

数字化视角下的实验教学设计 ——以“从红辣椒中提取红色素”为例

孟宪娇, 马瑜佼, 李旺, 赵栖, 王一鸣, 王福贵, 张永坡, 赵晋忠*

山西农业大学基础部, 山西 晋中 030801

摘要: “从红辣椒中提取辣椒红色素”是天然产物化学课程教学中设置的一个综合性实验, 实验步骤包含了辣椒红色素的提取、分离及纯化, 涉及到多个实验影响因素, 以及昂贵仪器的使用、教学学时的限制等难题。数字化教学设计的有效融入, 不仅让学生可以提前对路径进行优化, 也可加深对实验理论的理解以及实验内容的掌握。数字化设计内容主要包含两个方面: 一是采取线下“分段式”数据采集, 利用数学建模对提取温度及溶剂、展开剂及洗脱剂比例配置、柱层析硅胶的高度等因素进行数值模拟, 学生可通过设置不同条件数值, 对预测结果进行分析, 并继续进行条件优化; 二是利用虚拟仿真技术, 实现实验结果的动态可视化展示, 帮助学生进行回流等实验装置的搭建, 以及高效液相色谱(HPLC)等仪器的操作, 该部分教学评价将会根据实验结果以及操作的重复次数进行自动评分。数字化设计将充分调动起学生的主观能动性, 在保证有效成分活性的同时, 也能提高对植物利用与保护的意识, 建立起环保理念。

关键词: 天然产物; 辣椒红色素; 数值模拟; 虚拟仿真; 路径优化

中图分类号: G64; O6

Experimental Teaching Design of Extracting Capsanthin from Chili Peppers: A Digital Perspective

Xianjiao Meng, Yujiao Ma, Wang Li, Xi Zhao, Yiming Wang, Fugui Wang, Yongpo Zhang, Jinzhong Zhao*

Department of Basic Science, Shanxi Agricultural University, Jinzhong 030801, Shanxi Province, China.

Abstract: The extraction of capsanthin from red chili peppers constitutes a comprehensive experiment in natural product chemistry education. This experimental protocol encompasses the extraction, separation, and purification of capsanthin, involving multiple experimental variables, utilization of sophisticated instrumentation, and constraints on instructional time. The strategic incorporation of digital teaching methodologies facilitates both process optimization and enhanced comprehension of theoretical principles and experimental procedures. The digital framework comprises two principal components: (1) offline “segmented” data acquisition coupled with mathematical modeling for numerical simulation of extraction parameters, including temperature, solvent composition, developing/eluting agent ratios, and silica gel column height, enabling students to analyze predicted outcomes and refine experimental conditions; (2) virtual simulation technology for dynamic visualization of experimental results, assisting students in apparatus assembly (e.g., reflux systems) and instrument operation (e.g., liquid chromatography). The assessment system automatically evaluates performance based on experimental outcomes and operational repetitions. This digital approach actively engages students, ensures preservation of bioactive components, fosters awareness of plant utilization and conservation, and promotes environmental stewardship.

收稿: 2024-12-30; 录用: 2025-02-18; 网络发表: 2025-06-09

*通讯作者, Email: zhaojz@sxau.edu.cn

基金资助: 山西省高等学校教学改革创新项目(J20230379, J20230434, J20230387, J20230375); 山西省研究生课程思政示范课程项(2023SZ10)

Key Words: Natural product; Capsanthin; Numerical simulation; Virtual simulation; Path optimization

