

DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20240827003

引用格式: 冉宗勤, 余文琴, 蔡琼, 等. 低共熔溶剂液-液微萃取-高效液相色谱法检测辣椒粉中6种苏丹红色素含量[J]. 食品安全质量检测学报, 2025, 16(5): 215-221.

RAN ZQ, YU WQ, CAI Q, *et al.* Determination of 6 kinds of Sudan dyes in *Capsicum annuum* powder by deep eutectic solvent liquid-liquid microextraction-high performance liquid chromatography [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2025, 16(5): 215-221. (in Chinese with English abstract).

低共熔溶剂液-液微萃取-高效液相色谱法检测 辣椒粉中6种苏丹红色素含量

冉宗勤, 余文琴, 蔡琼, 姚莉莉, 田小艳, 肖昭竞*

(重庆市计量质量检测研究院, 重庆 401123)

摘要: **目的** 建立一种基于低共熔溶剂(deep eutectic solvent, DES)萃取结合高效液相色谱法快速检测辣椒粉中6种苏丹红的方法。**方法** 利用液-液微萃取方法提取辣椒粉中的苏丹红I、苏丹红II、苏丹红III、苏丹红IV、苏丹红7B、苏丹红G。将提取液通过微孔滤膜过滤后进行高效液相色谱法测定, 外标法定量。考察DES稀释倍数、DES摩尔比、DES用量、萃取时间和萃取方式对6种苏丹红色素萃取效果的影响。**结果** 最优方法条件为DES稀释倍数为5倍、DES摩尔比1:2.5、DES用量600 μ L、萃取时间50 s、萃取方式为涡旋萃取, 在此条件下, 建立的方程在质量浓度0.1~50.0 mg/L范围内, 线性关系良好, 相关系数均大于0.999, 检出限为0.03~0.20 mg/L, 定量限为0.10~1.00 mg/L。其中苏丹红G、苏丹红I和苏丹红II的回收率较高, 为71.6%~117.5%, 相对标准偏差为0.6%~4.7%。**结论** 本研究建立的方法操作简便、高效、绿色环保, 可对辣椒粉中6种苏丹红进行快速检测。

关键词: 低共熔溶剂; 液-液微萃取; 高效液相色谱法; 苏丹红; 辣椒粉

Determination of 6 kinds of Sudan dyes in *Capsicum annuum* powder by deep eutectic solvent liquid-liquid microextraction-high performance liquid chromatography

RAN Zong-Qin, YU Wen-Qin, CAI Qiong, YAO Li-Li, TIAN Xiao-Yan, XIAO Zhao-Jing*

(Chongqing Academy of Metrology and Quality Inspection, Chongqing 401123, China)

ABSTRACT: Objective To establish an analytical method for the determination of 6 kinds of Sudan dyes in *Capsicum annuum* powder based on liquid-liquid microextraction with deep eutectic solvents (DES) combined with high performance liquid chromatography. **Methods** Sudan red I, Sudan red II, Sudan red III, Sudan red IV, Sudan red 7B and Sudan red G in *Capsicum annuum* powder were extracted by liquid-liquid microextraction. The extract

收稿日期: 2024-08-27

基金项目: 重庆市市场监督管理局项目(CQSJKJ2020002)

第一作者: 冉宗勤(1993—), 女, 硕士, 工程师, 主要研究方向为食品安全与检测。E-mail: 940719699@qq.com

*通信作者: 肖昭竞(1985—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为食品安全与检测。E-mail: 276402735@qq.com

was filtered through a microporous membrane and then determined by high performance liquid chromatography with external standard method for quantification. The effects of DES dilution ratio, DES molar ratio, DES addition amount, extraction time, and extraction method on the extraction efficiency of 6 kinds of Sudan dyes were investigated. **Results** The results showed that the optimal method conditions were: Dilution ratio of DES 5 times, molar ratio of DES 1:2.5, addition amount of DES 600 μL , extraction time 50 s, and extraction method was vortex extraction. Under these conditions, the established equation had a good linear relationship in the range of mass concentration 0.1–50.0 mg/L, the correlation coefficients were all greater than 0.999, the limits of detection were 0.03–0.20 mg/kg, and the limits of quantitative were 0.10–1.00 mg/kg. The recovery rates of Sudan red G, Sudan red I, and Sudan red II were higher, ranging from 71.6% to 117.5%, with relative standard deviations of 0.6% to 4.7%. **Conclusion** The established method is simple, efficient, and environmentally friendly, and can be used for rapid detection of 6 kinds of Sudan dyes in *Capsicum annuum*.

