DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20251119001
引用格式: 纪赟, 万宁, 田振, 等. 超高效液相色谱法测定乳粉中维生素 B_1 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 Y, WAN N, TIAN Z, *et al*. Optimization of pretreatment conditions for determination of vitamin B_1 in milk powder by ultra performance liquid chromatography [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2026, 17(8): 347–353. (in Chinese with English abstract).

超高效液相色谱法测定乳粉中维生素 B_1 的前处理条件优化

纪 赟, 万 宁, 田 振, 王玉树, 宋 飞*
(圣元营养食品有限公司, 青岛 266400)

摘 要: 目的 优化婴幼儿配方乳粉中维生素 B_1 (vitamin B_1, VB_1)的检测方法。**方法** 利用超高效液相色谱仪测定不同基质样品中 VB_1 的含量, 分析水解冷却时间、水解温度、生产工艺、酶溶液、原料基质对检测结果的影响, 对婴幼儿配方乳粉中 VB_1 检测的前处理进行优化。**结果** 检测流程准确可靠, 无乳粉基质的 VB_1 标准溶液回收率达到 94.3%~102.0%; 水解冷却时间、生产工艺及混合酶溶液对 VB_1 检测结果及回收率均无显著影响(P>0.05); 水解温度与乳粉基质是导致检测结果偏低的关键协同因素, 常温水解的 VB_1 检测结果及回收率显著高于高温水解(P<0.01), 且混合粉在高温水解后回收率显著下降(P<0.05)。**结论** 优化后的常温水解方法, 省去高压水解操作, 简化了前处理流程, 且加标回收率接近 100%, 该方法适用于婴幼儿配方乳粉中 VB_1 的高效批量检测。

关键词: 维生素 B_1; 婴幼儿配方乳粉; 回收率; 高温水解; 常温水解

Optimization of pretreatment conditions for determination of vitamin B_1 in milk powder by ultra performance liquid chromatography

JI Yun, WAN Ning, TIAN Zhen, WANG Yu-Shu, SONG Fei*
(*Synutra Nutritional Food Co*., *Ltd*., *Qingdao* 266400, *China*)

ABSTRACT: Objective To optimize the detection method for vitamin B_1 (VB_1) in infant formula milk powder. **Methods** The content of VB_1 in different matrix samples was determined by ultra performance liquid chromatography. The effects of hydrolysis cooling time, hydrolysis temperature, production process, enzyme solution and raw material matrix on the detection results were analyzed to optimize the pretreatment for VB_1 detection in infant formula milk powder. **Results** The detection process was accurate and reliable, with recovery rates of 94.3% to 102.0% for VB_1 standard solutions without milk powder matrix. Hydrolysis cooling time, production process and mixed enzyme solution had no significant effect on VB_1 detection results and recovery rate (P>0.05). Hydrolysis

收稿日期: 2025-11-19
第一作者: 纪赟(1983—), 女, 硕士, 工程师, 主要研究方向为食品安全检测。E-mail: jiyun@shengyuan.com.cn
***通信作者:** 宋飞(1985—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为食品生物技术。E-mail: songfei@shengyuan.com.cn

temperature and milk powder matrix were key synergistic factors causing lower detection results. VB_1 detection results and recovery rate from room-temperature hydrolysis were significantly higher than those from high-temperature hydrolysis (P<0.01). Furthermore, recovery rate of mixed powders decreased significantly after high-temperature hydrolysis (P<0.05). **Conclusion** The optimized ambient-temperature hydrolysis method eliminates high-pressure hydrolysis operations, simplifies pretreatment procedures and achieves spiked recovery rates approaching 100%. This method is suitable for the efficient batch detection of VB_1 in infant formula milk powder.

KEY WORDS: vitamin B_1; infant formula milk powder; recovery rate; high-temperature hydrolysis; room-temperature hydrolysis

0 引 言

维生素 B_1 (vitamin B_1, VB_1)又称硫胺素，是一种水溶性维生素，由氨基嘧啶和噻唑环通过亚甲基桥连接组成[1]。VB_1 是人体必需的营养物质，在碳水化合物代谢、维持神经、肌肉特别是心肌的正常功能和预防脚气、关节炎以及维持正常食欲、胃肠蠕动和消化分泌等方面中起着至关重要的作用[2−7]。VB_1 缺乏易导致神经-血管系统损伤，包括心血管症状和神经性障碍[8−11]，也会加剧肥胖、糖尿病和脂肪肝等疾病，导致婴幼儿大脑受损甚至死亡[12−13]，但是过量摄入也会导致消化功能失调，严重危害人体健康[14]。因 VB_1 自身无法主动合成，牛奶中的含量也微乎其微，因此，VB_1 是婴幼儿配方乳粉生产过程中必须添加的营养强化剂[15]。婴幼儿配方乳粉作为母乳的主要替代品，准确定量其中的 VB_1 对婴幼儿的健康成长至关重要。

