

植物黄酮固-液萃取动力学开放实验的教学设计^①

张婷婷, 马 博, 麦馨允, 刘 芳

百色学院 农业与食品工程学院, 广西 百色 533000

摘要: 固-液萃取作为食品工业常见的分离操作技术, 以传质为基础, 涉及相平衡和扩散等理论, 知识抽象, 公式复杂, 推导繁琐, 晦涩难懂。然而, 对食品专业本科生而言, 从化学反应动力学角度认知固-液萃取工程过程更具有挑战性。为此, 实验以麻疯树籽壳为实验材料, 以 70%乙醇为浸提溶剂, 考察了提取温度和时间对麻疯树籽壳黄酮提取的影响, 并根据 Fick 第二扩散定律建立了其动力学方程, 求解了相关动力学参数, 为固-液萃取分离单元操作提供实践佐证。该实验操作简便、方法简单、材料易得, 能够强化学生对理论知识间的关联性认知、促进理论知识习得, 搭建理论与生产应用的桥梁, 可用作食品专业本科生的开放性实验。

关 键 词: 植物黄酮; 固-液萃取; 提取动力学; 教学设计; 开放实验

中图分类号: G420

文献标志码: A

文章编号: 1000-5471(2021)06-0166-08

课程是人才培养的核心要素, 课程质量直接决定人才培养质量^[1]。为此, 2019 年 10 月教育部在印发的《关于深化本科教育教学改革全面提高人才培养质量的意见》中明确提出了要全面提高课程建设质量, 实现知识、能力、素质有机融合的课程目标^[2]。然而, 课程目标的实现需要不同类型课程协作, 才能发挥其整体功能。实践教学是课程理论知识内化的主要路径, 而实验课程作为实践教学的重要载体, 在课程目标达成过程中具有不可替代的作用。随着社会经济发展和工作岗位对人才素质的要求, 传统实验教学模式拘囿于学时、课时和空间场地等因素, 难以适应当前高等教育对人才培养的需要, 学生主观能动性和创新潜质没能得到充分挖掘。开放实验作为传统实验教学模式的有益补充, 突破了时间和场地的束缚, 可激发学生学习的主动性^[3]。食品专业是关系国计民生、多学科协同发展的交叉复合应用型工科专业, 工程实践性是其本源底色, 故要求食品专业学生应具备一定的工程理念和素养, 熟悉食品生产中的主要单元操作^[4-5]。固-液萃取又称浸取或浸提, 以相际传质为特征, 广泛应用于食品工业, 是食品工程原理课程的重要内容^[6]。为了更好地辅助食品工程原理课程浸提单元操作的理论教学, 实验选题应从应用性出发, 考虑实验的安全性、可重复性和可操作性, 选取传统浸提方式, 以麻疯树籽壳为实验材料, 考察不同时间和温度下麻疯树籽壳黄酮质量浓度的变化, 从动力学角度考察固-液萃取过程, 建立了一个新型开放的实验项目。

1 实验部分

1.1 动力学模型推导

由于植物材料组织和成分的复杂性, 很难用基础理论概括浸提原理。实践中可以把植物材料合理简化, 将其看作一种多孔介质, 这样就可以将扩散理论用于浸提过程中。植物黄酮提取可以看作溶质黄酮由

^① 收稿日期: 2020-05-11

基金项目: 教育部新农科研究与改革实践项目(教高厅函〔2020〕20 号); 广西高等教育本科教学改革工程项目(2020JGA311); 2018—2020 广西本科高校特色专业及实验实训教学基地(中心)建设项目(桂教高教〔2018〕52 号); 百色学院 2019 年度校级教学改革工程项目(2019JG41)。

作者简介: 张婷婷, 博士研究生, 讲师, 主要从事民族食品资源开发与利用的研究。

通信作者: 刘 芳, 博士, 研究员。

固相向溶剂传递的过程, 主要包括溶剂浸润进入植物颗粒并溶解黄酮, 黄酮再从植物颗粒内扩散到表面(内扩散), 最后黄酮经液膜扩散到溶液主体中(外扩散), 其中, 内扩散为固-液浸提的限速步骤. 由于浸提过程中, 植物颗粒内黄酮浓度随时间延长而不断变化, 故可以用不稳定分子扩散的数学模型(即 Fick 第二扩散定律)描述^[7-9]:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D_s \left(\frac{\partial^2 c}{\partial^2 x^2} + \frac{\partial^2 c}{\partial^2 y^2} + \frac{\partial^2 c}{\partial^2 z^2} \right) \quad (1)$$

式(1)中: $\frac{\partial c}{\partial t}$ 为浓度时间梯度; $\frac{\partial^2 c}{\partial^2 x^2}$, $\frac{\partial^2 c}{\partial^2 y^2}$ 和 $\frac{\partial^2 c}{\partial^2 z^2}$ 分别为 x , y 和 z 轴上的浓度梯度; D_s 为黄酮在植物颗粒内的扩散系数; t 为浸提时间.