KEY WORDS: deep eutectic solvent; liquid-liquid microextraction; high performance liquid chromatography; Sudan dye; *Capsicum annuum* powder

0 引言

苏丹红是一类人工合成的工业用染料, 主要包括苏丹 I、苏丹 II、苏丹 III、苏丹 IV、苏丹红 7B 和苏丹红 G 等, 常作为添加剂用于矿物油、蜡和纺织品等各种化工材料中^[1-3]。由于苏丹红色泽鲜艳、合成简单、稳定性良好, 不少不良商家将其作为食品添加剂非法添加到食品中以获取更多利益。苏丹红分子具有偶氮结构和芳香环, 可严重毒害人体器官, 长期摄入会增加人体致癌的风险, 被国际癌症研究机构(International Agency for Research on Cancer, IARC)列为第三类致癌物^[4-6]。我国早已禁止苏丹红用于食品中^[7-9]。

目前苏丹红的检测方法常用高效液相色谱法^[10-12]和高效液相色谱-串联质谱法^[13-15]等。GB/T 19681—2005《食品中苏丹红染料的检测方法 高效液相色谱法》可检测食品中苏丹红 I、苏丹红 II、苏丹红 III 以及苏丹红 IV 共 4 种苏丹红成分, 但该方法操作步骤复杂, 耗费大量有机试剂。由于苏丹红 7B 和苏丹红 G 也含有偶氮苯结构, 因此从安全角度考虑建立一种同时测定 6 种苏丹红成分的方法十分必要。有研究表明, 低共熔溶剂(deep eutectic solvent, DES)具有易制备、原料价格低、绿色环保、原子利用率高、生物相容性好和挥发性低等优点。已广泛应用于食品中农药残留^[16-18]、兽药残留^[19-21]、工业染料^[22-24]、重金属^[25-26]、污染物^[27-29]等的前处理过程。目前用 DES 提取食品中的苏丹红研究较少。葛丹丹等^[30]以苯基三乙基溴化铵和正辛酸制备出的 DES 提取西瓜果汁和树莓果汁中苏丹红 G、苏丹红 III、苏丹红 IV; 刘闯^[31]以甲基三辛基氯化铵和油酸制备而成的 DES 用于环境和食物样品中苏丹红 I 的提取。以上方法大多使用大量有毒的有机试剂、检测方法烦琐, 不符合快速环保的检测要求。

因此, 本研究建立一种基于 DES 的液-液微萃取结合高效液相色谱快速检测辣椒粉中 6 种苏丹红色素的方法, 以期对辣椒粉中苏丹红色素的快速检测提供依据。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

辣椒粉为市售。

苏丹红 I(纯度 91.8%)、苏丹红 II(纯度 85.0%)、苏丹红 III(纯度 90.0%)、苏丹红 IV(纯度 82.4%)标准品(北京曼哈格生物科技有限公司); 苏丹红 7B(纯度 91.92%)、苏丹红 G(纯度 97.14%)标准品(德国 DRE 公司); 甲醇、乙腈(色谱纯, 北京百灵威科技有效公司); 丙酮(色谱纯, 成都市诺尔施科技有限公司); 油酸(分析纯, 成都市科隆化学品有限公司); 甲基三辛基氯化铵(分析纯, 上海阿拉丁生化科技股份有限公司); 实验用水为超纯水。

1.2 仪器与设备

LC-20A 高效液相色谱仪(配备二级管阵列检测器, 日本岛津公司); QT-2A 涡旋混合器(上海琪特分析仪器有限公司); Advantage A10 型超纯水机(英国埃尔格公司); IKA-WERKE 加热板(德国艾卡公司); CF-16RN 离心机(株式会社日立制作所); Minilab 全自动稀释配标仪(北京莱伯泰科仪器股份有限公司); KH5200DE 超声清洗仪(昆山禾创超声仪器有限公司); QUINTIX3102-1CN 分析天平(精度 0.01 g)、SECURA225D-1CN 分析天平(精度 0.01 mg)(德国赛多利斯公司); Inert Sustian C₁₈ 色谱柱(150 mm×4.6 mm, 5 μm , 日本 GL Sciences 公司)。

1.3 试验方法

1.3.1 标准溶液配制

准确称取折算纯度后的 6 种苏丹红标准品各 10.0 mg, 用乙腈溶解并定容, 配制成质量浓度为 1000 mg/L 的单一标准储备液, 再用乙腈稀释成质量浓度为 100 mg/L 的混合标准中间液, 于 -20 $^{\circ}\text{C}$ 冰箱保存。使用时再用乙腈稀释成不同质量浓度的标准使用液。

1.3.2 DES 的制备

采用加热法^[32-33]制备, 按照一定摩尔比将甲基三辛基氯化铵与油酸混合于烧杯中, 置于 80 °C 油浴锅中搅拌加热至澄清均一液体, 所得 DES 组成及配比见表 1。

表 1 DES 的组成及配比

DES 编号	甲基三辛基氯化铵与油酸摩尔比
DES-1	1.0:1.0
DES-2	1.0:1.5
DES-3	1.0:2.0
DES-4	1.0:2.5
DES-5	1.0:3.0

1.3.3 样品前处理方法

将干辣椒经高速粉碎机粉碎, 准确称取 1 g 辣椒粉(精确至 0.01 g)于离心管中, 加入 5 mL 丙酮涡旋混匀后, 于振荡器中振摇 30 min, 以 8000 r/min 离心 5 min, 取上清液于 45 °C 下用氮气吹干, 加入 600 μL DES 于氮吹管中, 涡旋 50 s, 再加入 5 mL 超纯水, 涡旋混匀, 再以 8000 r/min 离心 5 min, 用长针头去除下层溶液, 剩余 DES 溶液用 400 μL 甲醇溶解, 涡旋混匀后过 0.45 μm 色素专用滤膜, 注入 2 mL 进样小瓶, 待高效液相色谱仪测定。