目前，VB_1 常见的检测方法为高效液相色谱法[16−20]、荧光分光光度法[21−22]、化学发光法[23]、液相色谱-串联质谱法[24−27]。GB 5009.84—2016《食品安全国家标准 食品中维生素 B_1 的测定》采用高效液相色谱法，样品前处理经过稀盐酸介质中恒温水解、中和再酶解，水解液用碱性铁氰化钾溶液衍生，正丁醇萃取后，经 C_{18} 反相色谱柱分离，用高效液相色谱-荧光检测器检测，外标法定量实现测定。该方法总耗时较长，需要使用灭菌锅等存在安全风险的仪器，不适用于实际工作中的批量检测。并且，本实验室实际检测中发现，婴幼儿配方成品样品 VB_1 检测结果及回收率出现低于理论值的现象，加标回收率仅为 81.2%~87.7%。此前也有报道对 VB_1 回收率较低的问题进行了研究，包括优化流动相比例、亚铁氰化钾和氢氧化钠浓度等，但优化步骤仅聚焦上机检测过程和衍生条件，未对水解步骤进行详细阐述[28]。刘爱红等[29]的优化过程也只包括流动相的选择和衍生与否。吕晨等[30]比较了高压灭菌和沸水浴 2 种方法对 VB_1 含量的影响，并对酶解时加入酶的种类进行了考察，缩短了样品前处理过程，但仍经过高温处理，需要降温后再进行后续操作，优化后方法回收率仅为 86.0%~94.6%。为此，本研究通过加标回收方式，从水解冷却方式、水解温度、生产工艺、混合酶溶液及基粉配料等方面探究导致检测结果和加标回收率偏低原因，对 VB_1 样品前处理过程进行优化，为食品中不稳定营养素的检测方法优化提供了温和化前处理的新思路，丰富了高效液相色谱法在食品营养检测领域的应用场景与技术方案，在应用中提升了批量检测的经济性与可行性，为检测机构日常检测工作提供参考，对推动婴幼儿配方乳粉行业质量提升、保障婴幼儿健康成长具有重要且深远的意义。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

婴儿配方奶粉、全脂粉、脱脂粉、混合粉 1(乳清粉:全脂粉:脱脂粉=800:50:50, *m*:*m*:*m*)、混合粉 2(混合粉 1:复配维生素为 900:1.5, *m*:*m*)(圣元营养食品有限公司)；婴幼儿配方乳粉中 B 族维生素分析质控样品(GY-QCM-06-3003A，国研标物科技有限公司)。

盐酸(优级纯，成都市科隆化学品有限公司)；乙酸钠(优级纯，成都市科龙化工试剂厂)；冰乙酸(优级纯)、甲醇、正丁醇(色谱纯)(天津市科密欧化学试剂有限公司)；木瓜蛋白酶(酶活力 801 U/mg，上海源叶生物技术有限公司)；高峰淀粉酶(酶活力 253 U/mg)、盐酸硫胺素(纯度≥99.0%)(美国 Sigma 公司)；氢氧化钠(分析纯，青岛三药生物科技有限公司)；铁氰化钾(分析纯，天津市光复精细化工研究)；氯化钙(分析纯，西陇科学股份有限公司)。

1.2 仪器与设备

AUW220D 电子天平(精度 0.01 g/0.001 g，日本岛津公司)；YXQ-LB-50SII立式压力蒸汽灭菌锅(上海博迅医疗生物仪器股份有限公司)；DH6000A 恒温培养箱(天津市泰斯特仪器有限公司)；Allegra C-34R 高速冷冻离心机(苏州贝克曼库尔特科技有限公司)：FE28 pH 计(上海梅特勒-托利多仪器有限公司)；MS3BS025 涡旋振荡器(德国 IKA 公司)；Milli-Q 去离子水发生器(美国 Millipore 公司)；ACQUITY H-class UPLC 超高效液相色谱仪(配有 FLR Detector 荧光检测器，美国 Waters 公司)；Omni Orca C_{18} 柱(100 mm×2.1 mm, 3 μm，美国 OmniGene LLC 公司)。

1.3　实验方法

1.3.1　溶液的配制

VB_1 标准储备液(质量浓度 500 μg/mL): 准确称取经氯化钙干燥 24 h 的盐酸硫胺素标准品 63.5 mg(精确至 0.1 mg), 相当于 50 mg 硫胺素, 用 0.01 mol/L 盐酸溶液溶解并定容至 100 mL, 摇匀。

盐酸溶液(0.1 mol/L): 移取 8.5 mL 盐酸, 加水稀释至 1000 mL, 摇匀。

乙酸钠溶液(2.0 mol/L): 准确称取 27.2 g 无水乙酸钠, 用水溶解并定容至 100 mL, 摇匀。

乙酸钠溶液(0.05 mol/L): 称取 6.80 g 乙酸钠, 加 900 mL 水溶解, 用冰乙酸调 pH 为 4.0~5.0 之间, 加水定容至 1000 mL。经 0.45 μm 微孔滤膜过滤后使用。