令

$$C_t = \frac{\partial^2 c}{\partial^2 x^2} + \frac{\partial^2 c}{\partial^2 y^2} + \frac{\partial^2 c}{\partial^2 z^2} \quad (2)$$

假设植物颗粒为均匀球形, 其黄酮以径向方式扩散, 任意取样时间黄酮质量浓度呈均匀分布, 温度和扩散系数保持恒定; 提取体系搅拌良好, 温度均一, 颗粒表面阻力可以忽略. 那么, 式(1) 可变为^[10]:

$$\frac{\partial C_t}{\partial t} = D_s \left(\frac{\partial^2 C_t}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \cdot \frac{\partial C_t}{\partial r} \right) \quad (3)$$

令 $f = C_t \cdot r$, 边界条件 $f = 0$, $C_t = 0$, $r = R$, 则:

$$\left(\frac{\partial C_{out}}{\partial t} \right) V_{out} = -D_s S \left(\frac{\partial C_t}{\partial r} \right)_{r=R} \quad (4)$$

式中, R 为植物颗粒半径, C_t 为 t 时距球表面距离为 r 处黄酮质量浓度, C_{out} 为颗粒外部液相黄酮质量浓度, S 为浸提溶剂与颗粒的接触面积.

式(4) 通过傅里叶变换法可求得:

$$\frac{C_{\infty} - C_t}{C_{\infty} - C_0} = \left(\frac{6}{\pi^2} \right) \sum_{n=1}^{\infty} \left[\exp \left(-\frac{n^2 \pi^2 D_s t}{R^2} \right) \right] \quad (5)$$

式中, C_{∞} 为黄酮的平衡质量浓度, C_0 为提取液中黄酮的初始质量浓度.

因质量浓度分布为无穷级数, 故取 $n = 1$, 则式(5) 可变为

$$\frac{C_{\infty} - C_t}{C_{\infty} - C_0} = \left(\frac{6}{\pi^2} \right) \left[\exp \left(-\frac{\pi^2 D_s t}{R^2} \right) \right] \quad (6)$$

对式(6) 两边取对数可得式(7):

$$\ln \left(\frac{C_{\infty}}{C_{\infty} - C_t} \right) = \lambda t + \ln \left(\frac{\pi^2 C_{\infty}}{6(C_{\infty} - C_0)} \right) \quad (7)$$

其中

$$\lambda = \frac{\pi^2 D_s}{R^2}$$

令相对萃取率 $\rho = \frac{C_{\infty} - C_t}{C_{\infty}}$, 由于植物颗粒提取没有预浸泡, 故 $C_0 = 0$, 式(6) 可变为

$$\rho = \left(\frac{6}{\pi^2} \right) \cdot \exp(-\lambda t) \quad (8)$$

上述式(6) 和式(7) 即为植物黄酮的动力学方程.

1.2 仪器与试剂

AL204 电子分析天平, 德国梅特勒公司; SHZ-III 循环水真空泵, 上海亚荣生化仪器厂; UV-2700 紫外可见分光光度计, 日本岛津公司; DH9626A 电热恒温鼓风干燥箱, 上海精宏设备实验有限公司; DF-101S 集热式磁力搅拌器, 常州普天仪器制造公司.

1.3 材料与方法

1.3.1 实验材料

石油醚、芦丁、无水乙醇、亚硝酸钠、九水合硝酸铝、氢氧化钠均为国产分析纯; 麻疯树种子去仁, 籽壳 50 °C 干燥后, 粉碎、过 60 目筛(半径约为 0.125 mm), 石油醚脱脂 12 h 后, 密封 4 °C 保存备用.

1.3.2 标准曲线绘制

分别准确提取 0,1.0,2.0,3.0,4.0,5.0 mL 芦丁对照品溶液(0.2 mg/mL, 30%乙醇配制)置于 25 mL 容量瓶中,加入 5 mg/mL 亚硝酸钠溶液 1.0 mL,摇匀、静置 6 min;加入 10 mg/mL 九水合硝酸铝溶液 1.0 mL,摇匀、静置 6 min;再加入 4 mg/mL 氢氧化钠 10 mL,用 30%乙醇定容,摇匀、放置 15 min 后以空白试剂为参比液,用紫外可见分光光度计于 510 nm 下测其吸光度,以吸光度为纵坐标,以芦丁质量为横坐标,绘制标准曲线. 芦丁标准曲线为 $y=0.434\ 1\ x-0.001\ 57$, 拟合度为 0.998 59, 表明其质量浓度在 0.2~1.0 mg/mL 时,与吸光度之间线性关系良好.

