

大孔树脂吸附梨果实中棒曲霉素的动力学模型研究

王耀晖[#], 马长治[#], 郭振宇, 郑雅云, 薛华丽^{*}

(甘肃农业大学理学院, 兰州 730070)

摘 要: **目的** 建立大孔树脂吸附梨果实中棒曲霉素的动力学模型。**方法** 以 XDA-600 型大孔树脂作为吸附剂吸附梨果汁中棒曲霉素, 分析了吸附等温线、吸附热力学和动力学特征。**结果** 当温度为 25 °C 时, XDA-600 型大孔树脂对梨果汁中棒曲霉素具有良好的吸附效果。吸附热力学模型显示: 大孔树脂对梨果汁中棒曲霉素的吸附符合 Freundlich 等温线模型($r^2 > 0.90$), XDA-600 型大孔树脂对梨果汁中棒曲霉素的吸附更符合准二级速率方程。**结论** XDA-600 型大孔树脂适合梨果汁中棒曲霉素的吸附。

关键词: 棒曲霉素; 梨果汁; 吸附; 大孔树脂

Study on the kinetic model of adsorption patulin in pear juice by macroporous resin

WANG Yao-Hui[#], MA Chang-Zhi[#], GUO Zhen-Yu, ZHENG Ya-Yun, XUE Hua-Li^{*}

(College of Science, Gansu Agriculture University, Lanzhou 730070, China)

ABSTRACT: Objective To establish the kinetic model of adsorption patulin in pear juice by macroporous resin. **Methods** XDA-600 macroporous resin was used as adsorbent to adsorb patulin in pear juice, and the adsorption isotherms and adsorption thermodynamics and kinetics were analyzed. **Results** When the temperature was 25 °C, XDA-600 macroporous resin had good adsorption effect on patulin in pear juice. The adsorption thermodynamic model showed that macroporous resin adsorbed patulin in pear juice in accordance with Freundlich isotherm ($r^2 > 0.90$), and the adsorption of patulin in pear juice by XDA-600 macroporous resin was more in line with the quasi-secondary rate equation. **Conclusion** XDA-600 macroporous resin is suitable for the adsorption of patulin in pear juice.

KEY WORDS: patulin; pear juice; adsorption; macroporous resin

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YED0400902)、国家自然科学基金项目(31560475)、甘肃农业大学学生科研训练计划项目

Fund: Supported by the Ministry of Science and Technology of China (2016YFD0400902), Natural Science Foundation of China (31560475), and Program of Scientific Research and Training for Students of Gansu Agricultural University

[#]王耀晖、马长治为共同第一作者。

[#]WANG Yao-Hui and MA Chang-Zhi are co-first authors.

***通讯作者:** 薛华丽, 博士, 教授, 主要研究方向为采后生物学与技术和食品质量与安全。E-mail: xuehuali77@sina.com

***Corresponding author:** XUE Hua-Li, Ph.D, Professor, College of Science, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China. E-mail: xuehuali77@sina.com

1 引言

梨是我国三大水果之一,品种资源丰富。其中,皇冠梨是一种果肉洁白,松脆多汁,风味酸甜,对身体健康的水果。梨汁性味甘寒,对热嗽、中风不语、伤寒发热、止心烦气喘热狂等均具有很好的疗效。然而,皇冠梨在近成熟期和贮藏期间,很容易受到病原菌的侵染。其中由扩展青霉引起的青霉病最为常见。青霉病是危害极强的一种病症,不仅造成巨大的经济损失,还会导致果实体内积累棒曲霉素^[1]。

首先,污染梨果的棒曲霉素产生菌不明确,同时缺乏实用的控制技术,研究毒素的主要产生菌及产毒规律可为提高梨加工品安全性提供基础理论和技术方法。而且棒曲霉素(patulin, PAT)具有更大的危害,是一种对动物具有致癌、致畸和致突变作用的真菌次生代谢产物,严重影响着梨产品的品质,威胁人类的健康,同时也影响着梨产品在国际市场上的竞争力^[2]。因此果汁中棒曲霉素的含量及控制技术和安全性应当引起人们的重视。

