + 0.04X_{\text{腺苷}}$$

$$F_4 = 0.73X_{\text{胞嘧啶}} - 0.10X_{\text{尿嘧啶}} - 0.46X_{\text{次黄嘌呤}} + 0.2X_{\text{尿苷}} - 0.32X_{\text{胸腺嘧啶}} + 0.2X_{\text{腺嘌呤}} + 0.27X_{\text{鸟苷}} + 0.04X_{\text{胸苷}}$$

PCA 分析结果显示 (见图 4), 市场已有竹笋相对集中的聚集在一起, 新品富硒竹笋分布均较散, 表

表 5 共有峰保留时间和共有峰的峰数

Table 5 Retention time of common peak and peak number of common peak

峰数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
t_R (min)	2.815	4.180	5.613	8.089	12.826	15.944	18.075	22.146	22.837	26.675
RSD (%)	1.23	0.47	1.05	0.75	0.58	0.73	0.65	0.55	0.47	0.89
共有峰个数	22	21	19	20	19	22	16	18	18	22

表6 主成分得分系数矩阵

Table 6 Score coefficient matrix of principal components

指标	主成分1	主成分2	主成分3	主成分4
胞嘧啶	0.094	-0.069	0.375	0.805
尿嘧啶	0.087	0.926	0.234	-0.108
胞苷	0.083	0.941	0.221	-0.002
次黄嘌呤	-0.056	-0.442	0.482	-0.507
尿苷	0.119	-0.352	0.689	0.220
胸腺嘧啶	0.887	-0.071	-0.030	-0.351
腺嘌呤	-0.090	-0.145	-0.553	0.223
鸟苷	0.562	0.090	-0.234	0.304
胸苷	0.918	-0.190	0.018	0.046
腺苷	0.872	0.044	-0.042	-0.003

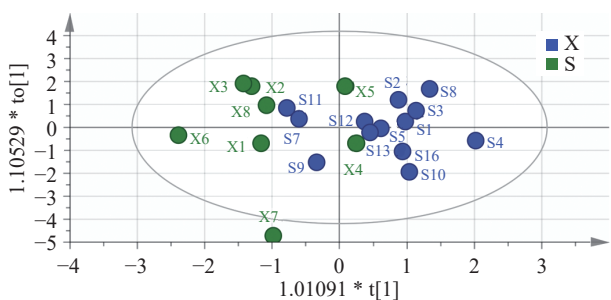


图4 21种富硒竹笋的主成分分析结果图

Fig.4 Results of principal component analysis of 21 selenium-enriched bamboo shoots

注: X: 新品富硒竹笋; S: 市场已有竹笋。

明在该大类里个体间的差异性较大。

2.6 相关性分析

多样本两指标之间相关系数绝对值越大, 则这两个指标之间的联系越紧密。由此进一步考察不同品种富硒竹笋 10 种核苷类成分相互间的相关性, 采用 Person 相关系数对不同品种富硒竹笋核苷类化合

物含量进行相关性分析, 结果见表 7。由表 7 可知, 21 个品种富硒竹笋的 10 项指标之间相关性存在差异。尿嘧啶含量与胞苷含量存在极显著正相关 ($P < 0.01$); 胸腺嘧啶含量与胸苷和腺苷含量存在极显著正相关 ($P < 0.05$), 胸苷和腺苷含量的变化共同影响胸腺嘧啶含量的变化; 鸟苷含量与胸苷含量存在显著正相关, 胸苷含量与腺苷含量存在极显著正相关 ($P < 0.01$)。此外, 尿嘧啶与胞苷、鸟苷与胸苷、胸苷与腺苷等的相关系数绝对值大于 0.05, 指标间相关性较高。相关性分析结果表明, 所检测的 21 种富硒竹笋的 10 种核苷指标间具有一定相关性, 因而所统计数据信息重叠, 因此采用主成分分析, 提高这 21 种富硒竹笋品质评价的分析效率。

表7 不同品种富硒竹笋 10 种核苷类化合物指标的相关性分析

Table 7 Correlation analysis of 10 kinds of nucleoside compounds in different varieties of selenium-enriched bamboo shoots

