DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20260509002
引用格式: 田双双, 张琪, 赵紫微, 等. 碱性铁氰化钾衍生-超高效液相色谱法测定水果中维生素 B_1 含量的优化[J]. 食品安全质量检测学报, 2026, 17(15): 267–274.
Tian Shuangshuang, Zhang Qi, Zhao Ziwei, et al. Optimization of determination of vitamin B_1 in fruits by ultra performance liquid chromatography with alkaline potassium ferricyanide derivation [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2026, 17(15): 267–274. (in Chinese with English abstract).

碱性铁氰化钾衍生-超高效液相色谱法测定水果中维生素 B_1 含量的优化

田双双, 张 琪, 赵紫微, 庄美慧, 陈元元, 詹子悦, 戴雁羽, 刘柏林, 谢继安*
(安徽省疾病预防控制中心, 合肥 230601)

摘 要: 目的 建立超高效液相色谱法测定水果基质中维生素 B_1 含量的分析方法, 并对衍生和萃取条件进行优化。**方法** 水果中维生素 B_1 经碱性铁氰化钾衍生后, 正丁醇萃取, 采用 ACQUITY UPLC BEH C_{18} (2.1 mm×100 mm, 1.7 μm)色谱柱进行分离, 50 mmol/L 乙酸钠溶液和乙腈为流动相, 梯度洗脱, 流速为 0.25 mL/min, 柱温度为 40 ℃, 激发波长 375 nm, 发射波长 435 nm, 进样体积为 1 μL。以色谱保留时间定性, 标准曲线外标法定量。**结果** 最佳条件下, 维生素 B_1 在质量浓度为 0.05~1.00 μg/mL 范围内与峰面积呈现良好的线性关系, 相关系数大于 0.9998, 定量限为 0.80 mg/kg, 检出限为 0.30 mg/kg。以不同种类的水果为基质, 采用低、中、高 3 浓度水平进行加标回收试验考察方法的准确度与精密度, 结果表明, 维生素 B_1 的平均回收率为 79.6%~112.0%, 相对标准偏差小于等于 4.7%。**结论** 将建立的方法用于不同水果样品中维生素 B_1 的测定, 表明该方法的样品前处理简便、快速, 准确度高, 精密度好, 适用于批量水果中维生素 B_1 含量的快速测定。

关键词: 维生素 B_1; 超高效液相色谱法; 碱性铁氰化钾; 衍生化; 水果
中图分类号: TS207.3 **文献识别码:** A **文章编号:** 2095–0381(2026)15–0267–08

Optimization of determination of vitamin B_1 in fruits by ultra performance liquid chromatography with alkaline potassium ferricyanide derivation

TIAN Shuang-Shuang, ZHANG Qi, ZHAO Zi-Wei, ZHUANG Mei-Hui, CHEN Yuan-Yuan, ZHAN Zi-Yue, DAI Yan-Yu, LIU Bo-Lin, XIE Ji-An*
(*Anhui Provincial Center for Disease Control and Prevention*, *Hefei* 230601, *China*)

ABSTRACT: Objective To establish a method for the determination of vitamin B_1 in fresh fruit matrix by ultra performance liquid chromatography and optimize the derivatization and extraction conditions. **Methods** Vitamin B_1 in fruit samples was derivatized with alkaline potassium ferricyanide and then extracted using n-butanol. Chromatographic separation was performed on an ACQUITY UPLC BEH C_{18} column (2.1 mm × 100 mm, 1.7 μm). The mobile phase consisted of 50 mmol/L sodium acetate solution and acetonitrile with gradient elution. The flow rate was set at 0.25

收稿日期: 2026-05-09
第一作者: 田双双(1995—), 男, 硕士, 主管技师, 主要研究方向为食品理化检验。E-mail: 1756297199@qq.com
***通信作者:** 谢继安(1980—), 男, 硕士, 主任技师, 主要研究方向为食品理化检验。E-mail: 16615925@qq.com

mL/min, and the column temperature was maintained at 40 ℃. The excitation and emission wavelengths were 375 nm and 435 nm, respectively, and the injection volume was 1 μL. Qualitative analysis was conducted based on chromatographic retention time, and quantitative detection was carried out via external standard method with standard curve. **Results** Under the best conditions, vitamin B_1 showed a good linear relationship with peak area within the mass concentration range of 0.05–1.00 μg/mL, the correlation coefficient was greater than 0.9998, and the limit of quantitation and limit of detection were 0.80 mg/kg and 0.30 mg/kg, respectively. The accuracy and precision of the method were investigated by using different kinds of fruits as the substrate with low, medium and high concentration levels. The average recovery of vitamin B_1 was 79.6%–112.0%, and the relative standard deviation was less than 4.7%. **Conclusion** The established method is applied to the determination of vitamin B_1 in various fruit samples. This method features simple and rapid sample pretreatment, high accuracy and favorable precision, and is suitable for the rapid determination of vitamin B_1 in large batches of fruit samples.