1.3.3 黄酮提取与测定

称取 10.0 g 脱脂麻风树籽壳粉,放入 250 mL 三口烧瓶中(事先放入磁力搅拌转子,搅拌速度 200 r/min),先加入适量 70%乙醇溶液,浸润 10 min,再加入已达到设定温度的 70%乙醇溶液至总体积 200 mL,配好冷凝管后,固定于集热式磁力搅拌器内进行回流提取. 开始进行回流时,打开搅拌器,并计时. 开始 10 min 前的最后 2 min 停止搅拌,再用 1.0 mL 的移液管吸取 0.2 mL 提取液,适当稀释后,按照 1.3.2 中方法测定吸光度;之后每隔 20 min 重复上述步骤,测定吸光度,直至吸光度稳定. 最后,将吸光度带入标准曲线方程中求出芦丁当量,并按照张婷婷等^[11]方法进行黄酮质量浓度校正.

1.3.4 数据处理与分析

实验进行 3 次重复,每次重复设置 2 个平行. 所得数据利用 Microsoft Office 2013 软件包进行处理,利用 Origin 8.5 进行数据拟合分析.

1.4 结果与分析

1.4.1 浸提温度和时间对黄酮提取的影响

浸提温度和时间对麻疯树籽壳黄酮质量浓度的影响见图 1. 由图 1 可知,浸提温度相同时,麻疯树籽壳黄酮质量浓度平衡前随时间增加而增大;浸提时间相同时,其黄酮质量浓度随温度增加而增大. 在浸提时间为 10 min 和 190 min 时,不同温度下黄酮质量浓度分别依次为 0.63,0.66,0.74,0.84 和 0.94 mg/mL 与 0.84,0.87,1.02,1.14 和 1.26 mg/mL;此外,浸提温度为 318 K 时,黄酮质量浓度平衡时间为 170 min;而 348 K 时的平衡时间减少至 130 min. 可见,高温浸提时,麻疯树籽壳黄酮的提取效率增加,黄酮质量浓度平衡所需时间缩短. 此外,温度超过 338 K 后黄酮提取效率增加明显,这可能与高温提取时,溶解表面张力和黏度降低,溶质黄酮分子溶解度增大,分子运动加速,扩散加快有关^[11-12].

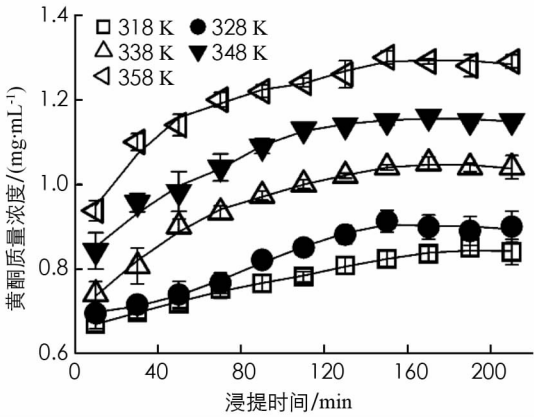


图 1 不同温度和时间下提取液中黄酮质量浓度

1.4.2 浸提速率常数求解

根据图 1 中的实验数据,先求出 $\ln[C_{\infty}/(C_{\infty}-C_t)]$,再与浸提时间 t 进行线性拟合. 所得拟合方程、拟合度和浸提速率常数及平衡质量浓度见表 1. 由表 1 可知, $\ln[C_{\infty}/(C_{\infty}-C_t)]$ 与时间 t 的线性关系良好,拟合系数 R^2 均在 0.980 以上. 浸提速率常数随温度升高而加快,在每秒 $2.39\times10^{-4}\sim3.97\times10^{-4}$ 之间;黄酮平衡质量浓度也随温度增加而增大,在 0.84~1.29 mg/mL 之间.