1.3.4 萃取条件的优化

吸取 5 mL 水于离心管中, 加入质量浓度为 100 mg/L 的混合标准使用液 0.1 mL, 涡旋混合均匀, 按照 1.3.3 进行样品前处理, 在 DES 稀释倍数 5 倍、摩尔比 1:2.5、DES 用量 600 μL、萃取方式涡旋、萃取时间 50 s 固定的基础上, 分别研究 DES 稀释倍数、摩尔比、DES 用量、萃取方式和萃取时间对回收率的影响。

1.3.5 高效液相色谱条件

根据吸收波长的测定结果, 苏丹红色素在波长 520 nm 处有最大吸收峰, 因此 6 种苏丹红色素的检测波长设定为 520 nm, 并在此条件下进行洗脱条件优化。

采用 Inert Sustian C₁₈ 色谱柱(150 mm×4.6 mm, 5 μm), 柱温 35 °C, 进样体积 20 μL, 检测波长 520 nm。流动相: A 为体积分数 0.1% 甲酸乙腈溶液: 丙酮=80:20 (V:V), B 为体积分数 0.1% 甲酸水溶液: 乙腈=85:15 (V:V)。梯度洗脱条件: 0~4 min, 80% A; 4~8 min, 80%~100% A; 8~20 min, 100% A; 20~25 min, 100%~80% A; 流速均为 1 mL/min。

1.4 数据处理

采集的数据经岛津 Lab Solution 5.98 处理获得苏丹红的定量结果, 再将获得的数据导出采用 WPS 2023 和 Origin Pro 9.1 进行整理和统计分析。

2 结果与分析

2.1 梯度条件的选择

根据单一标准溶液定位发现, 苏丹红 G 和苏丹红 I 以

及苏丹红 7B 和苏丹红 IV 的出峰时间非常接近, 因此主要调整流动相梯度以实现二者色谱峰的完全分离。分离度是指两个色谱峰的分离程度, 以两个组分保留值之差与其平均峰宽之比表示, 由表 2~3 和图 1 可知: 方案 c 中苏丹红 IV 的分离度为 1.514, 实现了完全分离, 并且用时最短。因此选择方案 c 进行后续试验。

2.2 DES 稀释倍数选择

由于 DES 黏度较大^[34-35], 上机前需用适量甲醇稀释。选择稀释倍数分别为 2、5、10 倍, 用甲醇稀释后的 DES 溶液配制质量浓度为 2 mg/L 的 6 种苏丹红混合标准溶液, 上机测定。由图 2 可知, 当稀释倍数为 2 倍时, 稀释后的 DES 黏度仍较大, 不利于色谱柱的使用; 当稀释倍数为 10 倍时, 目标物色谱峰逐渐展宽且出现拖尾现象。考虑到黏度太大不利于色谱柱的使用, 且稀释倍数为 5 倍时, 黏度适中且色谱峰峰型较好, 因此, 确定 DES 稀释倍数为 5 倍。

表 2 不同梯度洗脱条件

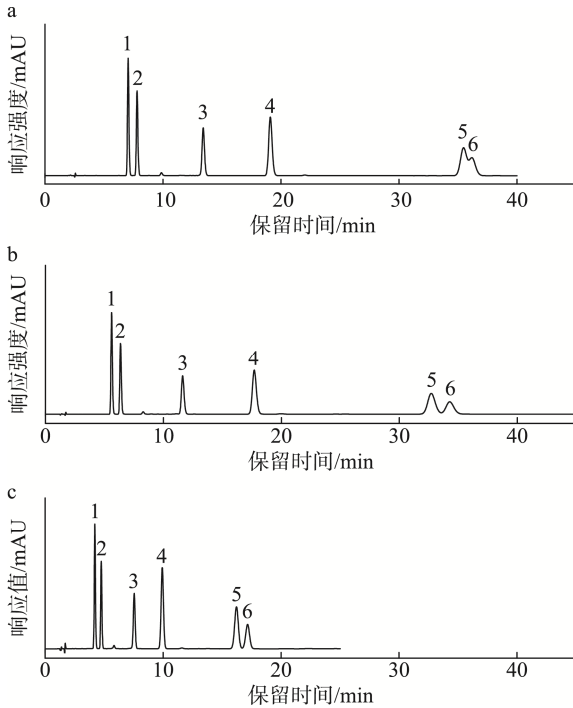
方案	梯度洗脱程序						
	时间/min	0.01	10.00	25.00	32.00	35.00	40.00
a	流动相 A/%	75	75	100	100	75	75
	流动相 B/%	25	25	0	0	25	25
	时间/min	0.01	10.00	25.00	32.00	35.00	45.00
b	流动相 A/%	75	75	100	100	100	75
	流动相 B/%	25	25	0	0	0	25
	时间/min	4.00	8.00	20.00	25.00		
c	流动相 A/%	80	100	100	80		
	流动相 B/%	20	0	0	20		

表 3 不同洗脱条件下的分离度

化合物	方案 a	方案 b	方案 c
苏丹红 G	2.576	2.529	2.280
苏丹红 I	3.042	3.015	2.630
苏丹红 II	17.091	15.107	10.877
苏丹红 III	11.855	11.194	6.899
苏丹红 7B	18.894	16.226	12.615
苏丹红 IV	0.458	1.285	1.514