KEY WORDS: vitamin B_1; ultra performance liquid chromatography; alkaline potassium ferricyanide; derivatization; fruit

0 引 言

维生素 B_1 又称为硫胺素，是人体所必需的一种水溶性维生素，具有维持人体能量代谢[1–2]、神经系统和心血管健康等重要功能。长期缺乏维生素 B_1 可能会导致脚气病、心血管疾病以及神经障碍性疾病等多种疾病[3–4]。然而，人体自身无法合成维生素 B_1，也无法长期、大量地储存维生素 B_1，日常生活中，人类必须通过膳食摄入补充适量的维生素 B_1，以维持人体的健康[5–6]。科学合理地补充维生素 B_1，需要准确的食物含量数据，为此，建立一种提取效率高，准确、可靠的分析方法测定各种水果中的维生素 B_1 含量十分有必要。

目前，食物中维生素 B_1 含量的测定方法主要有紫外-可见分光光度法(ultraviolet and visible spectrophotometry, UV)[7]、红外光谱法(infrared absorption spectrometry, IR)[8]、荧光分析法(fluorescence analysis, FL)[9–11]、流动注射电化学发光法(flow injection analysis, FIA)[12–13]、高效液相色谱-串联质谱法(high performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry, HPLC-MS/MS)[14–17]高效液相色谱法(high performance liquid chromatography, HPLC)[18–20]等。传统的 UV 和 FL 虽操作简便，但灵敏度和特异性较差，HPLC-MS/MS 的样品前处理简单，无需衍生化，但需要昂贵的仪器设备和专业的技术操作人员，基层实验室可能难以满足要求，而且实验成本较高。HPLC 具有实验成本低，操作简单[21–23]，分离能力强，特异性强等优点[24–27]，是目前维生素 B_1 测定最为广泛的方法[28–29]。然而，采用 GB 5009.84—2016《食品安全国家标准 食品中维生素 B_1 的测定》中第一法 HPLC 测定水果中维生素 B_1 时，发现新鲜枣子基质的加标回收率较低，究其原因可能是水果基质中含有较多的还原性物质，消耗了碱性铁氰化钾的量，衍生不完全，萃取效率低，亟需优化该标准方法的样品前处理条件，提高衍生效率。

基于上述问题，本研究通过优化超高效液相条件，和加标回收的方式从样品质量、NaOH 浓度、衍生试剂碱性铁氰化钾溶液的用量等方面探究导致检测结果和加标回收率偏低的原因。以新鲜枣子、草莓、杨梅、猕猴桃、苹果、葡萄及耙耙柑为基质样品，通过方法学验证，考察优化方法的准确性、精密度及可靠性，并将该优化方法用于实际样品的测定。本研究建立的检测方法，对顺利完成全国食物成分监测项目中维生素 B_1 的检测工作、提升检测结果准确度具有重要意义。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

水果样品(新鲜枣子、草莓、杨梅、猕猴桃、苹果、葡萄及耙耙柑)购于市售超市。

乙腈(色谱纯，德国 Merck 公司)；盐酸硫胺素(维生素 B_1)(纯度 94.32%，德国 DR.Ehrenstorfer 公司)；铁氰化钾、无水乙酸钠、氢氧化钠(NaOH)、正丁醇、盐酸(分析纯)、木瓜蛋白酶(酶活力≥6000 U/mg)、淀粉酶(酶活力≥2000 U/g)(国药集团化学试剂有限公司)；实验用水为 Milli-Q 超纯水系统制备的超纯水。

1.2 仪器与设备

Waters ACQuity 超高效液相色谱仪(配荧光检测器)、Legend Mach 1.6R 高速离心机(美国赛默飞世尔公司)；VORTEX Multi Reax 多道涡旋混匀器(德国海道夫公司)；Milli-Q 超纯水系统(美国密理博公司)；AS20500BDT 超声波清洗机(天津奥特赛恩斯仪器有限公司)；METTLER TOLEDO MS304TS 万分之一天平[梅特勒-托利多仪器(上海)有限公司]；ACQUITY UPLC BEH C_{18} (2.1mm×100 mm, 1.7 μm，美国 Agilent 公司)；GR85DA 立式自动压力蒸汽灭

菌器[致微(厦门)仪器有限公司]。

1.3　实验方法

1.3.1　标准溶液的配制

准确称取相当于维生素 B_1 25 mg 的盐酸硫胺素标准品, 置于 50 mL 容量瓶中, 采用 0.012 mol/L 的盐酸溶液溶解并定容至刻度, 配制成质量浓度为 500 μg/mL 的标准储备液。准确移取 1 mL 维生素 B_1 的标准储备液于 10 mL 容量瓶中, 用纯水稀释并定容, 配制成质量浓度为 50 μg/mL 的标准中间液。然后采用标准中间液, 配制质量浓度为 0、0.05、0.10、0.20、0.50、1.00 μg/mL 的标准系列工作液。临用前配制。

1.3.2　样品酸水解

称取 3 g 试样于 50 mL 离心管中, 加入 30 mL 0.1 mol/L 的盐酸, 涡旋振荡 5 min, 将离心管的盖子拧松半圈, 放入立式自动压力蒸汽灭菌器内, 在 121 ℃下保持 30 min, 待冷却至 40 ℃以下后取出, 涡旋振荡 5 min;

然后采用 2 mol/L 乙酸钠溶液将 pH 调至 4.0~4.5。

1.3.3　样品提取液酶解

向上述样品提取液中加入 2.0 mL 混合酶溶液(混合酶由木瓜蛋白酶和淀粉酶混合而成, 称取 4.69 g 木瓜蛋白酶和 2.35 g 淀粉酶, 用纯水定容至 100 mL, 混匀。临用前配制。涡旋振荡 5 min, 置于 37 ℃培养箱中过夜(16 h); 酶解液用纯水定容至 50 mL, 涡旋振荡 5 min, 5000 r/min 离心 5 min, 上清液备用。

1.3.4　待测物衍生化

取样品酶解液 2 mL 于 15 mL 离心管中, 加入 6 mL 碱性铁氰化钾(由 5 mL 质量浓度为 20 g/L 碱性铁氰化钾与 200 mL 质量浓度为 100 g/L 氢氧化钠混合而成), 涡旋振荡 10 min; 加入 2 mL 正丁醇, 涡旋振荡 10 min 后静置 10 min, 待溶液充分分层后, 5000 r/min 离心 5 min, 取上清液直接上超高效液相色谱测定。