自古以来,天然产物中的有效成分与人类生产生活息息相关,但研究这些有效成分,往往需要很多复杂工序^[1-3]。然而,天然产物种类多、结构复杂,若提取方法不当容易造成有效成分的失活,使得分离和纯化过程变得困难且耗时^[4,5]。“从红辣椒中提取辣椒红色素”作为一个综合性实验,经过长期的线下实验,发现存在以下问题:(1)实验提取率低,实验结果不明显或无结果。用无水乙醇提取辣椒红色素时,若提取温度和溶剂量不合适,规定时间内提取率降低,会增加后续分离纯化难度。(2)实验原理理解不够深入,缺乏实验路径的优化。该实验涉及到的实验原理较多,学生无法建立数值模拟与结果优化之间的关联,缺乏结果逆分析的能力。(3)实验学时有限,无法实现对实验内容的反复学习和深入理解。实验步骤较多,因学生实验操作不当,往往会导致实验失败。(4)实验结果的描述过于表象化,缺乏数据支撑。辣椒红色素的提取率需经过高效液相色谱(HPLC)测试,但限于实验条件,无法调节影响提取率的实验因素。(5)实验教学意义过于浅显,缺乏对实践育人理念的升华。该实验教学的意义仍停留在实验操作技能的提升上,无法使学生领悟实验条件优化对植物提取的影响意义,不仅在于活性成分的挖掘,更在于对自然资源的利用与保护。

因此,为了解决上述难题,在实验教学中融入数字化设计就显得十分必要且迫切。鉴于该实验呈现出多原理、精操作、分阶段、递进式等特点,拟采用数值模拟与虚拟仿真技术相结合的方式,进行数字化实验教学设计。即利用数值模拟进行条件因素分析、优化路径,利用虚拟仿真技术进行实验装置搭建和HPLC仪器操作,模拟真实实验场景,如图1所示。