2.3 DES 摩尔比对萃取效率的影响

由图 3 可知, 苏丹红 G 和苏丹红 I 表现出独特的萃取优势, 回收率明显高于其他 4 种。在摩尔比为 1:2.5 时, 6 种苏丹红组分的回收率均最高, 可能是在此配比下制备的 DES 生成了更强的氢键。因此, 选择 DES 摩尔比为 1:2.5。



注: a、b、c分别为表1中不同洗脱方案对应的色谱图。1~6分别为苏丹红G、苏丹红I、苏丹红II、苏丹红III、苏丹红7B、苏丹红IV。

图1 不同洗脱条件下的色谱图

Fig.1 Chromatograms of different mobile phase

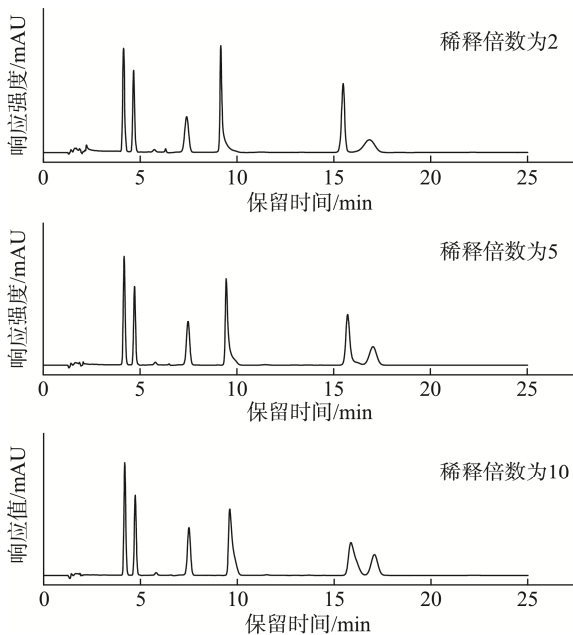


图2 不同稀释倍数下标准品色谱图

Fig.2 Chromatogram of standard product at different dilution multiples

2.4 DES 用量对萃取效率的影响

由图 4 可知, 当 DES 用量在 600 μL 时, 苏丹红 G、

苏丹红 I 和苏丹红 II 的回收率达到最高值, 之后随着 DES 用量的继续增加, 回收率略有下降。这可能是由于随着 DES 用量的增加, DES 浓度增大影响了目标组分的传质效率。DES 用量增加对苏丹红 III、苏丹红 IV 和苏丹红 7B 的回收率影响不大且回收率均较低, 因此, 选择 DES 用量为 600 μL 。

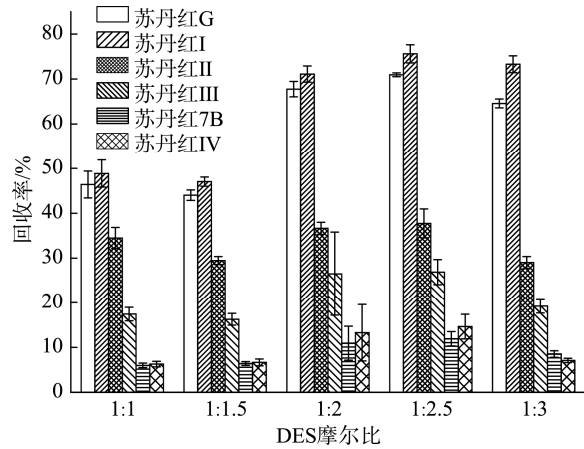


图3 摩尔比对回收率的影响

Fig.3 Effects of molar ratio on recovery rates

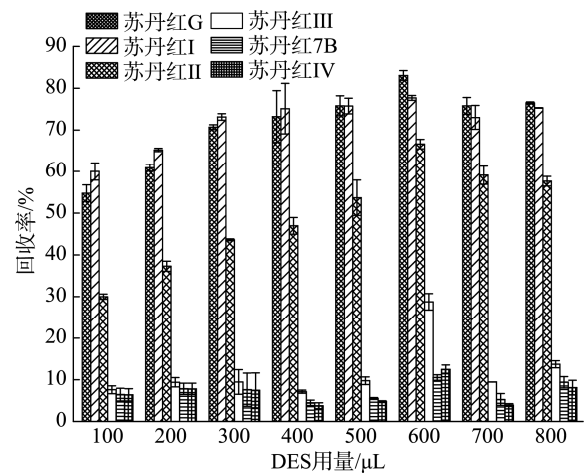


图4 DES用量对回收率的影响

Fig.4 Effects of DES dosage on recovery rates

2.5 萃取方式及时间对萃取效率的影响

由图 5 可知, 在 6 种苏丹红组分的萃取中, 涡旋萃取方式的回收率均高于超声萃取, 对于回收率较高的苏丹红 G、苏丹红 I 和苏丹红 II 3 种色素, 当萃取时间为 50 s 时, 涡旋萃取方式的苏丹红 G、苏丹红 I 的回收率均达到最大值, 且苏丹红 II 的回收率也较高, 延长超声时间对苏丹红 III、苏丹红 IV 和苏丹红 7B 的回收率影响不大且回收率均较低, 因此, 选择萃取方式涡旋, 时间为 50 s。