1.3.5　超高效液相色谱条件

激发波长为 375 nm, 发射波长为 435 nm, 色谱柱 ACQUITY UPLC BEH C_{18} (2.1mm×100 mm, 1.7 μm), 柱温为 40 ℃, 流速为 0.25 mL/min, 进样量为 1 μL。流动相 A 为 50 mmol/L 乙酸钠溶液、流动相 B 为乙腈溶液。梯度洗脱程序: 0~3 min, 95%~80% A; 3.0~4.5 min, 80%~10% A; 4.5~5.0 min, 10%~95% A; 5.0~7.0 min, 95% A。

1.4　数据处理

实验采集的原始数据在 Waters ACQuity 超高效液相色谱仪上导出后, WPS Office 2026 上进行数据的计算, 然后采用 Origin 2021 软件对实验数据进行作图。

2　结果与分析

2.1　液相色谱条件优化

实验考察了纯甲醇、纯乙腈、甲醇-乙腈(50:50, *V*:*V*)、50 mmol/L 乙酸钠-乙腈、50 mmol/L 乙酸钠-甲醇、纯水等不同的流动相对维生素 B_1 的灵敏度与色谱峰形的影响。同时还考察了待测物在不同进样体积下出峰峰形的影响。结果表明, 采用 50 mmol/L 乙酸钠-乙腈为流动相, 进样体积为 1 μL 时, 维生素 B_1 的色谱峰型对称尖锐, 且响应值较高, 维生素 B_1 的色谱峰如图 1 所示。

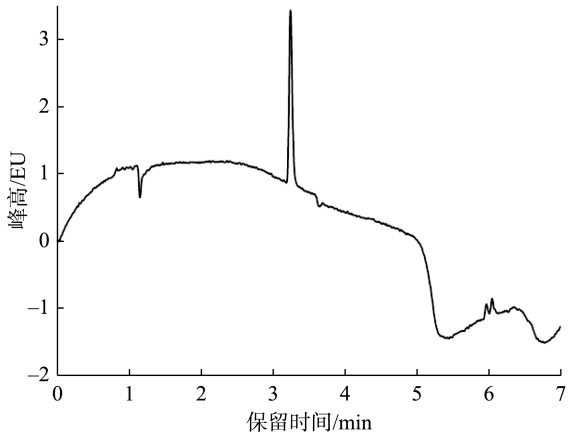


图 1　维生素 B_1 标准色谱图

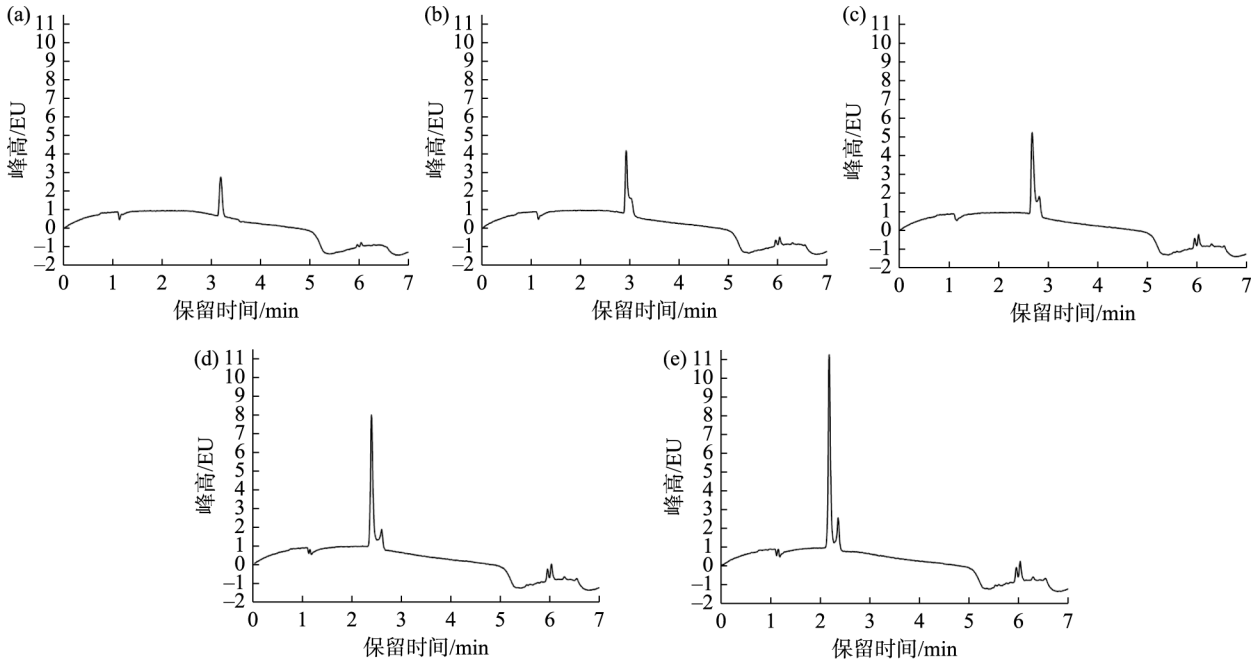
Fig.1　Chromatographic separation diagrams of vitamin B_1

同时, 在实验过程中发现, 以正丁醇为提取溶剂时, 进样体积的大小对色谱峰形的影响较为严重, 当进样体积为 1 μL 时, 色谱峰形较好, 峰较为尖锐。随着进样体积的增大, 色谱峰形逐渐变宽, 甚至出现单峰分裂成两个峰的情况, 具体如图 2 所示, 因此本方法优化的进样体积为 1 μL。