指标	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	1									
2	-0.011	1								
3	0.020	0.935**	1							
4	-0.061	-0.159	-0.262	1						
5	0.259	-0.179	-0.116	0.229	1					
6	-0.145	0.071	0.023	0.164	0.038	1				
7	0.029	-0.154	-0.131	-0.113	-0.112	-0.003	1			
8	0.106	0.029	0.066	-0.190	-0.091	0.278	-0.056	1		
9	0.192	-0.080	-0.110	0.053	0.103	0.798**	-0.094	0.508*	1	
10	0.030	0.078	0.109	-0.208	0.154	0.777**	-0.011	0.289	0.685**	1

注: *表示在0.05水平(双侧)上显著相关, $P < 0.05$; **表示在0.01水平(双侧)上极显著相关, $P < 0.01$; 1-胞嘧啶; 2-尿嘧啶; 3-胞苷; 4-次黄嘌呤; 5-尿苷; 6-胸腺嘧啶; 7-腺嘌呤; 8-鸟苷; 9-胸苷; 10-腺苷。

2.7 聚类分析

以 21 种富硒竹笋样品 10 个共有峰的峰面积

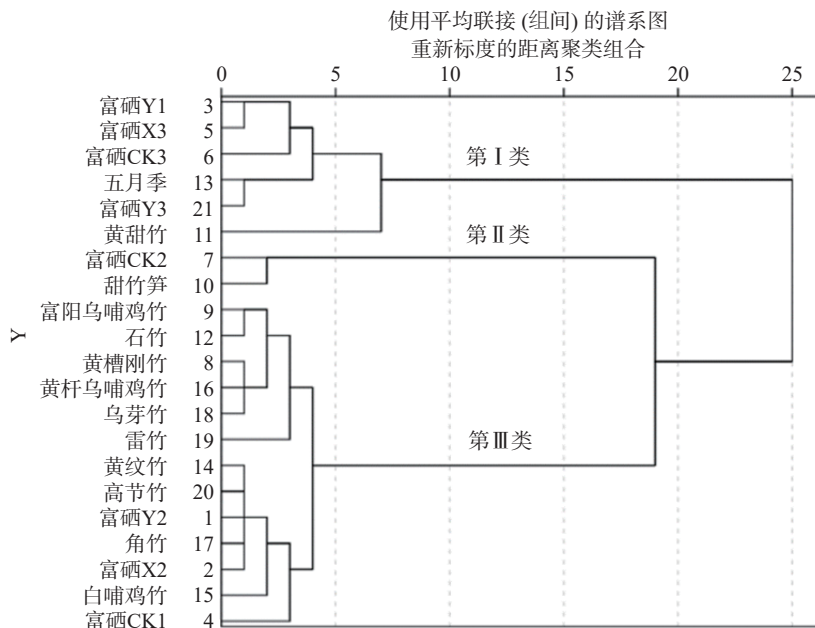


图5 21种富硒竹笋的聚类树状图

Fig.5 Cluster tree diagram of 21 selenium-rich bamboo shoots

(部分缺失色谱峰面积以 0 为计)为变量,导入 SPSS 软件,将数据标准化后,采用 Ward 联结法,以平方 Euclidean 距离为分类依据,进行系统聚类分析,得到聚类树状图见图 5。当距离为 8 时,21 种富硒竹笋样品可分为 3 类,第 I 类包括 Y1、X3、CK3、五月季、Y3 和黄甜竹,第 II 类包括 CK2、甜富硒竹笋,第 III 类包括富阳乌哺鸡竹、石竹、黄槽竹、黄杆乌哺鸡竹、乌芽竹、雷竹、黄纹竹、高节竹、Y2、角竹、X2、白哺鸡竹、CK1。可见,新品富硒竹笋主要集中在第 I 类,市场上常见的富硒竹笋主要分布在第 II 类和第 III 类。

3 讨论与结论

当前使用的抗病毒药物中近 50% 是核苷类药物,许多抗肿瘤药物也是核苷类成分^[26-27]。核苷类成分的研究具有广阔的前景,也可从中药中分离有效的核苷类成分作为先导化合物来寻求更为有效的药物^[28-29]。富硒竹笋中核苷类成分的含量很高,具有开发作为补充核苷的功能性食品的潜力^[30]。现代研究表明,富硒竹笋中的核苷类成分主要有鸟苷、尿嘧啶、腺苷等,具有免疫调节、影响机体心血管系统、抗肿瘤、保护神经系统等药理作用,是富硒竹笋重要功效成分之一。传统方法对于富硒竹笋中核苷类成分的提取方法和分析检测方法不仅分析时间长,所使用的提取和分析有机溶剂也具有很大的毒性。因此,开发一套完整的质量评价系统为其质量标准的建立提供理论参考依据^[31],为富硒竹笋的进一步高效开发利用和质量控制提供参考^[32]。