表 1 麻疯树籽壳黄酮浸提动力学参数

温度/K	拟合方程	λ/s	R^2	$C_{\infty}/(mg\cdot mL^{-1})$	$t_{1/2}/min$	$D_s/(mm^2\cdot min^{-1})$	$E_a/(kJ\cdot mol^{-1})$
318	$\ln(1/\rho)=0.014\ 35\ t+1.225\ 60$	2.39×10^{-4}	0.988 62	0.84	48.30	2.27×10^{-5}	
328	$\ln(1/\rho)=0.017\ 67\ t+1.060\ 88$	2.95×10^{-4}	0.990 93	0.90	39.23	2.80×10^{-5}	
338	$\ln(1/\rho)=0.020\ 10\ t+0.967\ 30$	3.35×10^{-4}	0.987 30	1.04	34.48	3.18×10^{-5}	11.33
348	$\ln(1/\rho)=0.021\ 13\ t+0.397\ 60$	3.52×10^{-4}	0.980 70	1.15	32.80	3.35×10^{-5}	
358	$\ln(1/\rho)=0.023\ 79\ t+1.117\ 95$	3.97×10^{-4}	0.995 08	1.29	29.14	3.77×10^{-5}	

1.4.3 活化能求解

活化能是麻疯树籽壳黄酮提取过程中需克服的能障, 可由温度与浸提速率常数之间关系求得, 二者一般遵守阿伦尼乌斯公式, 即

$$\lambda = Ae^{\frac{-E_a}{RT}} \tag{9}$$

对式(9) 两边取对数可得:

$$-\ln\lambda = -\ln A + \frac{E_a}{RT} \tag{10}$$

式中, λ 为黄酮浸提速率常数(s^{-1}); A 为前指因子; E_a 为活化能(J/mol); R 为摩尔气体常数(8.31 J/mol); T 为浸提温度(K).

根据式(10), 利用表 1 中 λ 值, 对 $\ln\lambda$ 和 $1/T$ 进行线性拟合. 由图 2 可知, 拟合系数 R^2 为 0.950 15, 表明二者线性关系良好. 可通过斜率 $\frac{E_a}{R}$ 求得活化能为 11.33 kJ/mol.

1.4.4 有效扩散系数和半衰期求解

麻疯树籽壳黄酮提取过程中, 不同温度下的有效扩散系数 D_s 可由式(7) 求得; 麻疯树籽壳黄酮提取浓度达到其平衡质量浓度一半时所需时间为其半衰期, 即 $t_{1/2}$, 可由式(11) 求得.

$$t_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} \tag{11}$$

由表 1 和图 3 可知, 随着浸提温度升高, $t_{1/2}$ 逐渐降低, 有效扩散系数 D_s 逐渐增加. 分别通过对 $t_{1/2}$ 和 D_s 与温度作图, 进行拟合可得二者的拟合方程分别 $y = 2\,568.447\,e^{-0.012\,61x}$ 和 $y = 3.536\,74 \times 10^{-7}x - 8.881\,62 \times 10^{-5}$, 拟合系数 R^2 分别为 0.932 31 和 0.965 07. 可见, 在实验温度范围内, $t_{1/2}$ 和浸提温度呈指数负相关, 而有效扩散系数 D_s 与浸提温度呈线性正相关, 且可由拟合方程求得 318 ~ 358 K 任意温度下 D_s 和 $t_{1/2}$.