氢氧化钠(100 g/L): 称取 25 g 氢氧化钠, 用水溶解并定容至 250 mL, 摇匀。

铁氰化钾(20 g/L): 称取 2 g 铁氰化钾, 用水溶解并定容至 100 mL, 摇匀。临用前配制。

碱性铁氰化钾溶液: 将 200 mL 氢氧化钠溶液(100 g/L)与 5 mL 铁氰化钾溶液(20 g/L)混合, 摇匀。

混合酶溶液I: 称取 1.76 g 木瓜蛋白酶、1.27 g 高峰淀粉酶, 加水定容至 50 mL, 涡旋混匀, 使呈混悬状态。

混合酶溶液II: 称取 2.50 g 木瓜蛋白酶、2.50 g 高峰淀粉酶, 加水定容至 50 mL, 涡旋混匀, 使呈混悬状态。

1.3.2　样品的前处理

(1)试样提取

高温水解: 称取 3 g 试样于 100 mL 棕色锥形瓶中, 加入 0.1 mol/L 的盐酸溶液 60 mL, 涡旋混匀, 盖上锡纸盖子, 121 ℃高压灭菌 30 min, 水解结束后待冷却至 40 ℃以下取出, 轻摇数次, 用 2.0 mol/L 乙酸钠溶液调节 pH 至 4.0 左右, 加入 2.0 mL 混合酶溶液, 摇匀后, 置于培养箱中 37 ℃过夜(约 16 h); 将酶解液全部转移至 100 mL 容量瓶中, 用水定容至刻度, 摇匀, 过滤至试管中, 取上清液备用。

常温水解: 称取 3 g 试样于 100 mL 棕色锥形瓶中, 加入 0.1 mol/L 的盐酸溶液 60 mL, 涡旋混匀, 盖上锡纸盖子后, 常温放置 30 min, 其他步骤同高温水解。

(2)试样衍生化

准确移取 5 mL 上述上清液于 25 mL 试管中, 加入 2.5 mL 碱性铁氰化钾溶液, 涡旋混匀, 准确加入 5.0 mL 正丁醇, 涡旋萃取 3.0 min 后 4000 r/min 离心 2 min 后吸取正丁醇相(上层)经 0.45 μm 有机微孔滤膜过滤, 取滤液于 2 mL 棕色进样瓶中, 上机分析。

1.3.3　液相色谱条件

色谱柱: Omni Orca C_{18} 柱(100 mm×2.1 mm, 3 μm); 检测波长: 激发波长 375 nm, 发射波长 435 nm; 柱温: 30 ℃; 进样体积: 5 μL; 流速: 0.3 mL/min; 流动相: 0.05 mol/L 乙酸钠溶液-甲醇(65:35, *V*:*V*)。

1.4　数据处理

每个样品至少重复测定 3 次, 采用 GraphPad Prism 8.0 统计分析软件对实验数据进行显著性差异分析和图表编辑, 当 $P<0.05$ 时, 差异显著, $P>0.05$ 时, 差异不显著。

2　结果与分析

2.1　标准溶液回收实验结果

为探究 VB_1 回收率偏低是否是过程因素导致的, 选择一个婴幼儿配方成品加标检测, 同时使用 VB_1 标准溶液按照试样提取与衍生相同步骤进行检测, 计算回收率, 考察不添乳粉基质的 VB_1 标准物质的回收率是否也存在回收率偏低问题, 结果见表 1。由结果可知, 婴幼儿配方成品回收率为 81.2%~87.7%, 均低于 90%, 标准溶液回收率在 94.3%~102.0%。按照 GB/T 27404—2008《实验室质量控制规范 食品理化检测》要求, 该加标浓度回收率范围应符合 90%~110%要求。结果表明, 在婴幼儿配方成品样品中存在回收率偏低的问题, 但标准溶液则符合要求, 故分析婴幼儿配方奶粉中可能存在对 VB_1 检测结果产生明显影响的基质。

表 1　加标回收率结果(*n*=6)

Table 1　Results of spiked recovery rate (*n*=6)

检测次数	婴幼儿配方成品`			标准溶液		
	本底值/(mg/100 g)	加标量/(mg/100 g)	回收率/%	理论检测质量浓度/(μg/mL)	实际检测质量浓度/(μg/mL)	回收率/%
1	0.738	2.12	84.8	0.5	0.5104	102.0
2	0.741	2.07	81.2	0.5	0.4813	96.3
3	0.656	2.06	84.7	0.5	0.4927	98.5
4	0.687	2.07	82.9	0.5	0.4916	98.3
5	0.624	2.00	83.5	0.5	0.4713	94.3
6	0.643	2.08	87.7	0.5	0.4770	95.4
RSDs/%	7.25	1.88	2.60	-	2.87	2.83