2.2　衍生和萃取条件的优化

2.2.1　称样质量对衍生反应的影响

在碱性条件下, 维生素 B_1 被铁氰化钾氧化成硫色素(噻嘧色素), 在紫外线照射下, 硫色素发射出荧光, 荧光强度与其含量成正比, 此衍生反应属于氧化还原反应, 若实际样品中存在还原性物质, 可能会影响碱性铁氰化钾与维生素 B_1 的衍生化效率, 从而影响了回收率大小。本研究从取样质量、NaOH 浓度、衍生试剂、样品基质类等方面进行了考察。以新鲜枣子为基质样品, 称取不同质量(1~5 g)的枣子样品, 加入维生素 B_1 的标准品, 依据 GB 5009.84—2016 中前处理方法处理, 结果发现, 当枣子的取样量减少时, 在相同的衍生条件下, 其回收率有了显著提升。当枣的取样量为 5 g 时, 样品的加标回收率仅有不到 10%, 当取样量减少到 1 g 时, 回收率上升到了 76.03%。说明枣样中存在基质干扰维生素 B_1 衍生反应的进行, 但若只是一味的减少样品的称样量, 对于一些含量较低的化合物可能存在测定不准确的风险。因此还需要采取其他的方法来降低基质干扰, 提高样品测定的准确性。具体如图 3 所示, 因此本方法优化的称样质量为 3 g。



注: (a)进样 1 μL; (b)进样 2 μL; (c)进样 3 μL; (d)进样 4 μL; (e)进样 5 μL。

图 2 不同进样体积对维生素 B_1 色谱峰的影响

Fig.2 Effects of different injection volumes on the chromatographic peak of vitamin B_1

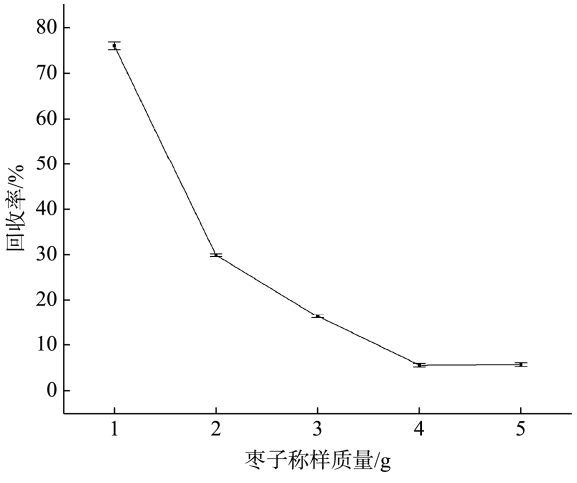


图 3 不同称样质量对枣子中维生素 B_1 测定的影响

Fig.3 Effects of different sample weights on the determination of vitamin B_1 in jujube

2.2.2 NaOH 质量浓度对衍生反应的影响

由于该衍生反应需要在碱性条件下进行, 为了减少枣子样品中维生素 B_1 回收率低的问题, 本研究尝试了不同浓度的 NaOH 溶液对衍生反应的影响。实验结果表明, 在其他条件相同的情况下, 随着 NaOH 质量浓度的增大, 衍生反应的效率逐渐增加, 枣类样品中维生素 B_1 回收率有所改善。当 NaOH 质量浓度小于 20 g/L 时, 衍生反应不进行。当 NaOH 质量浓度逐步增加到 200 g/L, 样品的加标回收率从 0%增加到 37%。但是 NaOH 的浓度过高, 对于色谱柱以及检测仪器损害较大, 而且当 NaOH 质量浓度加到 200 g/L 时加标回收率也仅有 37%, 故而在本研究中不建议使用过高质量浓度的 NaOH 溶液。具体如图 4 所示, 因此本方法优化的 NaOH 质量浓度为 100 g/L。

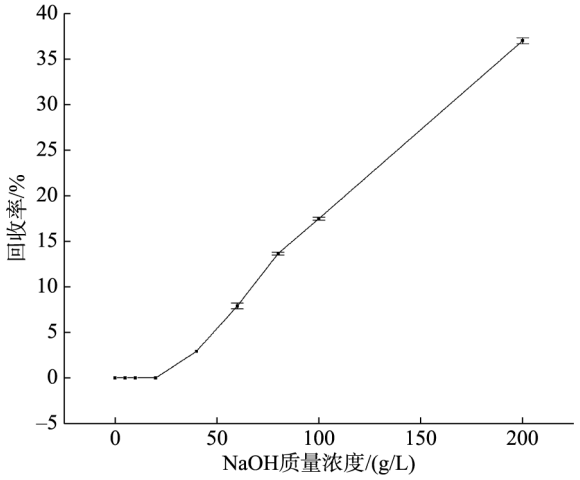


图 4 不同 NaOH 质量浓度对枣子中维生素 B_1 测定的影响

Fig.4 Effects of different NaOH mass concentration on vitamin B_1 determination in jujube

2.2.3 碱性铁氰化钾用量对衍生反应的影响

为了进一步提高枣中维生素 B_1 的衍生效率, 本研究加入不同体积的碱性铁氰化钾, 以使样品溶液中待测物能够被充分的衍生化。实验结果表明, 当碱性铁氰化钾体积从 1 mL 增加至 6 mL 时, 枣中维生素 B_1 的回收率从 14.6%增加到了 84.8%, 衍生效率提升较为显著。相较于一味增

加 NaOH 的浓度，此方法更加安全且效果显著。但是当衍生试剂的量增加至 8 mL 时，回收率又呈现一定的下降趋势。这可能是由于当加入的碱性铁氰化钾含量过高时，虽然能够将待测组分完全衍生化，但是由于溶液总体积较大，2 mL 的正丁醇无法将衍生产物完全提取出来，待测物的回收率低。具体如图 5 所示，因此本方法优化的碱性铁氰化钾体积为 6 mL。