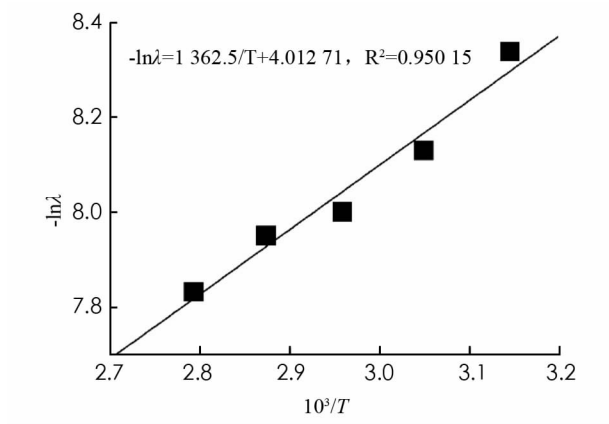


图 2 $-\ln\lambda$ 与温度之间的关系

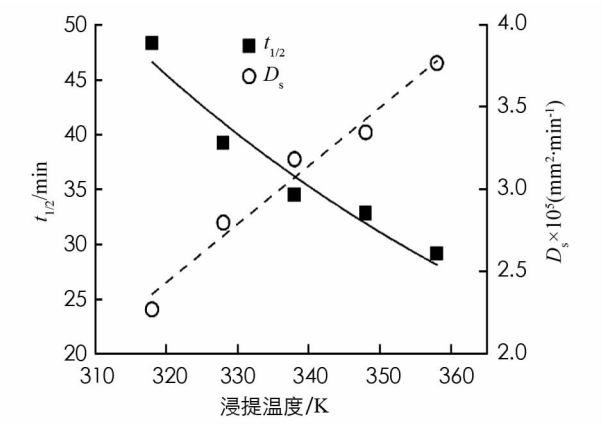


图 3 半衰期和有效扩散系数与浸提温度之间的关系

1.4.5 相对萃取率求解

麻疯树籽壳黄酮提取过程中, 不同温度和时间下的相对萃取率可由式(8)求得. 通过整理图 1 数据, 做相对萃取率 ρ 与时间 t 的关系函数, 可得不同浸提温度下 ρ 的拟合方程. 由表 2 可知, 不同浸提温度下的 ρ 与 t 呈指数关系, 且拟合相关系数均在 0.97 以上, 说明二者指数相关性较高. 可见, 麻疯树黄酮提取过程的相对萃取率可用指数模型进行解释. 此外, 由相对萃取率指数拟合方程求得的浸提速率常数 λ 与表 1 中 λ 有一定偏差, 可能是由于采用不同拟合模型造成的. 但基于拟合方程相关系数, 在浸提温度 318K 和 328K 时, 指数模型求解下的 λ 可能更加可信.

1.5 实验小结

麻疯树作为一种多用途作物, 在生物柴油和医药方面具有较大的应用前景^[13]. 麻疯树籽壳作为生物柴油生产的副产物之一, 含有包括黄酮在内的多种活性成分^[14]. 实验考察了麻疯树籽壳黄酮的浸提过程, 发现黄酮提取效率、黄酮平衡质量浓度、提取速率常数和有效扩散系数随提取温度增加而增大, 而半衰期随

温度的增加而减少;提取所需活化能为 11.33 kJ/mol. 以 Fick 第二扩散定律推导的动力学模型能够描述麻疯树籽壳黄酮提取过程,这为其工业化生产提供了参考.

表 2 不同温度下相对萃取率与时间的关系

温度/K	指数方程	R^2	λ/min^{-1}
318	$y=0.282\ 89\text{e}^{-0.015\ 26t}$	0.993\ 56	0.015\ 26
328	$y=0.352\ 99\text{e}^{-0.016\ 2t}$	0.991\ 48	0.016\ 20
338	$y=0.356\ 23\text{e}^{-0.018\ 45t}$	0.983\ 66	0.018\ 45
348	$y=0.330\ 77\text{e}^{-0.019\ 47t}$	0.975\ 32	0.019\ 47
358	$y=0.334\ 55\text{e}^{-0.022\ 84t}$	0.987\ 55	0.022\ 84

2 实验教学设计

2.1 实验教学目标

知识目标:通过查阅资料,了解植物中黄酮种类和功效,熟悉黄酮测定的原理,理解固-液浸提的原理,明确浸提过程的关键步骤和注意事项,并能够运用所学知识分析解释实验现象.

能力目标:能够正确组装回流浸提实验装置;熟练掌握分光光度计的使用方法和利用分光光度计测定黄酮的方法;能够用数学语言描述浸提过程,通过合理假设建立模型并求得解析解;能够通过实验数据正确求解动力学参数,学会使用 Excel 和 Origin 软件进行数据处理和作图.

情感态度和价值目标:通过实验的实施,引导学生理论联系实际,激发学生的学习兴趣,培养学生的团队合作意识,养成学生一丝不苟、百折不挠、精益求精的科学态度,锻炼学生运用辩证唯物主义观点和科学方法论来考察、分析和处理工程过程中的实际问题,树立工程观念和绿色环保理念.

2.2 实验教学安排

本开放实验主要是针对具有一定数学、物理和化学基础理论知识的本科生开设,属于专业基础实验课程,主要考察植物黄酮固-液萃取的动力学过程.该实验不仅可用于食品专业,也可用于化工和制药等涉及萃取单元操作的相关专业.另外,浸提温度梯度可由小组人数确定,一般 3 到 4 个温度即可,这样既能保证实验的训练效果,又能缩短实验周期,且实验不需连续进行、相对灵活,有利于实验的顺利完成.

2.3 实验教学环节

基于实验教学目标和实验本身特点,可将其划分为方案设计、实验准备、实验实施及实验总结 4 个阶段.