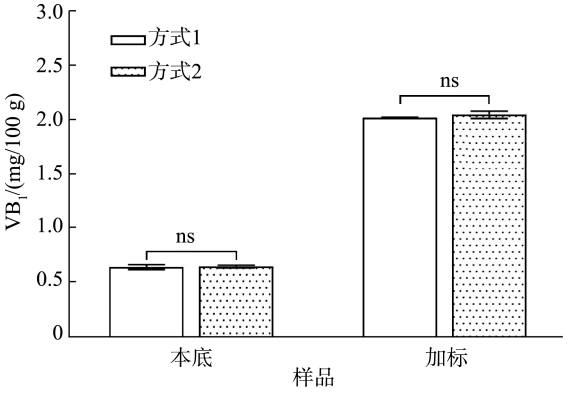
注: 加标液质量浓度 500 μg/mL; 加入体积 100 μL; 检出限为 0.0315 mg/100 g, 定量限为 0.1053 mg/100 g; -表示无此项。

2.2 水解过程对检测结果的影响结果

VB_1 性质不稳定，在中性或碱性条件下易分解，当 pH>7 或受热时，绝大部分甚至全部的 VB_1 分解，虽然其在酸性溶液中较稳定[31–32]，仍怀疑高温水解时间过长是否会影响 VB_1 的检测。所以，选用一个婴幼儿配方成品样品，采用两种水解冷却方式，方式 1 为 121 ℃水解结束后手动放气(从 121 ℃降温到 100 ℃共 8 min)，取出后自来水冷却；方式 2 为 121 ℃水解结束后在灭菌锅内降温(从 121 ℃降温到 40 ℃共 3 h 40 min)，取出后自然冷却，分别检测 VB_1 的含量，结果见图 1。同时，对比高温水解和不经过高温水解对检测结果的影响。因为高温水解的目的是将大分子物质破坏，从而释放出 VB_1，乳粉中的维生素基本来自人为添加，大部分以游离态形式存在，只有小部分被糖或蛋白质等化合物包裹[33]。所以将水解过程优化为更温和的方式，即向样品中加入盐酸溶液后常温放置 30 min。结果如图 2 所示。

由图 1 实验结果可知，121 ℃水解结束后用不同冷却方式对 VB_1 检测结果及回收率均无影响，T 检验无显著性差异(P>0.05)，回收率分别为 84.8%、86.9%。所以，推测 121 ℃水解结束后不同冷却方式不是影响 VB_1 结果含量的原因。但是图 2 结果显示，水解温度对检测结果影响非常明显，无论是本底还是加标，常温水解的检测结果明显高于经过高温水解的样品，同时常温水解的 VB_1 的回收率也高于高温水解的结果，高达 97.9%，更接近于 100%。

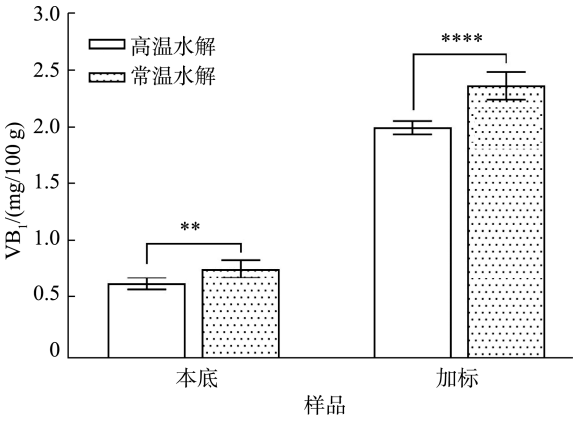
鉴于高温水解与常温水解结果差异显著(P<0.05)，为确定何种条件下获得的测定值更接近真值，选择一个带有证书的婴幼儿配方乳粉基质标准样品(VB_1 特性值为 1 mg/100 g)分别在两种水解温度下进行检测，结果显示



注: ns 表示无显著差异(P>0.05)，图 3~6 同；加标液质量浓度 500 μg/mL，加入体积 100 μL。

图 1 121 ℃水解结束后不同冷却方式对 VB_1 含量及其回收率结果的影响(n=3)

Fig.1 Effects of different cooling methods on VB_1 content and recovery rate following 121 °C hydrolysis (n=3)



注: **表示差异极显著(P<0.01)；****表示差异极高显著(P<0.0001)，图 3、6 同；加标液质量浓度 500 μg/mL，加入体积 100 μL。

图 2 高温水解与常温水解对 VB_1 含量及回收率的影响(n=8)

Fig.2 Effects of high-temperature hydrolysis and room-temperature hydrolysis on VB_1 content and recovery rate (n=8)

经过高温水解的检测结果为 0.833 mg/100 g，常温水解的检测结果为 0.996 mg/100 g，即常温水解的检测结果更接近特性值。

2.3 不同生产工艺对检测结果的影响结果

由表 1 可知，婴儿配方奶粉中 VB_1 检测结果回收率较低，而不含基质的标准溶液检测结果正常。为探究不同水解温度对不同生产工艺婴儿配方奶粉检测结果的影响，选择干法工艺和湿法工艺两种生产工艺制备的婴儿配方奶粉进行检测，检测结果如图 3 所示。产品生产工艺对 VB_1 检测结果无显著影响(P>0.05)；相较于常温水解，经过 121 ℃高温水解后，干法及湿法样品 VB_1 检测结果均明显偏低，因此，生产工艺不是导致 VB_1 高温水解回收率低的原因。