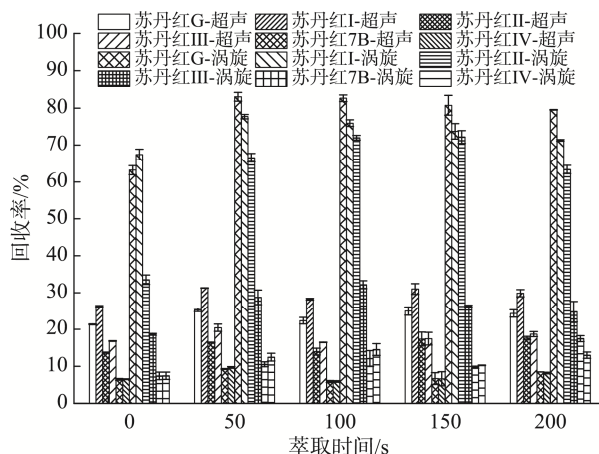


图5 萃取方式及时间对回收率的影响
Fig.5 Effects of extraction method and time on recovery rate

2.6 方法有效性评价

2.6.1 工作曲线、检出限和定量限的确定

在最优萃取条件下, 使用稀释后的 DES 配制质量浓度为 0.1~50.0 mg/L 的 6 种苏丹红染料, 用高效液相色谱仪分析。以质量浓度为横坐标(X, $\mu\text{g/mL}$), 峰面积为纵坐标(Y)绘制标准曲线, 分析得到线性回归方程、相关系数、检出限(以 3 倍信噪比计算)、定量限(以 10 倍信噪比计算)见表 4。由表 4 可知, 在质量浓度 0.1~50.0 mg/L 范围内, 曲线线性关系良好, 相关系数均大于 0.999, 检出限为 0.03~0.20 mg/L, 定量限为 0.10~1.00 mg/L。满足实验要求。

表 4 6 种苏丹红染料的校准曲线方程、相关系数、检出限和定量限结果

Table 4 Calibration curve equations, limits of detection and limits of quantification of 6 kinds of Sudan dyes

组分	线性回归方程	相关系数	检出限/(mg/L)	定量限/(mg/L)
苏丹红 I	$Y=66593X+1451$	0.9999	0.03	0.10
苏丹红 II	$Y=57856X-1316$	0.9999	0.05	0.15
苏丹红 III	$Y=13843X-1336$	0.9999	0.15	1.00
苏丹红 IV	$Y=30314X-170$	0.9998	0.20	1.00
苏丹红 7B	$Y=94825X-969$	0.9999	0.05	0.10
苏丹红 G	$Y=53686X-906$	0.9999	0.03	0.10

2.6.2 加标回收率及精密度实验

由表 5 可知: 苏丹红 G、苏丹红 I、苏丹红 II 的回收率为 71.6%~117.5%, 相对标准偏差为 0.6%~4.7%; 苏丹红 III 的回收率为 50.0%~71.3%, 相对标准偏差为 2.8%~5.2%; 苏丹红 7B、苏丹红 IV 的回收率为 30.6%~57.7%, 相对标准偏差为 0.5%~11.1%。此 DES 对 6 种苏丹红染料萃取效果的不同, 可能是由于目标提取物本身结构差异造成其极性、疏水性的不同, 与 DES 引起的 π - π 亲和、疏水效应、

氢键等的相互作用不同, 比如苏丹 I、苏丹红 II、苏丹红 IV 和苏丹红 IV 的酚类化合物结构与醇/水分配系数分别为 5.51、6.60、7.63 和 8.72^[36]。还可能是由于 DES 的羟基和分析物的酚羟基之间形成氢键的能力不同, 而苏丹红 II、苏丹红 IV 的甲基基团和苏丹红 7B 的氨基连接的甲基基团影响了二者之间氢键的形成, 并且在苏丹红 7B 结构中没有酚羟基基团, 导致他们的提取效率不高。

表 5 辣椒粉中 6 种苏丹红染料的加标回收率及精密度 (n=6)
Table 5 Average recoveries and precisions of 6 kinds of Sudan dyes in *Capsicum annum* powder (n=6)

组分	0.5 mg/kg		2.5 mg/kg		5.0 mg/kg	
	回收率/%	相对标准偏差/%	回收率/%	相对标准偏差/%	回收率/%	相对标准偏差/%
苏丹红 G	117.5	0.6	75.1	1.8	71.6	3.2
苏丹红 I	107.0	1.1	84.2	1.7	76.7	4.7
苏丹红 II	81.0	0.7	89.2	4.6	81.1	4.0
苏丹红 III	71.3	2.8	60.2	4.9	50.0	5.2
苏丹红 7B	45.2	4.9	35.6	6.1	32.1	11.1
苏丹红 IV	57.7	0.5	46.7	3.8	30.6	6.6

2.6.3 实际样品检测

应用本方法对从市场收集的 10 份辣椒粉进行检测, 均未检测出以上 6 种苏丹红色素。通过实际样品检测表明本方法对 6 种苏丹红染料具有较好的选择性, 可以应用于辣椒粉中 6 种苏丹红染料的含量检测。