以多种富硒竹笋的笋尖部位为考察物,通过 HPLC 对 21 种富硒竹笋的核苷类化合物进行定性和定量分析,具有科学性和综合性,利用 HPLC-FD、主成分分析、相关性分析和聚类分析对其多种核苷类成分进行化学计量学分析,为解决竹笋基源单一的状况提供理论基础。

本研究发现,这 21 种富硒竹笋的 10 种核苷类化合物成分指标互相间存在着不同程度的相关性。通过主成分分析,提取了 4 个主成分,并确定了胸苷、胸腺嘧啶、腺苷、鸟苷为 4 项核心指标,可用于评价不同品种富硒竹笋的品质;通过相关性分析,得出尿嘧啶与胞苷、鸟苷与胸苷、胸苷与腺苷等指标间相关性较高,指标之间的含量会互相影响;通过聚类分析,得出新品富硒竹笋主要集中在第 I 类,市场上常见的富硒竹笋主要分布在第 II 类和第 III 类。

© The Author(s) 2024. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

参考文献

[1] 徐森,董亚文,陈双林,等. 覆盖雷竹笋箨叶碳氮代谢特征及其与富硒竹笋食味品质的关系[J]. 林业科学, 2022, 58(8): 109-116. [XU S, DONG Y W, CHEN S L, et al. Characteristics of car-

bon and nitrogen metabolism in sheath leaves and its relationship with taste quality of *Phyllostachys violascens prevernalis*' shoots under mulching[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2022, 58(8): 109-116.]

[2] SINGHAL P, BAL L M, SATYA S, et al. Bamboo shoots: A novel source of nutrition and medicine[J]. *Crit Rev Food Sci*, 2013, 53(5): 517-534.

[3] 林倩,王强,刘红芝. 竹笋深加工及其功能活性研究进展[J]. *天然产物研究与开发*, 2012, 24(8): 136-141. [LIN Q, WANG Q, LIU H Z. Research progress on deep-processing and functional activities of bamboo shoot[J]. *Natural Product Research and Development*, 2012, 24(8): 136-141.]

[4] 徐小博. 高节竹(*Phyllostachys prominens*) 竹叶、竹笋化学成分研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2016. [XU X B. Chemical components of bamboo leaves and bamboo shoots from *Phyllostachys prominens*[D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry, 2016.]

[5] 陈中爱,耿阳阳,黄珊,等. 不同品种竹笋营养成分分析与综合评价[J]. *食品工业科技*, 2023, 44(3): 262-268. [CHEN Z A, GENG Y Y, HUANG S, et al. Analysis and comprehensive evaluation of nutritional quality of bamboo shoots from different cultivars[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2023, 44(3): 262-268.]

[6] 朱新燕,陆永国,谢俊杰,等. 方竹笋营养配方粉优化和理化分析[J]. *食品工业科技*, 2018, 39(1): 208-213, 220. [ZHU X Y, LU Y G, XIE J J, et al. Formula optimization and physicochemical analysis of nutritious formula powder of bambocshoots of *Chimonobambusa quadrangularis*[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2018, 39(1): 208-213, 220.]

[7] 林丽静,李积华,朱德明,等. 毛竹笋笋头超微粉营养成分的研究[J]. *食品工业科技*, 2012, 33(20): 42-48. [LIN L J, LI J H, ZHU D M, et al. Study on the nutritional components of superfine power bamboo shoot head[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2012, 33(20): 42-48.]

[8] 樊佳,刘晓谦,孟辰笑凝,等. 基于 HPLC 指纹图谱与核苷类成分含量测定的鸡内金质量评价研究[J]. *中国中药杂志*, 2023, 48(1): 114-125. [FAN J, LIU X Q, MENG C X N, et al. Quality evaluation of *Galli gigerii* endothelium corneum based on HPLC fingerprints and content determination of nucleosides[J]. *China Journal of Chinese Materia Medica*, 2023, 48(1): 114-125.]