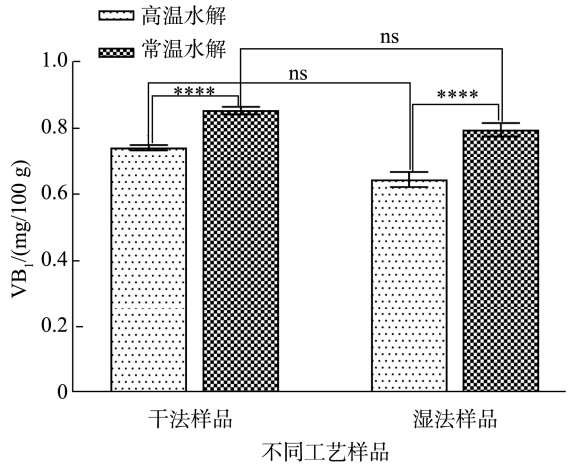


图 3 不同生产工艺样品 VB_1 含量(n=6)

Fig.3 VB_1 content in samples from different production processes (n=6)

2.4　混合酶溶液对检测结果的影响结果

为考察酶解过程是否对 VB_1 检测结果具有影响, 对混合酶溶液进行优化, 适当提高混合酶溶液浓度, 分别对高温水解和常温水解的婴儿配方奶粉样液进行酶解, 检测结果见图 4。由图 4 实验结果可知, 无论是高温水解还是常温水解, 不同混合酶浓度对 VB_1 的检测结果影响较小, T 检验无显著性差异(P>0.05)。但使用同一浓度混合酶溶液, 经高温水解和常温水解后, VB_1 检测结果差异显著(P<0.05)。故混合酶溶液浓度并非影响婴儿配方奶粉 VB_1 回收率偏低的因素。

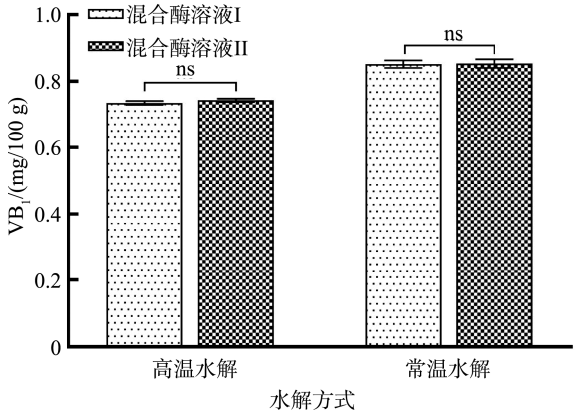


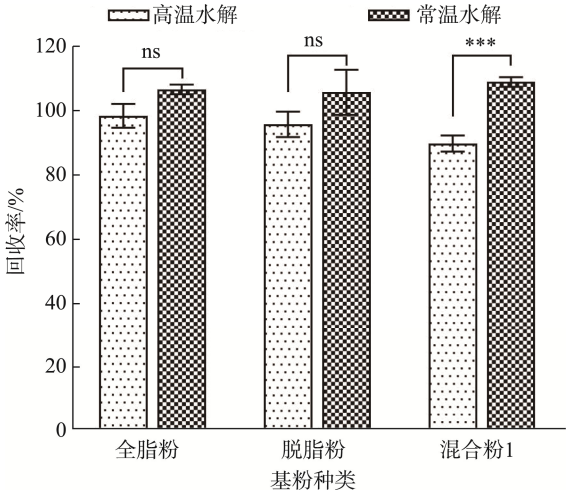
图 4　混合酶溶液对检测结果的影响(n=3)
Fig.4　Effects of mixed enzyme solution on test results (n=3)

2.5　不同基粉原料对检测结果的影响结果

为探究是否存在具体某种成分在成品高温水解过程中对 VB_1 含量的检测产生的影响, 选择婴幼儿配方成品的主要基粉配料(全脂粉、脱脂粉)以及按照婴幼儿配方成品基粉配方比例添加的混合粉进行加标回收实验, 结果见图 5。如图 5 所示, 全脂粉与脱脂粉常温水解的结果比高温水解的结果略高, 但不具有统计学差异, 并且常温水解 VB_1 加标回收率均接近 100%, 而混合粉在高温水解和常温水解下的检测结果差异较大, 混合粉在高温水解后回收率显著下降(P<0.05)。

此外, 对全脂粉、脱脂粉、湿法样品及添加复配维生素的混合粉 2 4 个样品本底进行高温水解和常温水解的检测比对, 检测结果如图 6 所示, 不同配料检测结果与回收率在高温水解和常温水解之间的差异表现一致, 水解方式对全脂粉和脱脂粉没有显著影响(P>0.05), 但对湿法制得样品和干法混合粉均具有显著影响(P<0.0001)。