3 结论

本研究建立一种基于 DES 萃取结合高效液相色谱法快速检测辣椒粉中 6 种苏丹红的方法。DES 由甲基三辛基氯化铵和油酸组成, 辣椒粉样品使用丙酮提取后采用 DES 涡旋混合提取目标化合物, 本方法在质量浓度 0.1~50.0 mg/L 范围内, 线性关系良好, 相关系数均大于 0.999, 检出限为 0.03~0.20 mg/L, 定量限为 0.10~1.00 mg/L。其中苏丹红 G、苏丹红 I、苏丹红 II 的回收率较高, 为 71.6%~117.5%, 相对标准偏差为 0.6%~4.7%。本研究建立的方法操作简便、高效、绿色环保, 可对辣椒粉中 6 种苏丹红进行快速检测。本研究可为辣椒粉中苏丹红色素的快速检测提供参考。

参考文献

[1] 苏非语. 市售火锅底料中苏丹红残留量评价及检测方法研究[D]. 成都: 西华大学, 2021.
SU FY. Research on evaluation and detection method of sudan red residues in commercial hot pot bottom material [D]. Chengdu: Xihua University, 2021.
[2] 张敏. 多功能碳点的制备与苏丹红和盐酸四环素的检测研究[D]. 鞍山:

- 辽宁科技大学, 2022.
- ZHANG M. The preparation of multifunctional carbon dots and the detection of sudan red and tetracycline hydrochloride [D]. Anshan: University of Science and Technology Liaoning, 2022.
- [3] 卢春霞, 闫圣坤, 刘成江, 等. 构建氯化血红素/G-四链体 DNA 酶比色生物传感器检测食品中苏丹红[J]. 食品科学, 2022, 43(22): 346–352.
- LU CX, YAN SK, LIU CJ, *et al.* A colorimetric biosensor based on hemin/g-quadruplex DNAszymes for the detection of sudan dyes in foods [J]. Food Science, 2022, 43(22): 346–352.
- [4] 胡家勇, 彭青枝, 周陶鸿, 等. 表面增强拉曼光谱法快速检测咸鸭蛋中苏丹红[J]. 食品工业, 2023, 44(9): 269–274.
- HU JY, PENG QZ, ZHOU TX, *et al.* Rapid analysis of sudan dyes in salted duck eggs by surface enhanced Raman spectroscopy [J]. The Food Industry, 2023, 44(9): 269–274.
- [5] 王一如, 高阳, 吴永刚, 等. 密度泛函理论研究苏丹红III分子的电子结构, 光谱与激发性质[J]. 光谱学与光谱分析, 2023, 43(8): 2426–2436.
- WANG YR, GAO Y, WU YG, *et al.* Study of the electronic structure, spectrum, and excitation properties of sudan red III molecule based on the density functional theory [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2023, 43(8): 2426–2436.
- [6] 宋晓婉, 钟亚安, 宋旭凤, 等. 串联固相萃取柱净化法提取辣椒酱中的苏丹红[J]. 安徽农业科学, 2022, 50(23): 184–186.
- SONG XW, ZHONG YAN, SONG XF, *et al.* Extraction of sudan dyes from chili sauce by tandem solid phase extraction column purification [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2022, 50(23): 184–186.
- [7] TONG H, WANG GN, LIU JX, *et al.* Dummy molecularly imprinted polymer based microplate chemiluminescence sensor for one-step detection of Sudan dyes in egg [J]. Food Chemistry, 2019, 288: 347–353.
- [8] CHEN Y, MU TC. Revisiting greenness of ionic liquids and deep eutectic solvents [J]. Green Chemical Engineering, 2021, 2(2): 174–186.
- [9] 张琴, 周榕. 苏丹红检测技术研究进展[J]. 农产品加工, 2021, 9(17): 84–86.
- ZHANG Q, ZHOU R. Research progress of detection technology in sudan red [J]. Farm Products Processing, 2021, 9(17): 84–86.
- [10] 张丽, 冉艳瑞, 陈艳, 等. HPLC 检测辣椒粉中苏丹红方法优化[J]. 食品安全导刊, 2024(11): 72–74.
- ZHANG L, RAN YY, CHEN Y, *et al.* Optimization of HPLC method for determination of Sudan red in chili powder [J]. China Food Safety Magazine, 2024(11): 72–74.
- [11] 陈伟洁, 陆溶艳, 聂丹, 等. 高效液相色谱法测定食品中苏丹红的方法优化[J]. 现代食品, 2021(1): 186–189.
- CHEN WJ, LU RY, LIE D, *et al.* Optimization of method for determination of sudan in food by HPLC [J]. Modern Food, 2021(1): 186–189.