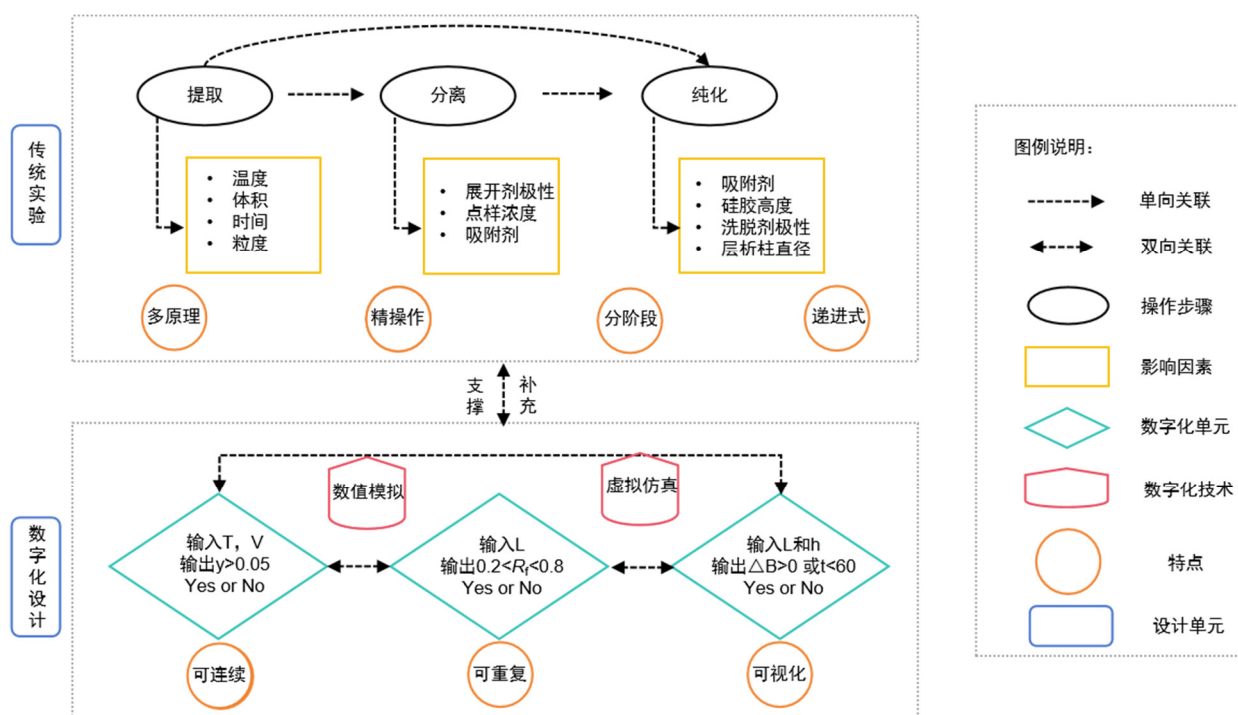


图1 数字化设计实验与传统线下实验关联及流程

1 数字化设计实验的教学目标

1.1 数字化设计原型实验的教学目标

- (1) 了解红辣椒所含色素的种类,理解溶剂提取和色谱分离法的基本原理、分离与纯化方法;
- (2) 熟练操作薄层色谱和柱色谱的一般步骤,并能根据实验结果优化实验方案;

- (3) 在实验中能够与团队成员和谐相处，协作共事，并发挥积极作用；
 (4) 能够认识到自然资源的开发、利用与保护的重要性，提升绿色环保理念。

1.2 数字化设计实验的教学目标

- (1) 加深对实验原理和内容的理解与掌握，学会进行因素分析，探寻实验规律；
 (2) 熟练正确地搭建实验装置，并能完成HPLC等仪器的操作；
 (3) 能够打破思维，大胆创新，改进优化实验方案。

2 数字化设计实验的功能定位

- (1) 对传统验证性实验的重要补充。

传统的从红辣椒中提取红色素实验具有步骤多、难操作等特点，为适应在有限学时内完成教学任务，该实验通常情况下被设置为验证性实验，即学生在给定的实验条件下得到相同的实验结果，甚至多人以小组形式完成，这种教学模式严重限制了学生的创新思维和主观能动性。数字化设计的融入，可为学生提供反复尝试、深入学习实验理论和实验内容的机会，以及提升通过实验结果分析不断优化实验路径的逆分析能力。

- (2) 对实践育人理念的进一步提升。

数字化设计融入到实验教学中，不仅将验证性实验向创新性实验转变，更重要的是能够鼓励学生接受新事物、打破思维、大胆创新。让学生由“听指令”做得好，向“我做主”做得好转变，切实落实以学生为中心。

3 数字化设计实验的原理及内容

3.1 数字化设计原型实验的原理和内容

(1) 辣椒红色素的提取原理：采用溶剂提取法，即以乙醇作为提取溶剂，将辣椒红色素从成熟红辣椒的果皮中置换、溶出的过程^[6]，如图2所示。

(2) 薄层色谱法分离辣椒红色素的实验原理^[7]：不同物质在固定相和流动相之间的分配系数不同，导致它们在薄层板上的移动速度有差异，从而实现分离，如图3所示。

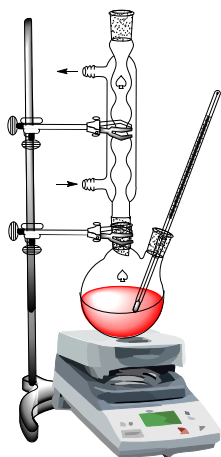


图2 溶剂提取实验装置图

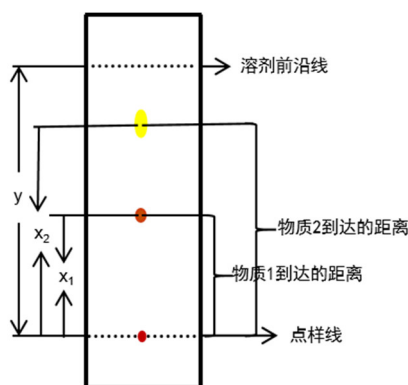
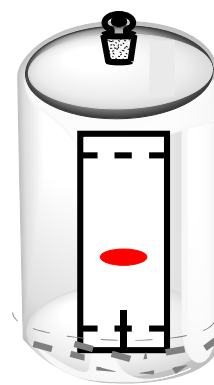