在实验方案设计阶段,指导教师发布实验课题、明确实验目的、规定实验方案撰写格式,学生分析实验课题、领会实验要求,查阅文献,研读、归纳和总结,提出实验初步方案.指导教师综合评价实验方案的可行性,提示存在的问题,提出修改意见,返回给学生进行修改.此过程反复多次,待实验方案趋于完善后,经过现场答辩,指导教师确认方可进入实验准备阶段.实验方案设计期间,小组成员要充分讨论,发挥集体智慧;教师应适时指导,肯定学生新的实验思路和方法,最大限度地调动学生的实验热情.

在实验准备阶段,指导教师应参与学生实验实施前的准备工作,以便及时指导;学生不但要准备药品试剂、选择仪器设备并安装调试,还要进行预实验,熟悉仪器设备使用方法和实验操作步骤,并根据预实验情况对实验方案做进一步的调整完善.期间,要求学生能够恰当地选择实验材料、合理地选用仪器设备、科学地计算药品试剂用量.

在实验实施阶段,实验小组按照实验方案开展实验研究,以达到预期目标.如若对实验数据不满意,允许同一实验进行多次重复实验,直至实验数据达到理想.该阶段,学生作为研究主体,应发挥其主导作用,独立解决实验过程中出现的问题.实验实施阶段要求学生准确描述实验过程中的实验现象,规范记录实验条件和结果,培养严谨求实的科研习惯,养成良好的科研素养.

在实验总结阶段,要求学生根据实验结果进行合理的分析和推理,得到科学的结论;同时要撰写实验总结报告,以小组为单位进行答辩汇报.开放实验注重学生通过实验达到探究能力的生成,即使实验结果不好,只要学生能够经过讨论分析,找出原因,提出解决的可能方案也应得到教师的肯定.

2.4 实验教学考核

基于开放实验课程特点, 其课程考核应是形成性评价和终结性评价相结合, 坚持评价过程动态化、评价主体多元化、评价方式多样化和评价依据标准化。

课程动态化评价注重阶段学习成果的形成性评价, 它贯穿于整个学习过程^[15]。开放实验课程考核全周期进行, 能够促进实验效果内化和持续改进, 提高学生实验的主动性。教师主导下的传统实验考核忽略了学生作为考核主体的价值, 学生作为考核主体能够实现学生自评和组内组间互评, 评价更加客观。开放实验评价可采用多种方式, 如在实验方案设计阶段可以采用“设计报告+答辩”的形式, 实验准备阶段可以采用“现场操作考核”的形式, 实验实施阶段可以采用“查阅原始记录+观看实验录像”的形式等, 多样化的评价方式能够更全面地反映学生实验过程的习得。

评价过程动态化、评价主体多元化和评价方式多样化要求评价依据标准化。然而, 由于开放实验的不确定性, 尚未有统一标准对开放实验的教学进行评价。本文结合植物黄酮固-液萃取动力学的实验属性, 从实验开展的 4 个环节、20 个考核要点, 制定了相应的考核指标, 并对每个考核指标进行了赋分, 共计 100 分(表 3)。学生成绩评定可根据团队或者个人考核指标完成情况计分, 采用分数累加方式评定学生的学习成绩。

表 3 实验考核细则

教学环节(分值)	考核要点	考核指标	指标分值
实验方案设计 (25 分)	文献阅读	篇数足够(≥ 15 篇), 能够对文献内容进行归纳总结	2
	方案设计	实验方法科学, 实验逻辑清晰, 时间安排得当, 可行性强	6
	方案撰写	设计方案格式规范, 内容详实, 条理清楚	6
	方案提交	按照计划及时提交	2
	汇报答辩	PPT 制作精美, 答辩语言流畅、思路清晰、回答问题准确	6
	情感价值	团队意识, 辩证思维, 具备发展理念	3
实验准备 (20 分)	仪器设备	设备选用恰当, 了解设备正确使用方法	4
	药品试剂	用量计划合理, 计算准确、配制正确、保存得当	8
	实验方法	理解黄酮测定原理, 了解实验测定步骤	4
	情感价值	团队意识, 生态安全, 科学严谨, 具备发展理念	4
实验实施 (20 分)	设备使用	正确组装实验装置, 规范使用仪器设备	6
	实验操作	熟悉实验操作流程, 把握实验关键步骤	6
	现象解释	利用所学知识解释实验现象	4
	数据记录	准确清晰记录实验原始数据	2
	情感价值	团队意识, 科学精神, 辩证思维	2
	数学模型	根据实验条件, 选用数学模型, 正确推导, 求得解析解	8
实验总结 (35 分)	数据处理	利用 Excel 2013 和 Origin 8.5 处理数据, 求得动力学参数; 芦丁标准曲线拟合度 $R^2 \geq 0.99$, 其他拟合方程 $R^2 \geq 0.90$	15
	总结报告	格式规范, 结构完整, 步骤详细, 图文并茂, 结论科学	5
	汇报答辩	内容熟悉, 思路清晰, 回答问题准确流畅, 结果讨论充分	4
	情感价值	团队意识, 辩证思维, 工程理念	3