- [12] 武曦, 张愉哈, 张雅雯, 等. 新型基质分散挤压萃取-高效液相色谱法测定辣椒粉中 6 种苏丹红色素[J]. 食品安全质量检测学报, 2022, 13(12): 3893–3898.
- WU X, ZHANG YH, ZHANG YW, *et al.* Determination of 6 kinds of Sudan dyes in chilli powder by novel matrix dispersion squeezing extraction-high performance liquid chromatography [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2022, 13(12): 3893–3898.
- [13] 罗峰, 余健, 黄亚梅, 等. 液相色谱-串联质谱法测定禽蛋及蛋制品中的苏丹红[J]. 食品安全导刊, 2024(5): 98–104.
- LUO F, YU J, HUANG YM, *et al.* Determination of sudan dyes in eggs and egg products by liquid chromatography-tandem mass spectrometry [J]. China Food Safety Magazine, 2024(5): 98–104.
- [14] 刘丽英, 王锋, 曾德唯, 等. 超高效液相色谱-三重四极杆串联质谱法同时测定火锅底料中 10 种工业染料[J]. 现代预防医学, 2021, 48(13): 2424–2430.
- LIU LY, WANG F, ZENG WD, *et al.* Simultaneous determination of 10 industrial dyes in hotpot condiment by ultra-high performance liquid chromatography-triple quadrupole tandem mass spectrometry [J]. Modern Preventive Medicine, 2021, 48(13): 2424–2430.
- [15] 邓颖. 高效液相色谱串联质谱法测定食用香料中染料含量[J]. 中国食品添加剂, 2020, 31(9): 112–119.
- DENG Y. Determination of azo dyes in edible spices by HPLC-MS/MS [J]. China Food Additives, 2020, 31(9): 112–119.
- [16] SOLTANI S, SERESHTI H. A green alternative QuEChERS developed based on green deep eutectic solvents coupled with gas chromatography-mass spectrometry for the analysis of pesticides in tea samples [J]. Food Chemistry, 2022, 380(30): 132181–132189.
- [17] 李芳芳, 田其燕, 陈克云, 等. 基于疏水性低共熔溶剂的分散液液微萃取结合气相色谱-串联质谱法测定肉及肉制品中拟除虫菊酯农药残留[J]. 食品安全质量检测学报, 2022, 13(17): 5679–5687.
- LI FF, TIAN QY, CHEN KY, *et al.* Determination of pyrethroid pesticide residues in meat and meat products by gas chromatography-tandem mass spectrometry with hydrophobic deep eutectic solvent-dispersive liquid-liquid microextraction [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2022, 13(17): 5679–5687.
- [18] 王素利, 郭振福, 庚丽丽. 基于低共熔溶剂的液液微萃取技术测定食用油中的新烟碱类杀虫剂[J]. 食品科学, 2021, 42(8): 277–282.
- WANG SL, GUO ZF, GENG LL. Liquid phase microextraction with deep eutectic solvent combined with high performance liquid chromatography for determination of new neonicotinoid insecticide residues in edible oil [J]. Food Science, 2021, 42(8): 277–282.
- [19] 刘子雄, 谢国丹, 谭贵良, 等. DES-UPLC-MS/MS 法测定水产品中 4 种四环素类药物残留[J]. 食品与机械, 2022, 38(2): 40–45.
- LIU ZX, XIE GD, TAN GL, *et al.* Rapid determination of drug residues of four kinds of tetracyclines using DES-UPLC-MS/MS in aquatic products [J]. Food & Machinery, 2022, 38(2): 40–45.
- [20] RASHID SN, HAYYAN A, HAYYAN M, *et al.* Ternary glycerol-based deep eutectic solvents: Physicochemical properties and enzymatic activity [J]. Chemical Engineering Research and Design, 2021, 169(2): 77–85.
- [21] 冯作勋, 刘彦, 陈晴宇, 等. 低共熔溶剂液液微萃取-高效液相色谱法分析蜂蜜中四环素类抗生素[J]. 粮食与油脂, 2023, 36(11): 154–158.
- FENG ZX, LIU Y, CHEN QY, *et al.* Detection of tetracycline antibiotics