综上所述, 结合查阅资料分析可知婴幼儿配方奶粉中乳糖和富含赖氨酸的乳清蛋白及酪蛋白含量较高, 高温条件下易发生美拉德反应[34–36]。美拉德反应易生成醛类等物质, 具有氧化性, VB_1 被氧化剂氧化而使其断裂降解, 硫胺或者某些蛋白质能进一步催化 VB_1 的分解[37]。此外, 婴幼儿配方乳粉样品基质复杂, 容易存在杂质干扰, 在调节 pH 时容易出现基质中含有的营养素与目标物发生反应, 导致实验中目标物含量偏低[38]。所以推测成品检测结果及加标回收率偏低是高温水解和样品基质导致的。所以优化后的检测方法不经过高温水解, 无需使用高压灭菌锅, 且高压灭菌锅属于高压设备, 需要专业人员进行操作, 高温水解后样品冷却时间较长, 不便于提高实验效率及批量检测, 优化后的方法检测过程更简便、安全。



注: ***表示差异强极显著(P<0.001); 加标液浓度 50 μg/mL, 加入体积 100 μL。
图 5　不同配料 VB_1 加标回收率结果(n=3)
Fig.5　Results of spiked recovery rates of VB_1 in different ingredients (n=3)

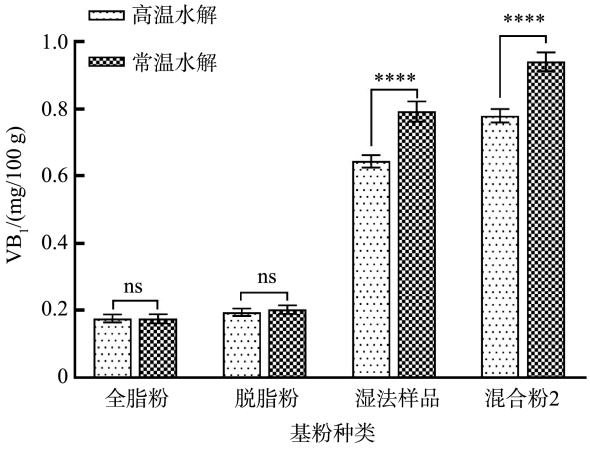


图 6　不同配料 VB_1 含量检测结果(n=7)
Fig.6　Detection results of VB_1 content in different ingredients (n=7)

3　结　论

本研究针对婴幼儿配方乳粉中 VB_1 检测结果及加标回收率偏低(81.2%~87.7%)的问题, 系统探究关键影响因

素并优化检测方法，结果显示：乳粉基质是导致 VB_1 检测回收率偏低的核心原因，而非检测流程本身，不含乳粉基质的 VB_1 标准溶液回收率为 94.3%~102.0%，证实检测流程准确可靠；水解降温方式、产品生产工艺、混合酶溶液浓度对 VB_1 检测结果及回收率均无显著影响(P>0.05)；水解温度与乳粉基质是导致检测结果偏低的关键协同因素，水解温度影响极显著(P<0.05)，混合粉常温水解的检测结果及回收率高于 121 ℃高温水解，全脂粉、脱脂粉在两种水解温度下检测结果无差异(P>0.05)且回收率接近 100%，混合粉在高温水解后回收率显著下降，推测与婴幼儿配方乳粉中高含量乳糖在 121 ℃下发生美拉德反应、破坏 VB_1 结构导致检测值失真有关；优化后的检测方法采用常温水解替代高温水解，省去高压灭菌锅操作环节，既规避了乳粉基质的高温干扰，又简化前处理流程，同时提高检测准确度与精密度，加标回收率接近 100%，该方法适用于婴幼儿配方乳粉中 VB_1 的高效批量检测。

参考文献

[1] YU Y, CHING YJ, TAN YN. A simple and fast fluorimetric method for thiamine (vitamin B_1) detection by Au^{3+}-mediated formation of thiochrome [J]. Austin Journal of Biosensors & Bioelectronics, 2015, 1(1): 1004.

[2] DERRICK L. A review of the biochemistry, metabolism and clinical benefits of thiamin(e) and its derivatives [J]. Evidence-based Complementary and Alternative Medicine: eCAM, 2006, 3(1): 49–59.

[3] THORNALLEY PJ. The potential role of thiamine (vitamin B_1) in diabetic complications [J]. Current Diabetes Reviews, 20051(3): 287–298.

[4] SHEN SY, LIANG Y, ZHAO YN, *et al.* Dietary supplementation of vitamin B_1 prevents the pathogenesis of osteoarthritis [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2024, 121(30): e2408160121.

[5] 吕惠卿. 高效液相色谱-荧光检测法测定复合维 B 片中维生素 B_1 含量[J]. 中国药业, 2008, 17(15): 24–25.
LV HQ. Determination of vitamin B_1 in compound vitamin B tablet by HPLC with fluorometry [J]. China Pharmaceuticals, 2008, 17(15): 24–25.