[9] 郭莹,李景辉,李霄霄,等. HPLC 法测定中国白酒中的 γ -氨基丁酸和核苷类物质[J]. *食品研究与开发*, 2021, 42(1): 153-158. [GUO Y, LI J H, LI X X, et al. Determination of γ -aminobutyric acid and nucleosides in chinese liquor by HPLC[J]. *Food Research and Development*, 2021, 42(1): 153-158.]

[10] 吴丽萍,孙虹,朱婷婷,等. 发酵毛竹笋制备水溶性膳食纤维工艺优化及功能特性研究[J]. *中国调味品*, 2021, 46(12): 328-329. [WU L P, SUN H, ZHU T T, et al. Study on process optimization and functional properties of soluble dietary fiber from fermented bamboo shoots[J]. *China Condiment*, 2021, 46(12): 328-329.]

[11] KANG H J, YANG H J, KIM M J, et al. Metabolomic analysis of meju during fermentation by ultra performance liquid chromatography-quadrupole-time of flight mass spectrometry (UPLC-Q-TOF MS)[J]. *Food Chem*, 2011, 127(3): 1056-1064.

[12] SUN J, DING Z Q, GAO Q, et al. Major chemical constituents of bamboo shoots (*Phyllostachys pubescens*): Qualitative and quantitative research[J]. *J Agr Food Chem*, 2016, 64(12): 2498-2505.