图3 薄层层析实验原理及装置图



(3) 硅胶柱色谱纯化辣椒红色素的实验原理^[8]：硅胶为固定相，样品中各组分与硅胶吸附力不同。当流动相流经硅胶柱时，吸附力弱的组分移动快，吸附力强的组分移动慢，从而使各组分分离纯化，如图4所示。

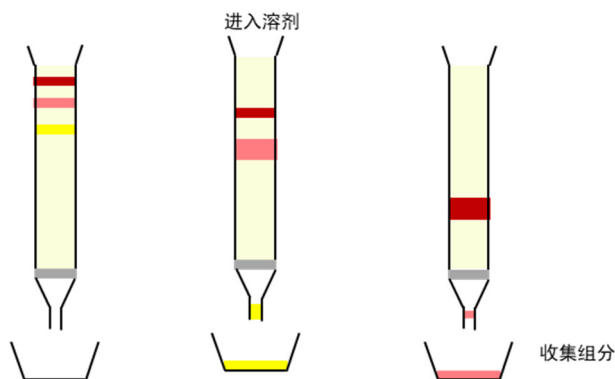


图4 柱层析实验装置图

3.2 数字化设计内容的科学原型和原理

针对辣椒红色素的提取与薄层层析分离，均选择插值算法进行拟合求解。在提取部分，以温度和体积作为自变量，提取率作为因变量，利用二维三次样条插值法进行拟合。在分离部分，分别使用一维三次样条插值法对其他洗脱剂比例下的 R_f2 和 R_f3 (R_f2 和 R_f3 分别为辣椒玉红素、辣椒红色素的比移值)进行拟合求解。针对柱层析纯化步骤，选择先对数据进行插值处理后再用神经网络算法进行拟合，其中插值方法选择线性插值和循环插值，得到预测时间与三种色带的分离情况。

4 数字化设计实验的教学实施

4.1 主要的实验试剂及仪器

辣椒红色素提取实验使用的主要试剂及仪器如表1、表2所示。

表1 主要实验试剂

试剂	规格	厂家
干红辣椒	500 g/袋	太原市小店区佳翔瑞有限公司
无水乙醇	分析纯	天津市天大化工实验厂
石油醚	分析纯	天津市汇杭化工科技有限公司
乙酸乙酯	分析纯	天津市天大化工实验厂
柱层析硅胶	200-300 目	青岛海湾精细化工有限公司
无水硫酸钠	分析纯	天津市天大化工实验厂

表2 主要实验仪器

实验仪器	规格/型号	厂家
两口圆底烧瓶	50 mL、19#	蜀牛玻璃仪器有限公司
球形冷凝管	19#	北京欣维尔玻璃仪器有限公司
层析缸	6.5 cm × 10.5 cm	北京欣维尔玻璃仪器有限公司
具砂板层析柱	30 cm × 1.5 cm	安徽韦斯实验设备有限公司
循环水真空泵	SHZ-III	上海亚荣生化仪器厂
电子天平	JX-C6002	五鑫衡器有限公司
多功能粉碎机	1000C	永康市红太阳机电有限公司
液相光谱仪	L600	河北乾冀检测技术服务有限公司
旋转蒸发器	RE-52AA	上海亚荣生化仪器厂

4.2 软硬件要求

(1) 软件要求：需要搭建MATLAB数值模拟软件、虚拟仿真实验开放共享平台，有效进行虚拟仿真课程、实验项目操作、在线指导、结果评价等管理；充分利用校级自主学习平台搭建实验教学相关的讲义、课件，以及实验操作视频等线上自主学习资源。

(2) 硬件要求：需要配备基本的化学实验仪器，用于线下实验操作和验证；需要有足够数量的计算机，且计算机的配置要能够流畅运行虚拟仿真实验平台和数值模拟软件，如配备Intel Core i5及以上处理器、8 GB及以上内存、独立显卡等，以保证虚拟实验和数值模拟的顺利进行。要求校园网络或实验室网络稳定，带宽能够满足多个学生同时在线进行虚拟仿真实验和数据传输的需求，确保实验过程中不会出现卡顿或数据传输中断的情况。