[6] 孙路路, 张石革. 维生素 B_1(硫胺)缺乏症(脚气病)与补充维生素 B_1[J]. 中国药房, 2003, 14(6): 383–384.
SUN LL, ZHANG SG. Vitamin B_1 (thiamine) deficiency (beriberi) and vitamin B_1 supplementation [J]. China Pharmacy, 2003, 14(6): 383–384.

[7] OMURA Y, OTA K, TAKASU A, *et al.* Vitamin B_1 deficiency identified from incidental detection of hyperlactatemia: A case report [J]. Medicina, 2024, 60(5): 715.

[8] 徐雅馨, 王锋, 蒋与刚. 维生素 B_1 与慢性病关系的研究进展[J]. 中国食物与营养, 2024, 30(7): 78–81.
XU YX, WANG F, JIANG YG. Research progress of the relationship between vitamin B_1 and chronic diseases [J]. Food and Nutrition in China, 2024, 30(7): 78–81.

[9] RAO KJ, PARIA S. Green synthesis of gold nanoparticles using aqueous *Aegle marmelos* leaf extract and their application for thiamine detection [J]. RSC Advances, 2014, 4(54): 2014.

[10] MAKARCHIKOV AF, WINS P, BETTENDORFF L. Biochemical and medical aspects of vitamin B_1 research [J]. Neurochemistry International, 2025, 185: 105962.

[11] GIBSON GE, FLOWERS SA, FELDMAN HH, *et al.* Pharmacological thiamine (vitamin B_1) as a treatment for alzheimer's disease [J]. Alzheimer's & Dementia, 2024, 20(Sup6): e086468.

[12] DUTTA D, ORTAEZ J, LEANO J, *et al.* Gut microbiome response to the reduction of diet induced obesity by vitamin B_1 supplementation [J]. Physiology, 2024, 39(S1): 3.

[13] KAŹMIERCZAK-BARAŃSKA J, HALCZUK K, KARWOWSKI BT. Thiamine (vitamin B_1)—an essential health regulator [J]. Nutrients, 2025, 17(13): 2206.

[14] 杨玉平, 谢柏艳. 液质联用法同时测定保健食品中维生素 B_1、维生素 B_6、烟酸、烟酰胺和咖啡因的含量[J]. 湖北农业科学, 2023, 62(9): 124–129.
YANG YP, XIE BY. Simultaneous determination of vitamin B_1, vitamin B_6, nicotinic acid, nicotinamide and caffeine in health foods by liquid mass spectrometry [J]. Hubei Agricultural Sciences, 2023, 62(9): 124–129.

[15] DINI A, MIGLIUOLO G, RASTRELIL, *et al.* Chemical composition of *Lepidium meyenii* [J]. Food Chemistry, 1994, 49(4): 347–349.

[16] 陆伟, 涂宏建, 王俊, 等. 高效液相色谱法测定保健食品-复合营养素补充剂中维生素 B_1 含量[J]. 食品安全质量检测学报, 2021, 12(18): 7376–7381.
LU W, TU HJ, WANG J, *et al.* Determination of vitamin B_1 in functional food-complex nutrients supplementation by high performance liquid chromatography [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2021, 12(18): 7376–7381.

[17] 傅红雪, 陈万勤, 刘柱, 等. 3 种前处理-HPLC 法测定婴幼儿配方食品中维生素 B_1[J]. 食品工业, 2020, 41(4): 281–284.
FU HX, CHEN WQ, LIU Z, *et al.* Comparative study on 3 pretreatment methods for HPLC determination of vitamin B_1 in formula foods for infants and young children [J]. The Food Industry, 2020, 41(4): 281–284.

[18] KAMARIS G, PANTOUDI N, MARKOPOULOU CK. Development and validation of HPLC-DAD/FLD methods for the determination of vitamins B_1, B_2, and B_6 in pharmaceutical gummies and gastrointestinal fluids—*in vitro* digestion studies in different nutritional habits [J]. Molecules, 2025; 30(19): 3902.

[19] 金梦, 林海丹, 徐娟, 等. 高效液相色谱法测定婴幼儿食品中维生素 B_1[J]. 中国卫生检验杂志, 2023, 33(7): 799–801.
JIN M, LIN HD, XU J, *et al.* Determination of vitamin B_1 in infant food by high performance liquid chromatography [J]. Chinese Journal of Health Laboratory Technology, 2023, 33(7): 799–801.

[20] ANDREA C, GONZALO GS, PABLO GM, *et al.* Optimizing vitamin supplementation via reference interval update of vitamins A, E, B_1, and B_6 using HPLC [J]. Journal of Clinical Biochemistry and Nutrition, 2025, 76(2): 148–155.

[21] 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 X, JIA HX, LI H. Evaluation of the uncertainty of measurement for determination of thiamine content in nutritional supplements by fluorescence spectrophotometry [J]. Food Science, 2015, 36(10): 174–178.

[22] HAMODY AS, ALASSAF NA, SALEH RA, *et al.* Evaluation of stability constant for vitamin B_1 depending on stoichiometric curves by visible spectroscopy [J]. Journal of Applied Spectroscopy, 2025, 91: 1353–1361.