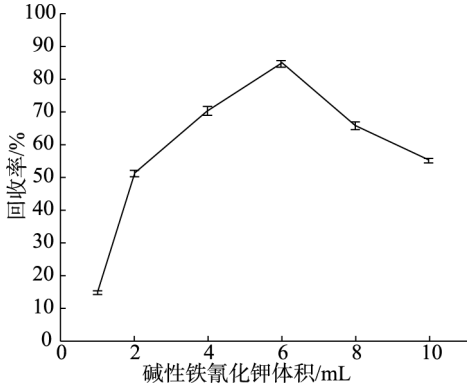


图 5　不同碱性铁氰化钾用量对枣子中维生素 B_1 测定的影响

Fig.5　Effects of different alkaline potassium ferricyanide dosage on vitamin B_1 determination in jujube

2.2.4　不同样品基质对衍生反应的影响

为了进一步探究在其他样品基质中是否也存在类似的基质干扰问题，本研究尝试了不同的样品基质类型，主要包含西兰花、芹菜、猪肉、牛肉、繁昌蜜枣、金丝琥珀蜜枣。实验结果表明，西兰花、芹菜、猪肉、牛肉基质类样品对于维生素 B_1 的衍生反应几乎没有影响，这 4 种基质的加标回收率分别为 86.6%、97.3%、104.2%、102.3%。而对于两种枣类基质，其回收率与先前所做的新鲜冬枣样品几乎类似，均小于 20%。具体如图 6 所示。因此，本研究将研究的重点放在了水果类基质样品上。

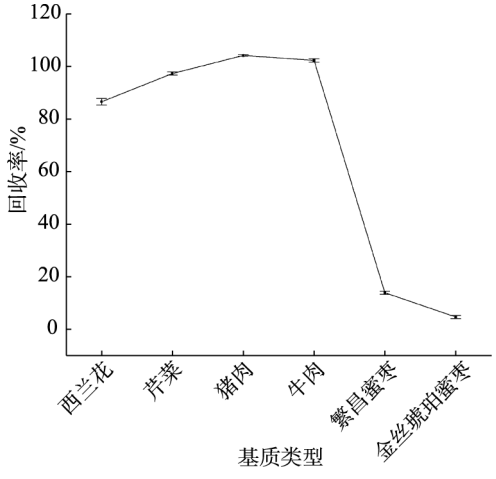


图 6　不同样品基质对维生素 B_1 测定的影响

Fig.6　Effects of different sample matrices on the determination of vitamin B_1

实验进一步验证其他水果基质中是否也存在提取效率低的问题。选择较为常见且维生素 C 等还原性物质含量较高的水果作为基质，并采用标准加入法进行实验验证。通过加入不同体积的碱性铁氰化钾，以优化最佳的衍生试剂用量，并在最佳衍生试剂用量下测定不同样品基质的本底值，以扣除本底计算值加标回收率，如图 7 所示。从图 7 可以发现，部分水果基质对于维生素 B_1 的测定干扰较大，如枣、草莓、猕猴桃等，低剂量的衍生试剂回收率较低，无法衍生完全，随着碱性铁氰化钾加入量的增加，回收率逐渐上升。但也有部分水果基质对于维生素 B_1 的测定干扰较小，如耙耙柑、葡萄等，在低剂量的衍生试剂条件下回收率已经达到了 70%~80%。不同水果基质在碱性铁氰化钾用量为 6 mL 时都能够取得较好的回收率，因此本实验将其用量固定在 6 mL。

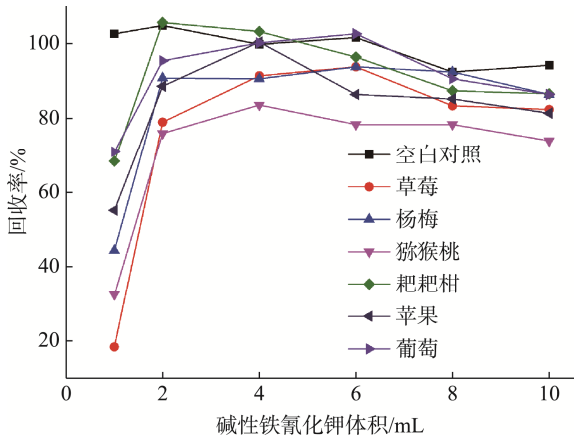


图 7　不同碱性铁氰化钾体积对不同水果基质中维生素 B_1 测定回收率的影响

Fig.7　Effects of different volumes of alkaline ferricyanide on the recovery rate of vitamin B_1 determination in different fruit matrices

2.2.5　提取溶剂的优化

通过调研相关文献[30–31]以及相似相溶的原理，本研究选取了正丁醇、正戊醇、乙酸乙酯以及乙酸丁酯作为提取溶剂。实验结果显示正丁醇和正戊醇的提取效果相对较好，且正丁醇的提取效率略优于正戊醇，而乙酸乙酯和乙酸丁酯作为提取溶剂时回收率相对较差，故而本方法选取正丁醇作为实验的提取溶剂。

2.3　方法学验证

2.3.1　线性方程、检出限和定量限

采用优化的实验条件，按照 1.3.1 节配制标准系列溶液，上机测定。然后以其质量浓度(X, μg/mL)为横坐标，对应的色谱峰面积(Y)为纵坐标，依次绘制维生素 B_1 的标准曲线。同时，采用空白样品为基质，添加混合标准液，分别以 3 倍和 10 倍的信噪比计算方法的检出限(limit of detection, LOD)和定量限(limit of quantitation, LOQ)。维生

素 B_1 在 0.05~1.00 μg/mL 范围内都具有较好的线性关系，相关系数(r)均大于 0.9998。该方法的 LOD 为 0.30 mg/kg，LOQ 为 0.80 mg/kg，表明该方法具有较高的灵敏度，能够对水果基质中维生素 B_1 进行准确的定性和定量分析。