4.3 数字化设计实验前准备

(1) 教师准备：教师需准备好相关的数字化教学资源，并根据实验内容和教学目标设计好教学流程和教学评价方式。

(2) 学生预习：学生在实验前需通过线上学习平台预习实验原理、实验步骤和相关的理论知识，观看虚拟仿真实验演示视频，对数字化实验步骤进行课前预习，了解实验过程和注意事项以及对实验条件因素的探究。

4.4 数字化设计前期的数据采集

(1) 粗辣椒红色素的提取。

实验参数的定量包括辣椒品种及粒度、辣椒质量、提取时间。实验参数的变量包括提取温度、提取溶剂的体积量，其中温度设置成室温、40、50、60、65、70 °C共计6个温度梯度，溶剂体积设置为15、20、25、30、35 mL。

经HPLC测试，计算得出30组提取效率数据。通过式(1)计算得出提取效率的合理范围在0.05–1之间。

$$y = (C_{\text{样}} \times 40 \times V_{\text{样}} \times 100) / m_{\text{样}} \quad (1)$$

其中 $C_{\text{样}}$ 为辣椒红色素粗品进样前的浓度值($\text{g} \cdot \text{mL}^{-1}$)；40为浓度稀释的倍数； $V_{\text{样}}$ 为辣椒红色素粗品的体积(mL)； $m_{\text{样}}$ 为辣椒红色素粗品的质量(g)； y 为1 g红辣椒中红色素的百分含量(%)^[9]。

(2) 粗辣椒红色素的薄层层析分离。

实验参数的定量包括硅胶板的规格、粗辣椒红色素的浓度。实验参数的变量包括展开剂比例，即石油醚与乙酸乙酯的比值设置范围为1–25，间隔为1。

通过实验，共获得了25组比移值和间隔带宽度。通过式(2)计算得出 R_f2 和 R_f3 值合理范围在0.2–0.8之间。

$$R_f = \frac{x}{y} \quad (2)$$

其中 y 为溶剂前沿至原点中心的距离； x 为溶质的最高浓度中心至原点中心的距离； R_f 为各斑点的比移值^[10]。

(3) 粗红色素的柱层析纯化。

实验参数的定量包括色谱柱的直径及高度、柱层析硅胶的规格、上样浓度。实验参数的变量包括硅胶柱高度和洗脱剂比例数值，其中硅胶高度分别设置为5、10、15、20、25 cm，洗脱剂石油醚与乙酸乙酯的比值设置为10、20、30、40、50。

通过实验，共获得了25种条件下的洗脱时间和色带宽度，得出洗脱的合理时间在180 min之内。

4.5 数字化教学实验步骤

4.5.1 数值模拟步骤

(1) 进入实验界面，点击第一步溶剂提取。

设置提取温度，设置范围为25–75 °C，超出范围需重新设置；设置提取溶剂体积，设置范围为15–35 mL，超出范围需重新设置。进行HPLC仪器操作，输出提取率数值。当该值低于0.05，实验失

败, 返回重新设置, 运行成功后进行第二步。

(2) 点击第二步薄层层析分离。

制备薄层板: 选择石油醚和乙酸乙酯作为展开剂, 设置比例值, 设置范围为6–18, 超出范围需重新设置。点击运行按钮, 观察薄层板上各斑点的动态变化。爬板结束, 输出三种色带的比移值 R_{f1} (R_{f1} 为 β -胡萝卜素的比移值)、 R_{f2} 和 R_{f3} 。当 R_{f2} 和 R_{f3} 值低于0.2或高于0.8均为实验失败, 返回开始重新设置, 运行成功后进行第三步。