3 实验项目特点

3.1 可行性

植物黄酮分布广泛、种类多样, 具有抑菌、消炎、抗氧化和抗病毒等多种功能, 能够预防癌症、心血管疾病、阿尔茨海默病、糖尿病及肥胖等多种慢性疾病^[16]。实验以植物黄酮为对象, 兼有知识性和趣味性, 能够激发学生的实验兴趣。另外, 本实验用到的实验材料易得、仪器设备简易、测试方法成熟、实验步骤简单, 保证了实验结果的可重复性。此外, 本实验灵活, 能够在较短时间内完成, 适合具有一定理论知识基础的中高年级本科生作为课外拓展实验, 独立开展。

3.2 可拓展性

随着植物提取物在天然药物和膳食产品中应用日益广泛,基于传质原理的固-液萃取过程更加受到关注,一些新兴辅助提取手段和动力学模型已用于提取过程的优化^[6].故本实验可根据课程安排和学生自身情况,结合专业竞赛、创新创业训练计划项目及毕业论文设计等专业实践环节,进行实验拓展.如实验材料方面,选用其他常见富含黄酮的植物材料,考察其黄酮萃取过程;实验内容方面,可探究植物中多酚和多糖等其他功能成分的萃取过程;实验方法方面,改变植物颗粒尺度和萃取溶剂,探究其对黄酮萃取过程的影响;实验手段方面,利用超声、微波、超临界及改变电场或压强等辅助手段,探究其萃取过程的变化;模型选用方面,可选用不同动力学模式进行拟合和验证,考察其适用性.

3.3 潜在思政性

“引人以大道、启人以大智”是课程教学的目的归属.实验教学作为理论教学延伸,是学生理论知识内化的重要渠道,蕴含着丰富的哲学原理和思政元素.课程思政可以贯穿“植物黄酮固-液萃取动力学”实验的各个环节.在实验方案设计阶段,通过布置实验课题,查阅资料,让学生了解固-液萃取的发展现状,引导学生用发展的眼光看待问题;理解萃取实验原理,通过过程分解法使学生认识到萃取实质是由浓度差引起的传质过程,有助于培养学生透过现象认识本质的思维习惯;实验方案设计过程中,选择工农业废弃物作为实验材料,选用经济和无污染的药品试剂,使学生树立绿色、循环、低碳的发展理念.在实验准备阶段,强调实验室安全和“三废”处理,开展生态安全教育;通过精确计算实验试剂用量,使学生养成科学严谨和节约资源的实验习惯.在实验实施阶段,要求学生如实记录实验数据,开展重复实验,获得理想的实验数据,使其养成实事求是、一丝不苟、不怕困难、坚忍不拔和精益求精的实验态度,并认识到实验的前进行和曲折性.在实验总结阶段,根据事物的普遍性和特殊性,要求学生能够用数学语言描述萃取过程,通过合理假设和条件约束,将复杂问题简单化,经归纳演绎,建立萃取动力学模型,掌握科学的逻辑思维方法;同时,引导学生理性看待实验结果,并用辩证唯物主义思想去分析问题,审视实验过程,有助于学生实验技能的提升、科学思维方式和工程理念的养成.此外,实验开展过程中,通过实验分组可以培养学生的大局意识和团队精神.本实验将专业知识、能力培养与价值引领相结合,能够促进学生树立正确的人生观和世界观.

4 结 语

实验以油料作物麻疯树的籽壳为实验材料,采用球形模型,利用 Fick 第二扩散定律推导的数学模型,较好地描述了麻疯树籽壳黄酮固液萃取的动力学行为.该实验操作简便、方法简单、材料易得,可拓展性强,且具有潜在的思政性;其作为开放实验,有助于强化课程知识间的联系,激发学生的学习兴趣、树立学生工程理念、培养学生理论联系实际和分析、解决问题的能力,促进学生专业成才与精神成人的同向同行.