2.3.2 方法准确度、精密度和重复性

先通过 2.2 中预实验的方式，筛选出不同水果的最佳铁氰化钾衍生试剂的量。然后依据测定方法的 LOQ 选取低、中、高 3 个水平进行加标实验，每个加标浓度点进行 6 次平行测定，以此计算本方法的加标回收率及精密度，具体结果如表 1 所示。不同水果在 3 个不同水平的加标回收率在 79.6%~112.0%之间，RSDs 在 0.9%~4.7% (n=6)之间。结果表明本研究所建立测定方法的准确度和精密度满足不同水果样品中维生素 B_1 的测定要求。

表 1 不同水果的加标回收率及 RSDs (n=6)
Table 1 Average recoveries and RSDs of different fruits (n=6)

基质类型	本底浓度/(mg/kg)	加标浓度/(mg/kg)	平均回收率/%	RSDs/%
枣子	ND	0.80	106.0	3.8
		1.60	80.0	3.0
		8.00	79.6	2.5
草莓	ND	0.80	112.0	2.0
		1.60	104.0	2.5
		8.00	98.8	1.5
杨梅	ND	0.80	87.3	2.8
		1.60	86.2	4.7
		8.00	106.3	0.9
猕猴桃	ND	0.80	90.7	3.0
		1.60	84.3	1.4
		8.00	88.2	1.7
耙耙柑	0.48	0.80	83.3	4.3
		1.60	101.0	1.9
		8.00	104.1	1.8
苹果	ND	0.80	105.3	3.5
		1.60	103.7	1.7
		8.00	102.7	1.9
葡萄	ND	0.80	92.7	4.2
		1.60	102.3	3.4
		8.00	103.6	0.9

注：ND 为小于检出限；回收率=(实测值-本底值)/加标值×100%；RSD 为相对标准偏差(relative standard deviation)。

同时，称取了 6 份同一种水果的平行样品，按照上述实验条件进行样品的提取，衍生以及上机测试。实验结果表明，在该样品中维生素 B_1 的 RSDs 均小于 5%，说明方法的重复性较好。

2.4 实际样品测定

利用本方法对 30 份实际样品(20 份水果、5 份蔬菜、5 份鲜肉)、质控样品(乳粉基质)中维生素 B_1 的含量进行了检测，其中肉类样品中维生素 B_1 含量范围为 2.1~8.0 mg/kg，蔬菜类样品为 LOD~0.40 mg/kg，水果类样品为 LOD~0.48 mg/kg，质控样品中维生素 B_1 的测定值均值为 13.39 mg/kg [n=4，特征值为(13.36±0.32) mg/kg]，测定值在质控范围内。同时，采用 GB 5009.84—2016 对上述样品进行测定，结果表明，肉类样品、蔬菜样品与质控样品的测定结果没有显著性差异，水果样品中维生素 B_1 的结果偏低。因此，降低水果类样品中的基质干扰效应，提高水果类样品中维生素 B_1 的衍生化效率，建立准确测定水果中维生素 B_1 含量的方法意义重大。

3 结 论

本研究针对水果中维生素 B_1 检测结果及加标回收率偏低的问题，系统探究了实验过程中的关键影响因素并优化实验方法，建立了一种超高效液相色谱法测定水果基质中维生素 B_1 含量的分析方法。实验通过优化色谱条件，以及减少样品的进样体积，能够显著改善维生素 B_1 的峰形，使得维生素 B_1 的定性和定量分析更加准确。同时，为了提高水果基质中维生素 B_1 的衍生效率和提取效率，以减少取样量、改变 NaOH 浓度以及增加衍生试剂碱性铁氰化钾体积的方式，使得不同水果基质中维生素 B_1 的加标回收率都能够得到显著的提升。本方法为水果中维生素 B_1 的快速检测提供了新的思路和技术支持。在后续研究中，可深入分析水果基质内各种化合物对维生素 B_1 测定结果准确性的影响，探究水果基质中干扰维生素 B_1 检测准确度的具体物质。

参考文献

[1] 王海燕, 高文超, 张会亮, 等. 婴儿配方乳粉中维生素 B_1、B_2 含量测定能力验证[J]. 食品安全质量检测学报, 2020, 11(1): 77–81.
Wang Haiyan, Gao Wenchao, Zhang Huiliang, et al. Proficiency testing for determination of vitamin B_1 and B_2 content in infant formula milk powder [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2020, 11(1): 77–81.

[2] 杨黎, 文丽, 韦春梦, 等. HPLC 与 UPLC-MS/MS 测定 FAPAS 液体维生素补充剂能力验证样品中的维生素 B_1[J]. 食品与药品, 2023, 25(6): 547–551.
Yang Li, Wen Li, Wei Chunmeng, et al. Determination of vitamin B_1 in FAPAS liquid vitamin supplement proficiency test samples by HPLC and UPLC-MS/MS [J]. Food and Drug, 2023, 25(6): 547–551.

[3] Nguyen H D, Oh H, Kim M S. Mixtures modeling identifies vitamin B_1 and B_3 intakes associated with depression [J]. Journal of Affective Disorders, 2022, 301: 68–80.

[4] Abdullah K M, Arefeen A, Shamsi A, et al. Insight into the *in vitro*

antiglycation and *in vivo* antidiabetic effects of thiamine: implications of vitamin B_1 in controlling diabetes [J]. ACS Omega, 2021, 6(19): 12605–12614.

[5] 何宇纳, 王竹, 赵丽云, 等. 2010—2012 年中国居民膳食维生素摄入状况[J]. 营养学报, 2017, 39(2): 112–115.
He Yu'na, Wang Zhu, Zhao Liyun, et al. Dietary vitamin intake status of Chinese residents from 2010 to 2012 [J]. Acta Nutrimenta Sinica, 2017, 39(2): 112–115.