- in honey by high performance liquid chromatography with deep eutectic solvent based on liquid-liquid microextraction [J]. *Cereals & Oils*, 2023, 36(11): 154–158.
- [22] 周佳, 刘子濠, 王丽君, 等. 低共熔溶剂-超高效液相色谱-串联质谱法快速测定肉制品、水产品中3种非法添加工业染料[J]. *食品安全质量检测学报*, 2022, 13(5): 1538–1544.
- ZHOU J, LIU ZZ, WANG LJ, *et al.* Determination of 3 kinds of illegally added industrial dyes in meat and aquatic products by hydrophobicity deep eutectic solvent-ultra performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry [J]. *Journal of Food Safety & Quality*, 2022, 13(5): 1538–1544.
- [23] 余文琴, 肖昭竞, 冉宗勤, 等. 低共熔溶剂液-液微萃取/高效液相色谱法检测调味油中6种工业染料[J]. *食品安全质量检测学报*, 2022, 13(23): 7573–7580.
- YU WQ, XIAO ZJ, RAN ZQ, *et al.* Determination of 6 kinds of industrial dyes in flavoured oil by deep eutectic solvent liquid-liquid microextraction combined with high performance liquid chromatography [J]. *Journal of Food Safety & Quality*, 2022, 13(23): 7573–7580.
- [24] 谢蔓莉, 肖昭竞, 余文琴, 等. 低共熔溶剂液-液微萃取/高效液相色谱法检测饮料和糖果中10种水溶性色素[J]. *分析实验室*, 2023, 42(4): 558–563.
- XIE ML, XIAO ZJ, YU WQ, *et al.* Determination of ten water-soluble pigments in drink and candy by deep eutectic solvent liquid-liquid microextraction/high performance liquid chromatography [J]. *Chinese Journal of Analysis Laboratory*, 2023, 42(4): 558–563.
- [25] 马尚文, 底梦飞, 杨嵘晟, 等. 双脂肪酸憎水性低共熔溶剂的合成及富集水中铜离子的研究[J]. *煤炭与化工*, 2020, 43(6): 121–128.
- MA SW, DI MF, YANG RS, *et al.* Study on extraction of aqueous copper ion using deep eutectic solvent made of two fatty acid components [J]. *Coal and Chemical Industry*, 2020, 43(6): 121–128.
- [26] 张鑫鑫, 杨燕强, 武曦, 等. 基于低共熔溶剂的微波消解-石墨炉原子吸收光谱法测定稻谷中铅、镉、铬的含量[J]. *理化检验: 化学分册*, 2022, 58(12): 1425–1430.
- ZHANG XX, YANG YQ, WU X, *et al.* Determination of lead, cadmium and chromium in grain by graphite furnace atomic absorption spectrometry with microwave digestion based on deep eutectic solvent. [J]. *Physical Testing and Chemical Analysis (Part B: Chemical Analysis)*, 2022, 58(12): 1425–1430.
- [27] 何婷婷, 周彤, 谭婷, 等. 超声波辅助/疏水性低共熔溶剂萃取-高效液相色谱法测定牛奶中的多环芳烃[J]. *分析科学学报*, 2020, 36(2): 177–182.
- HE TT, ZHOU T, TAN T, *et al.* Determination of polycyclic aromatic hydrocarbons in milk by ultrasonic-assisted hydrophobic deep eutectic solvent extraction combined with high performance liquid chromatography [J]. *Journal of Analytical Science*, 2020, 36(2): 177–182.
- [28] 薛皓月, 刘海龙, 贾丽艳, 等. 低共熔溶剂分散液液微萃取-悬浮固化-高效液相色谱法测定水产品中3种内分泌干扰物的含量[J]. *理化检验-化学分册*, 2022, 58(3): 279–284.
- XUE HY, LIU HL, JIA LY, *et al.* Determination of 3 endocrine disrupting chemicals in fishery products by HPLC with deep eutectic solvents dispersive liquid liquid microextraction-solidification of floating droplets [J]. *Physical Testing and Chemical Analysis (Part B: Chemical Analysis)*, 2022, 58(3): 279–284.
- [29] 陈玉珍, 梁志森, 李建华, 等. 基于低共熔溶剂同时清洗植物性食品中多种污染元素可行性研究[J]. *食品安全质量检测学报*, 2024, 15(9): 178–186.
- CHEN YZ, LIANG ZS, LI JH, *et al.* Feasibility study on removal of multi-polluting elements in plant food by deep eutectic solvents [J]. *Journal of Food Safety & Quality*, 2024, 15(9): 178–186.
- [30] 葛丹丹, 黄兴, 马兴娅, 等. 基于苯基三乙基溴化铵和正辛酸的低共熔溶剂的制备及其在分散液液微萃取中的应用[J]. *化学试剂*, 2022, 44(12): 1775–1781.
- GE DD, HUANG X, MA XY, *et al.* Preparation of a deep eutectic solvent based on benzyltriethylammonium bromide and octanoic acid and its application in dispersion liquid-liquid microextraction [J]. *Chemical Reagents*, 2022, 44(12): 1775–1781.
- [31] 刘闯. 基于疏水性低共熔溶剂涡旋辅助液液微萃取方法性能研究[D]. 新乡: 河南师范大学, 2018.
- LIU C. Performance research of hydrophobic deep eutectic solvents-based vortex-assisted liquid-liquid microextraction [D]. Xinxiang: Henan Normal University, 2023.
- [32] PELOSI C, JOSÉ GR, BERNAZZANI L, *et al.* Optimized preparation, thermal characterization and microwave absorption properties of deep eutectic solvents made by choline chloride and hydrated salts of alkali earth metals [J]. *Journal of Molecular Liquids*, 2023, 371: 121104–121108.
- [33] HANSEN BB, SPITTLE S, CHEN B, *et al.* Deep eutectic solvents: A review of fundamentals and applications [J]. *Chemical Reviews*, 2021, 121(3): 1232–1285.
- [34] CUI YN, LI CP, YIN JM, *et al.* Design, synthesis and properties of acidic deep eutectic solvents based on choline chloride [J]. *Journal of Molecular Liquids*, 2017, 236: 338–343.
- [35] MBOUS YP, HAYYAN M, HAYYAN A, *et al.* Applications of deep eutectic solvents in biotechnology and bioengineering-promises and challenges [J]. *Biotechnology Advances*, 2017, 35(2): 105–134.
- [36] SRICHARON P, LIMCHOOWONG N, SRIPAKDEE T, *et al.* Electrolyte-assisted microemulsion breaking in vortexagitated solidified floating organic drop microextraction for preconcentration and analysis of sudan dyes in chili products [J]. *Analytical Methods*, 2017, 9(25): 3810–3818.

(责任编辑: 韩晓红 蔡世佳)