[13] 朱潇,刘艳江,伍明理,等. 雷山方竹笋营养成分对比分析

- [J]. 经济林研究, 2022, 40(3): 273-280. [ZHU X, LIU Y J, WU L M, et al. Comparative analysis of nutrients from bamboo shoots of *Chimonobambusa leishanensis*[J]. Non-wood Forest Research, 2022, 40(3): 273-280.]
- [14] RIMBERT S, MOREIRA JB, XAPELLI S, et al. Role of purines in brain development, from neuronal proliferation to synaptic refinement[J]. *Neuropharmacology*, 2023, 237: 109640.
- [15] ZHOU N N, WANG T, LIN Y X, et al. Uridine alleviates high-carbohydrate diet-induced metabolic syndromes by activating sirt1/AMPK signaling pathway and promoting glycogen synthesis in Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) [J]. *Anim Nutr*, 2023, 14: 56-66.
- [16] COSGROVE S, MILLER G. Advances in biocatalytic and chemoenzymatic synthesis of nucleoside analogues[J]. *Expert Opin Drug Dis*, 2022, 17(4): 355-364.
- [17] DE C E. New nucleoside analogues for the treatment of hemorrhagic fever virus infections[J]. *Chem-Asian J*, 2019, 14(22): 3962-3968.
- [18] HE L Q, WEI X L, MA X P, et al. Simultaneous quantification of nucleosides and nucleotides from biological samples[J]. *Jam Soc Mass Spectr*, 2019, 30(6): 987-1000.
- [19] 张丽. 根类药材黄芪、黄芩及银柴胡现代产地干燥加工研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2020. [ZHANG L. Study on drying and processing of *Radix astragali*, *Scutellariae radix* and *Bupleuri radix* in modern producing areas[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2020.]
- [20] 张艳丽, 杨雁芸, 白志尧, 等. UPLC-MS/MS 同时测定熟地黄中 8 个核类成分的含量[J]. 药物分析杂志, 2019, 39(4): 608-614. [ZHANG Y L, YANG Y Y, BAI Z R, et al. Simultaneous determination of eight nucleosides in *Rehmanniae radix* praeparata by UPLC-MS/MS[J]. Chinese Journal of Pharmaceutical Analysis, 2019, 39(4): 608-614.]
- [21] 石琨群, 王珏, 刘欢欢, 等. 半夏及其炮制品 7 种主要核苷类成分差异性分析[J]. 中国医院药学杂志, 2023, 43(11): 1232-1238. [SHI K Q, WANG J, LIU H H, et al. Differential analysis of 7 main nucleoside components in *Pinellia ternata* and its processed products[J]. Chinese Journal of Hospital Pharmacy, 2023, 43(11): 1232-1238.]
- [22] 刘艳芳, 应一君, 唐庆九, 等. 不同产地紫芝子实体中活性成分的测定分析[J]. 食用菌学报, 2017, 24(1): 72-76. [LIU Y F, YING Y J, TANG Q J, et al. Bioactive component profiles of *Ganoderma sinense* fruit bodies cultivated in three different regions[J]. Acta Edulis Fungi, 2017, 24(1): 72-76.]
- [23] 肖维强, 黄炳雄, 王晓容, 等. HPLC 法测定龙眼肉中的几种核苷类物质[J]. 食品科学, 2007(1): 234-237. [XIAO W Q, HUANG B X, WANG X R, et al. Quantitative determination of several kinds of nucleotides in *Dimocarpus longan* lour by HPLC[J]. Food Science, 2007(1): 234-237.]
- [24] NIRMALA C, MADHO S, SHEENA H. Nutritional properties of bamboo shoots: Potential and prospects for utilization as a health food[J]. *Compress Review Food Science and Food Safety*, 2011, 10: 153-169.
- [25] SINOKROT H, SMERAT T, NAJJAR A, et al. Advanced prodrug strategies in nucleoside and non-nucleoside antiviral agents: A review of the recent five years[J]. *Molecules*, 2017, 22(10): 1736-1754.
- [26] 李婷婷, 徐胜, 毕健丽, 等. 基于化学计量学对浙贝母组织中核苷化合物测定[J]. 沈阳药科大学学报, 2020, 37(8): 233-240. [LI T T, XU S, BI J L, et al. Determination of nucleoside compounds in *Fritillaria thunbergii* Mig. tissues based on chemometrics [J]. Journal of Shenyang Pharmaceutical University, 2020, 37(8): 233-240.]
- [27] 万宁威, 雷帮星, 何劲, 等. 猴头菌液体发酵产多糖、核苷、萜类工艺优化及其抗氧化活性[J]. 食品工业科技, 2022, 43(2): 686-695, 741. [WAN N W, LEI B X, HE J, et al. Optimization of polysaccharides, nucleosides and terpenes production from *hericium erinaceus* by liquid fermentation and its antioxidant activity[J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(2): 686-695, 741.]
- [28] 吴娇芬, 崔慧芳, 张为, 等. HPLC 法同时测定韭菜子中 8 种核苷类成分的含量[J]. 中药材, 2020, 43(1): 137-140. [WU J F, CUI H F, ZHANG W, et al. Simultaneous determination of eight nucleosides in leek seeds by HPLC[J]. Journal of Chinese Medicinal Materials, 2020, 43(1): 137-140.]
- [29] 王翠翠, 毕启瑞, 张建青, 等. 一测多评法定量分析半夏及其混伪品中的 4 种核苷类成分[J]. 中草药, 2022, 53(19): 6180-6186. [WANG C C, BI Q R, ZHANG J Q, et al. Quantitative analysis of four nucleosides in *Pinellia rhizoma* and its adulterants by the quantitative analysis of multi-components by a single marker[J]. Chinese Traditional and Herbal Drugs, 2022, 53(19): 6180-6186.]
- [30] 伍明理, 代朝霞, 刘艳江, 等. 贵州 11 种竹笋营养成分分析及品质比较[J/OL]. 分子植物育种, 1-15[2024-01-19]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/46.1068.S.20220530.1433.006.html>.
- [31] WU M L, DAI Z X, LIU Y J, et al. Analysis of nutritional components and quality comparison of 11 edible bamboo shoots in Guizhou Province [J/OL]. Molecular Plant Breeding, 1-15[2024-01-19]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/46.1068.S.20220530.1433.006.html>.
- [32] 孟然, 吴哲, 冯薇, 等. 基于 HPLC 指纹图谱结合化学模式识别及多成分定量的蒲公英质量评价研究[J]. 中草药, 2022, 53(24): 7887-7896. [MENG R, WU Z, FENG W, et al. Quality evaluation of dandelion based on HPLC fingerprint combined with chemical pattern recognition and multi-component determination [J]. Chinese Traditional and Herbal Drugs, 2022, 53(24): 7887-7896.]
- [33] 舒胜男, 李焕茹, 胡雁萍, 等. 不同产地山药中 7 种核苷类成分的含量测定及质量评价研究[J]. 中药材, 2021, 44(1): 140-145. [SHU S N, LI H R, HU Y P, et al. Study on content determination and quality evaluation of seven nucleosides in *Dioscorea opposita* from different areas[J]. Journal of Chinese Medicinal Materials, 2021, 44(1): 140-145.]