[6] 张晓娜, 校瑞, 牛家华, 等. HPLC 同时测定维生素 B 片中 4 种水溶性维生素的含量[J]. 河南大学学报(自然科学版), 2016, 46(5): 583–625.
Zhang Xiaona, Xiao Rui, Niu Jiahua, et al. Simultaneous determination of four water-soluble vitamins in vitamin B tablets by HPLC [J]. Journal of Henan University (Natural Science Edition), 2016, 46(5): 583–625.

[7] 解瑞辉. HPLC 与 UV 法测定维生素 B_1 注射液中维生素 B_1 含量的比较[J]. 海峡药学, 2017, 29(8): 47–49.
XIE Ruihui. Comparison of HPLC and UV methods for determination of vitamin B_1 content in vitamin B_1 injection [J]. Strait Pharmaceutical Journal, 2017, 29(8): 47–49.

[8] 张进, 吴心雨, 刘利. 漫反射红外光谱法测定片剂中维生素 B_1[J]. 分析试验室, 2017, 36(7): 850–854.
ZHANG Jing, WU Xinyu, Liu Li. Determination of vitamin B_1 in tablets by diffuse reflectance infrared spectroscopy [J]. Chinese Journal of Analysis Laboratory, 2017, 36(7): 850–854.

[9] 张惠. 姜黄素、绿原酸和硫胺素的荧光检测新方法研究[D]. 重庆. 西南大学, 2018: 9–12.
Zhang Hui. Study on new fluorescence detection methods for curcumin, chlorogenic acid and thiamine [D]. Chongqing. Southwest University, 2018: 9–12.

[10] 黄旭, 贾宏新, 李辉. 荧光分光光度法测定营养素补充剂中硫胺素含量的测量不确定度评定[J]. 食品科学, 2015, 36(10): 174–178.
Huang Xu, Jia Hongxin, Li Hui. Evaluation of measurement uncertainty for determination of thiamine content in nutrient supplements by fluorescence spectrophotometry [J]. Food Science, 2015, 36(10): 174–178.

[11] 王欢, 刘雯, 朱参胜, 等. 荧光法测定尿中维生素 B_1 的改进研究[J]. 中国卫生检验杂志, 2010, 20(12): 3500–3501.
Wang Huan, Liu Wen, Zhu Cansheng, et al. Improved study on determination of vitamin B_1 in urine by fluorescence method [J]. Chinese Journal of Health Laboratory Technology, 2010, 20(12): 3500–3501.

[12] 谢志鹏, 蔡定建, 钟华, 等. 流动注射电化学发光分析法测定维生素 B_1 及在尿液分析中的应用[J]. 分析试验室, 2006(9): 64–67.
Xie Zhipeng, Cai Dinjian, Zhong Hua, et al. Determination of vitamin B_1 by flow injection electrochemiluminescence and its application in urine analysis [J]. Chinese Journal of Analysis Laboratory, 2006(9): 64–67.

[13] 陈小利, 马红燕, 张琰图, 等. 流动注射电化学发光测定维生素 B_1 的研究[J]. 理化检验(化学分册), 2004(6): 317–319.
Chen Xiaoli, Ma Hhongyan, Zhang Yantu, et al. Study on determination of vitamin B_1 by flow injection electrochemiluminescence [J]. Physical Testing and Chemical Analysis (Part B: Chemical Analysis), 2004(6): 317–319.

[14] 姜小梅, 龚子珊, 汪曦. 高效液相色谱-串联质谱法同时测定人全血中硫胺素及其 2 种磷酸酯的浓度[J]. 中国临床药理学杂志, 2021, 37(19): 2691–2694.
Jiang Xiaomei, Gong Zishan, Wang Yan. Simultaneous determination of thiamine and its two phosphate esters in human whole blood by high performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry [J]. The Chinese Journal of Clinical Pharmacology, 2021, 37(19): 2691–2694.

[15] 任强强, 赵优琴, 许文, 等. UHILIC-MS/MS 法同时测定复方三维右旋泛酸钙糖浆中 5 种维生素的含量[J]. 药学实践杂志, 2018, 36(6): 512–517.
Ren Qiangqiang, Zhao YouQin, Xu Wen, et al. Simultaneous determination of five vitamins in compound trivitamin and calcium pantothenate syrup by UHILIC-MS/MS [J]. Journal of Pharmaceutical Practice, 2018, 36(6): 512–517.

[16] 江振作, 陈从艳, 田天, 等. 同位素稀释-超高效液相色谱串联质谱法测定人体血清/全血中维生素 B_1[J]. 临床检验杂志, 2016, 34(12): 919–923.
Jiang Zhenzuo, Chen Congyan, Tian Tian, et al. Determination of vitamin B_1 in human serum/whole blood by isotope dilution-ultra high performance liquid chromatography tandem mass spectrometry [J]. Chinese Journal of Clinical Laboratory Science, 2016, 34(12): 919–923.

[17] 王兴龙, 刘少颖, 姚远, 等. 超高效液相色谱-串联质谱法测定植物蛋白中 9 种水溶性维生素[J]. 卫生研究, 2025, 54(5): 820–826, 832.
Wang XingLong, Liu Shaoying, Yao Yuan, et al. Determination of nine water-soluble vitamins in plant protein by ultra-high performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry [J]. Journal of Hygiene Research, 2025, 54(5): 820–826, 832.

[18] 李春阳, 杨子忠, 程倩, 等. 反相高效液相色谱法测定多维片中维生素 B_1 的含量[J]. 中国食品添加剂, 2023, 34(8): 302–306.
Li Chunyang, Yang Zizhong, Cheng Qian, et al. Determination of vitamin B_1 in multivitamin tablets by reversed-phase high performance liquid chromatography [J]. China Food Additives, 2023, 34(8): 302–306.