参考文献:

- [1] 教育部. 教育部关于深化本科教育教学改革全面提高人才培养质量的意见 [EB/OL]. (2019-09-29)[2019-10-08]. http://www.moe.gov.cn/srcsite/A08/s7056/201910/t20191011_402759.html.
- [2] 教育部. 教育部关于一流本科课程建设的实施意见 [EB/OL]. (2019-10-24)[2019-10-29]. http://www.moe.gov.cn/srcsite/A08/s7056/201910/t20191031_406269.html.
- [3] 范 芳. 生物类专业开放式实验教学模式研究 [J]. 实验技术与管理, 2016, 33(4): 198-200.
- [4] 薛 山, 江文辉, 李变花. 新工科浪潮下四段式混合教学金课建设探索与实践——以《食品安全与卫生学》为例 [J]. 食品与发酵工业, 2020, 46(10): 303-308.
- [5] 贺 羽, 王 帅, 宋 慧. 新工科背景下的食品工程原理教学模式改革及评价体系构建 [J]. 西南师范大学学报(自然科学版), 2019, 44(8): 134-138.
- [6] BOTH S, STRUBE J, CRAVATTO G. Mass Transfer Enhancement for solid-Liquid Extractions [M]//CHEMAT F, STRUBE J. Green Extraction of Natural Products: Theory and Practice. Weinheim: Wiley-VCH, 2015: 101-144.
- [7] 中国食品发酵研究院, 中国海城工程科技股份有限公司, 江南大学. 食品工程全书(第一卷) [M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2008: 498-500.

- [8] ZHOU C S, YU X J, MA H L, et al. Solid-Liquid Extraction Kinetics of Flavonoids from Okra (*Abelmoschus esculentus* L. Moench) Pods with Applicability Analysis [J]. Advanced Materials Research, 2013, 750-752: 1560-1566.
- [9] CHAN C H, YUSOFF R, NGOH G C. Modeling and Kinetics Study of Conventional and Assisted Batch Solvent Extraction [J]. Chemical Engineering Research and Design, 2014, 92(6): 1169-1186.
- [10] 欧阳平, 张高勇, 康保安, 等. 苦叶七中类黄酮提取的动力学及相关热力学研究 [J]. 中成药, 2004, 26(12): 991-995.
- [11] 张婷婷, 马 博, 麦馨允, 等. 密蒙花黄色素提取动力学及其糯米饭染制工艺 [J]. 食品与发酵工业, 2020, 46(12): 206-212.
- [12] TORUN M, DINCER C, TOPUZ A, et al. Aqueous Extraction Kinetics of Soluble Solids, Phenolics and Flavonoids from Sage (*Salvia Fruticosa* Miller) Leaves [J]. Journal of Food Science and Technology, 2015, 52(5): 2797-2805.
- [13] ABDELGADIR H A, STADEN VAN J. Ethnobotany, Ethnopharmacology and Toxicity of *Jatropha curcas* L. (Euphorbiaceae): A Review [J]. South African Journal of Botany, 2013, 88: 204-218.
- [14] 马 博, 张婷婷, 李荣峰. 麻疯树籽壳不同极性部位 DNA 损伤保护作用及其化学成分分析 [J]. 基因组学与应用生物学, 2018, 37(6): 2518-2526.
- [15] 周勇祥. 工学结合背景下高职英语课堂教学有效性探讨 [J]. 职业技术教育, 2012, 33(20): 31-33.
- [16] OWONA B A, ABIA W A, MOUNDIPA P F. Natural Compounds Flavonoids as Modulators of Inflammasomes in Chronic Diseases [J]. International Immunopharmacology, 2020, 84: 106498.

Experimental Design of Extraction Kinetics of Plant Flavonoids

ZAHNG Ting-ting, MA Bo, MAI Xin-yun, LIU Fang

College of Agricultural and Food Engineering, Baise University, Baise Guangxi 533000, China

Abstract: Solid-liquid extraction was conventional separation technique in food industry, based on mass transfer theory and involved in the law of diffusion and phase equilibrium, and possess the characteristics of abstract knowledge, complex equation, tedious derivation and difficulty to understand. Moreover, it is a challenge to comprehend the process of solid-liquid extraction from the view of chemical kinetics for food specialty undergraduates. In order to provide a case of solid-liquid extraction operation, The effects of temperature and time on the extraction of flavonoids from *Jatropha curcas* seed shell were investigated, and the extraction process was described well by the kinetics equation according to Fick's second law and spherical model and the related parameters were gained, such as active energy, extraction rate constant, effective diffusion coefficient and half-life. The open experiment held didactic applicability by right of the advantages of easy operation, simply method and available materials. In addition, the benefit of the experiment was that it could contribute to acquainting the relevance of theoretical knowledge and motivating learning interest. In conclusion, it could be used as an open experiment for bachelor's degree food specialty students.

Key words: plant flavonoids; solid-liquid extract; extract kinetics; teaching design; open experiment

责任编辑 周仁惠