(3) 点击第三步柱层析纯化。

点击洗脱一带按钮, 输入硅胶高度, 设置范围为5–25 cm, 超出范围需重新设置; 输入洗脱剂比例值, 设置范围为比例值大于1, 超出范围需重新设置。点击运行, 显示一带洗脱结束时, 输出一带与二带之间的间距(一带色带上端和二带色带下端之间的距离值)和用时, 当间距为零或用时超过30 min时, 实验失败, 需返回重新设置, 运行成功后继续洗脱二带。

点击洗脱二带按钮, 输入洗脱剂比例值, 设置范围为比例值大于1, 超出范围需重新设置。点击运行, 显示二带洗脱结束时, 输出二带与三带之间的间距(二带色带上端和三带色带下端之间的距离值)和用时, 当间距为零或用时超过60 min时, 实验失败, 需返回重新设置, 运行成功后继续洗脱三带。

点击洗脱三带按钮, 输入洗脱剂比例值, 设置范围为比例值大于1, 超出范围需重新设置。点击运行, 显示三带洗脱结束时, 输出用时, 当用时超过60 min时, 实验失败, 需返回重新设置, 运行成功后, 结束洗脱。

4.5.2 虚拟仿真步骤

(1) 学生通过虚拟仿真实验平台的操作界面进入, 进行实验参数的设置、实验仪器的搭建以及实验注意事项的熟悉理解并记忆。

(2) 辣椒红色素的提取率需经过HPLC进行测试, 学生利用虚拟仿真技术对HPLC仪器进行操作, 模拟真实实验场景, 实现对影响提取率的实验因素进行调节。

4.6 线下实验验证

学生在完成虚拟仿真实验后, 进入实验室进行线下实验验证。在实验过程中, 学生将数值模拟和虚拟仿真实验中确定的最佳实验条件应用于实际实验操作, 通过对比虚拟实验和线下实验的结果, 进一步理解实验原理和实验过程, 掌握实验技能。

4.7 实验数据处理

(1) 提取温度和溶剂体积数值的设置, 记录提取率, 以及对如何根据实验结果进行参数优化过程进行阐述;

(2) 薄层层析中展开剂比例数值的设置, 记录数据 R_{f1} 、 R_{f2} 和 R_{f3} , 以及对如何根据实验结果进行参数优化过程进行阐述;

(3) 柱层析中硅胶高度和洗脱剂比例数值的设置, 记录数据色带之间空白带宽度及洗脱时长, 以及对如何根据实验结果进行参数优化过程进行阐述。

4.8 实验报告撰写

学生根据实验结果和分析撰写实验报告, 包括实验目的、实验原理、实验步骤、实验结果、分析讨论和结论等内容。在撰写实验报告过程中, 学生应注重实验数据的准确性和实验结果的可靠性, 同时结合理论知识对实验结果进行深入分析。

5 教学评价与反馈

本实验采用过程性评价的多维考核方式, 课程成绩的组成包括实验报告(10%)、章节测验(35%)、出勤(5%)和数字化设计评价(50%)。

(1) 实验报告评分标准(10%): 评分内容包括实验目的及意义表述是否全面, 实验原理有无分析

过程, 实验装置图绘制是否标准, 步骤书写是否规范, 记录详实及表述准确、全面, 对实验结果有无进行描述、分析原因等, 具体评分标准见表3所示。

表3 实验报告评分标准

评分内容	评分标准	分值
目的及意义	目的及意义表述全面、准确1分, 不足扣0.5分	1
实验原理	实验原理有分析过程, 表述准确得1分, 不全面或不准确扣除0.5分	1
主要试剂、仪器	仪器装置图绘制搭建要求, 名称标注准确1分, 不足扣0.5分, 没有绘制0分	1
操作步骤	步骤书写规范, 记录详实, 表述准确、全面即可得4分, 表述不全面扣1-2分	4
原始数据及处理	对实验结果进行描述, 并分析原因2分, 不全面扣1分	2
讨论	注意事项及问题回答准确给予1分, 回答不充分扣0.5分	1