[19] 马俊奇. 两种高效液相色谱法测定维生素 B_1 含量的比较[J]. 中国药品标准, 2020, 21(3): 269–273.
Ma Junqi. Comparison of two high performance liquid chromatography methods for determination of vitamin B_1 content [J]. Drug Standards of China, 2020, 21(3): 269–273.

[20] 张隆龙, 王海燕, 胡越, 等. 高效液相色谱法测定婴幼儿配方乳粉中的维生素 B_1、维生素 B_2[J]. 食品安全质量检测学报, 2019, 10(1): 129–134.
Zhang Longlong, Wang Haiyan, Hu Yue, et al. Determination of vitamin B_1 and vitamin B_2 in infant formula milk powder by high performance liquid chromatography [J]. Journal of Food Safety and Quality, 2019, 10(1): 129–134.

[21] 李彩霞, 苏智阳, 袁文杰. HPLC 法测定维生素 B 族片中 3 种组分的含量[J]. 海峡药学, 2017, 29(6): 54–57.
Li Caixia, Su Zhiyang, Yuan Wenjie. Determination of three components in vitamin B complex tablets by HPLC [J]. Strait Pharmaceutical Journal, 2017, 29(6): 54–57.

[22] 杨静, 刘春丽, 胡杰, 等. 超高效液相色谱法快速测定食品营养补充剂

中维生素 B_1、维生素 B_2 和维生素 B_9 的含量[J]. 食品安全导刊, 2024, (32): 63–67.
Yang Jin, Liu Chunli, Hu Jie, et al. Rapid determination of vitamin B_1, vitamin B_2 and vitamin B_9 in food nutritional supplements by ultra-high performance liquid chromatography [J]. China Food Safety Magazine, 2024(32): 63–67.

[23] 唐雯, 黄媛. 高效液相色谱-荧光法测定饲料中维生素 B_1 和维生素 B_2[J]. 中国饲料, 2024(3): 113–117.
Tang Wen, Huang Yuan. Determination of vitamin B_1 and vitamin B_2 in feed by high performance liquid chromatography-fluorescence method [J]. China Feed, 2024(3): 113–117.

[24] 纪赟, 万宁, 田振, 等. 超高效液相色谱法测定乳粉中维生素 B1 的前处理条件优化[J]. 食品安全质量检测学报, 2026, 17(8): 347–353.
Ji Yun, Wan Ning, Tian Zhen, et al. Optimization of pretreatment conditions for determination of vitamin B_1 in milk powder by ultra-high performance liquid chromatography [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2026, 17(8): 347–353.

[25] 方海兰, 陈茂邦, 黄会转. 高效液相色谱法检测维生素 B1 片中主药含量的研究[J]. 品牌与标准化, 2026(1): 36–40.
Fang Hailan, Chen Maobang, Huang Huizhuan. Study on determination of main component in vitamin B1 tablets by high performance liquid chromatography [J]. Brand and Standardization, 2026(1): 36–40.

[26] 耿颖, 黄慧芬, 魏宁漪, 等. HPLC法同时测定复合维生素B注射液中4种成分的含量[J]. 中国新药杂志, 2025, 34(15): 1647–1653.
Geng Ying, Huang Huifen, Wei Ningyi, et al. Simultaneous determination of four components in compound vitamin B injection by HPLC [J]. Chinese Journal of New Drugs, 2025, 34(15): 1647–1653.

[27] 江汝泳, 陈瑾, 周家昌, 等. 一种用于同时检测咖啡因和B族维生素的HPLC-DAD 方法的开发和验证[J]. 食品工业, 2026, 47(2): 301–306.
Jiang Ruyong, Chen Jin, Zhou Jiachang, et al. Development and validation of an HPLC-DAD method for simultaneous determination of caffeine and B vitamins [J]. Food Industry, 2026, 47(2): 301–306.

[28] 刘正, 刘亚兵, 李婧, 等. 高效液相色谱法测定配方奶粉和乳饮料中维生素 B_1、B_2 的研究[J]. 农业科技与信息, 2018(23): 46–48.
Liu Zheng, Liu Yabing, Li Jing, et al. Determination of vitamin B_1 and B_2 in formula milk powder and milk beverage by high performance liquid chromatography [J]. Agricultural Science-Technology and Information, 2018(23): 46–48.

[29] 李猛, 陈美君. 高效液相色谱法测定婴幼儿配方奶粉中维生素 B_1 含量的两种前处理方法比较[J]. 中国乳品工业, 2021, 49(3): 52–56.
Li Meng, Chen Meijun. Comparison of two pretreatment methods for determination of vitamin B_1 content in infant formula milk powder by high performance liquid chromatography [J]. China Dairy Industry, 2021, 49(3): 52–56.

[30] 陈鼎雄, 黄诗亮. HPLC 测定复方地巴唑氢氯噻嗪胶囊中 8 种组分的含量[J]. 中国药学杂志, 2009, 44(17): 1346–1349.
Chen Dingxiong, Huang Shiliang. Determination of eight components in compound dibazol and hydrochlorothiazide capsules by HPLC [J]. Chinese Pharmaceutical Journal, 2009, 44(17): 1346–1349.

[31] 梁敏. 快速测定婴幼儿配方乳粉中的维生素 B_1 及 B_2[J]. 中国乳品工业, 2022, 50(1): 56–59, 64.
Liang Min. Rapid determination of vitamin b1 and vitamin b2 in infant milk powder [J]. China Dairy Industry, 2022, 50(1): 56–59, 64.

(责任编辑: 曹岱琳 蔡世佳)