[23] 汪敬武, 谢志鹏, 杨伟平. 流动注射化学发光法测定维生素 B_1[J]. 药物分析杂志, 2005, 25(8): 996–998.
WANG JW, XIE ZP, YANG WP. Determination of vitamin B_1 by flow injection analysis with chemiluminescence detection [J]. Chinese Journal of Pharmaceutical Analysis, 2005, 25(8): 996–998.

[24] 陈稚, 揭新明, 蔡康荣. 高效液相色谱与电喷雾电离质谱联用测定婴儿配方奶粉中的牛磺酸和维生素[J]. 广东医科大学学报, 2007, 25(3): 252–254.
CHEN Z, JIE XM, CAI KR. Taurine and vitamine detection in infant milk powder by HPLC-ESI/MS [J]. Journal of Guangdong Medical College, 2007, 25(3): 252–254.

[25] 陶保华, 黄焘, 赖世云, 等. 超高压液相色谱-串联质谱法同时测定人乳中的硫胺素、核黄素、烟酰胺、泛酸和吡哆醛[J]. 食品安全质量检测学报, 2014, 5(7): 2087–2094.
TAO BH, HUANG T, LAI SY, *et al.* Determination of thiamin, riboflavin, nicotinamide, pantothenic acid and pyridoxal in human milk by UPLC-MS/MS [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2014, 5(7): 2087–2094.

[26] VACHALI PP, ERIK KT, SOPHIE S, *et al.* Instrument multiplexing: Amplified throughput for measurement of vitamin B_1 in whole blood using parallel liquid chromatography systems interfaced to a single mass spectrometer [J]. Clinical Chemistry, 2025, 71(6): 713–722.

[27] REN H, CHEN Y, WANG H, *et al.* Simultaneous determination of caffeine, taurine and five water-soluble vitamins in tobacco products by HPLC-MS/MS [J]. Chromatographia, 2019, 82(11): 1665–1675.

[28] 陶大利, 李琴, 白鹤. 乳制品中维生素 B_1 检测条件优化研究[J]. 现代食品, 2018(20): 120–124.
TAO DL, LI Q, BAI H. Study on optimization of vitamin B_1 detection conditions in dairy products [J]. Modern Food, 2018(20): 120–124.

[29] 刘爱红, 谢杰菲, 王倩, 等. 高效液相色谱法检测维生素 B_1 含量的测定条件优化[J]. 食品与发酵科技, 2017, 53(6): 102–105.
LIU AIH, XIE JF, WANG Q, *et al.* Optimization of determination condition of vitamin B_1 by means of high performance liquid chromatography (HPLC) [J]. Food and Fermentation Sciences & Technology, 2017, 53(6): 102–105.

[30] 吕晨, 郭恒, 姜连阁. 婴幼儿配方乳粉中维生素 B_1 前处理方法的优化及评估[J]. 食品安全质量检测学报, 2021, 12(6): 2357–2361.
LV C, GUO H, JIANG LG. Optimization and evaluation of the pretreatment conditions of vitamin B_1 in infant formula milk powder [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2021, 12(6): 2357–2361.

[31] 简林凡. 维生素 B_1 缺乏与防治[J]. 井冈山医专学报, 2004, 11(3): 68–70.
JIAN LF. The treatment prevention of vitamin B_1-deficiency [J]. Journal of Jinggangshan Medical College, 2004, 11(3): 68–70.

[32] 彭启华. 婴幼儿配方奶粉中维生素 B_1 稳定性研究[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2015.
PENG QH. Study on stability of vitamin B_1 in infant formulas [D]. Changsha: Central South University of Forestry & Technology, 2015.

[33] 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 M. Rapid determination of vitamin B_1 and vitamin B_2 in infant milk powder [J]. China Dairy Industry, 2022, 50(1): 56–59, 64.

[34] MARTINS SIFS, BOEKEL MAJSV. A kinetic model for the glucose/glycine Maillard reaction pathway [J]. Food Chemistry, 2005, 90(1-2): 257–269.

[35] COPADO CN, DIEHL BWK, IXTAINA VY, *et al.* Application of maillard reaction products on chia seed oil microcapsules with different core/wall ratios [J]. LWT-Food Science and Technology, 2017, 86: 408–417.

[36] HELLWIG M, HENLE T. Baking, ageing, diabetes: A short history of the Maillard reaction [J]. Angewandte Chemie International Edition, 2014, 53(39): 10316–10329.

[37] EPPLE WF, HORRALL BE. The relation of copper and ascorbic acid to oxidized flavor in market milk [J]. Journal of Dairy Science, 1943, 26(6): 525–532.

[38] 刘宁, 侯广月, 周莉莉, 等. 婴幼儿配方乳粉中维生素检测关键点的探究[J]. 中国标准化, 2024(1): 217–220.
LIU N, HOU GY, ZHOU LL, *et al.* Discussion on the key points of vitamin determination in infant formula milk powder [J]. China Standardization, 2024(1): 217–220.

(责任编辑: 安香玉　韩晓红)