(2) 章节测验评分标准(35%): 主要题型为选择题、判断题等, 重复答题次数最多一次, 按照最高分进行统计。

(3) 出勤评分标准(5%): 迟到扣1分, 未完成实验早退一次扣2-3分, 缺勤此项不扣分, 但该次实验成绩记为0分。

(4) 数字化设计评价标准(50%): 该部分评分标准包括实验参数优化(40%)及实验操作演示(10%), 具体评分内容如表4所示。

表4 数字化设计评分标准*

评分内容	评分标准	分值
溶剂提取	设置次数1次成功给予20分, 2次给予10分, 3次以上5分	20
薄层层析分离	设置次数1次成功给予30分, 2次给予20分, 3次以上10分	30
柱层析纯化	各色带洗脱设置次数均为1次成功给予50分, 至少有一个色带设置次数重复2次给予40分, 至少有一个色带重复3次给予30分, 至少有一个色带重复4次给予20分, 至少有一个色带重复5次以上给予10分	50

*表中总分自动折合成40%进行分数统计

6 结语

辣椒红色素的提取是一个典型获取植物中活性成分的综合实验, 因传统线下实验中存在提取率低、实验原理解不够深入、缺乏实验路径优化等难题, 进而体现出融入数字化实验设计的必要性和紧迫性。鉴于该实验具有多原理、精操作、分阶段、递进式的实验特点, 制定出数值模拟和虚拟仿真技术相结合的数字化教学设计方案, 即利用数学建模对提取温度及溶剂、展开剂及洗脱剂比例配置、柱层析硅胶的高度等因素进行数值模拟, 帮助学生提前对路径进行优化, 加深对实验理论的理解以及实验内容的掌握, 也可避免有机溶剂的重复使用对身体的伤害。而虚拟仿真技术的结合, 不仅实现了实验结果的动态可视化, 还能帮助学生正确搭建实验装置以及HPLC等仪器的使用, 提高实验数据的可靠性和准确性。

数值模拟和虚拟仿真技术的融合使学生从“盲从”转变成“明理”, 从模糊感受实验现象到更加关注实验数据的精确, 即根据想要的结果逆向调整参数, 以自行研究的方式充分调动起学生的主观能动性。数字化实验设计是对传统线下实验的重要补充, 并能充分认识到在天然植物提取实验中, 深入分析各因素之间的关联以及实验路径的优化, 目的不仅是要保证有效成分活性及提取率, 更要提高对植物利用与保护的意识, 建立起绿色环保理念, 使实践育人得以进一步提升。

参 考 文 献

- [1] 郭瑞霞, 李力更, 王于方, 霍长虹, 付炎, 王磊, 史清文. *中草药*, **2015**, *46* (14), 2019.
- [2] 侯勇. 基于超分子结构的两种中草药化学成分及其组装功能活性的研究[博士学位论文]. 北京: 北京协和医学院, 2023.
- [3] 毕康平. 中药草薹化学成分的抗癌活性研究[硕士学位论文]. 青岛: 青岛科技大学, 2020.
- [4] 李文蔚, 朱子煜, 浩天瑞霖, 谢瑶, 罗爱芹, 梁阿新. *化学进展*, **2024**, No. 5, 667.
- [5] 阮冲, 肖小华, 李攻科. *化学试剂*, **2014**, *36* (3), 193.
- [6] 李泓楠, 刘沐霖. *中国食品添加剂*, **2020**, *31* (6), 49.
- [7] 田艳. 辣椒红色素提取、分离及辐照稳定性研究[硕士学位论文]. 长沙: 湖南农业大学, 2014.
- [8] 庞敏, 王洪新, 殷飞. *食品工业科技*, **2013**, *34* (8), 305.
- [9] 刘仁杰. 不同生长期荞麦中降糖因子含量的测定及保健饮料的研制[硕士学位论文]. 长春: 吉林农业大学, 2006.
- [10] 张翼, 郭永红, 胡志雄, 齐玉堂. *粮食与食品工业*, **2017**, *24* (5), 9.