目前脱除果汁中棒曲霉素的方法有很多,常以物理法和化学法为主。物理法主要有:超声波法、辐照降解法、微波处理法,其目的主要是通过加热处理、物理吸附脱除、高温高压手段等进行脱除^[3]。化学法主要有:臭氧氧化法以及含巯基类物质的降解等^[4,5],臭氧氧化主要使用臭氧的氧化降解、食品添加剂及巯基类物质等对PAT进行脱除。物理方法操作简单且容易控制,最高脱除率可达90%以上;化学方法所用试剂多一些、且过程复杂,同时化学法处理后可能会对果汁品质造成一定的影响。所以目前物理脱除法是为广为采用的一种方法。

大孔吸附树脂是一类具有网状孔径结构的聚合物,选择性能良好,吸附容量大,吸附迅速,解析容易,操作简便的吸附剂,是利用其具有对不同成分的选择性吸附和筛选作用分离提纯物质的技术^[6,7]。有学者使用树脂对苹果汁中PAT进行脱除,发现通过对8种树脂进行筛选得到LSA-900B大孔树脂对PAT动态吸附率达到77.90%^[8-10]。然而有关大孔树脂吸附果汁中真菌毒素的热力学、动力学模型未见报道。

本研究选用XDA-600型大孔树脂对梨果汁中的棒曲霉素进行吸附,基于本实验室前期单因素实验的基础上,研究XDA-600型大孔树脂对梨果汁中棒曲霉素吸附等温线、热力学及动力学特性,为梨果实在实际生产加工中提供一定的理论依据。

2 材料与方法

2.1 材料与设备

2.1.1 原料

梨(品种:皇冠梨):2018年9月采摘于甘肃省景泰县

条山农场,挑选无病斑、无腐烂的优质皇冠梨,果径 $\Phi=(8\pm0.5)$ cm;大孔树脂:XDA-600型树脂,购于西安蓝晓科技有限公司特种树脂工厂,为棕褐色颗粒状。

2.1.2 仪器

MDF-86V340E型医用低温保存箱(安徽中科都菱商用电器股份有限公司);SPX-3008SH-II型生化培养箱(上海新苗医疗器械制造有限公司);SHB-III型循环水式多用真空泵(郑州长城科工贸有限公司);Agilent1260型高效液相色谱仪(配紫外检测器,浙江福立分析仪器有限公司)。

2.1.3 试剂

乙腈(色谱纯,科隆化学有限公司);棒曲霉素(青岛普瑞邦生物工程有限公司);乙酸盐缓冲液(pH=4,南京森贝伽生物科技有限公司);乙酸乙酯(99.5%,天津市富于精细化工有限公司);冰乙酸、无水乙醇(分析纯,国药集团化学试剂有限公司);氢氧化钠、盐酸(5%,分析纯,宁夏沃达化工有限公司)。

2.2 实验方法

2.2.1 梨果汁的制备

选取无明显病斑腐烂,品质良好的皇冠梨,蒸馏水清洗梨果,并去核,自然风干,后用75%的酒精进行果实表面消毒,再用酒精棉擦拭,加入榨汁机进行榨汁,然后向梨果汁中加入料液比为0.05%(m:V)的果胶酶,在50℃条件下水浴加热1 h,再冷却至室温,取上清液,将其保存备用^[11]。

2.2.2 棒曲霉素标准液的配制

将1.0 mg棒曲霉素标准品用色谱纯乙腈定容于10 mL的容量瓶,得浓度为100 $\mu\text{g/mL}$ 的棒曲霉素储备液。然后采用乙腈稀释至浓度为20 $\mu\text{g/mL}$,保存至-20℃冰箱待用。

2.2.3 高效液相色谱检测条件

测定方法根据GB 5009.185-2016《食品安全国家标准食品中展青霉素的测定》^[12]稍作修改。色谱柱: C₁₈反相柱(250 nm×4.6 nm, 5 μm);检测器:紫外检测器;波长:276 nm;流动相:乙腈:水(3:7, V:V);流速:1.0 mL/min;柱温:30℃;进样量10 μL 。

2.2.4 标准溶液的配制

将棒曲霉素的标准储备液用乙腈溶液稀释,分别得到浓度为1、5、10、15和20 $\mu\text{g/mL}$ 的标准工作液。将标准工作液按色谱条件进行测定,进样量为10 μL 。以峰面积为纵坐标,以棒曲霉素含量(单位为 $\mu\text{g/mL}$)为横坐标作图,用Origin9.0软件进行线性拟合,得到标准曲线方程:

$$Y=56.88803X+6.11729 \quad (r^2=0.9984)$$

其中:Y—峰面积;X—PAT浓度; r^2 —相关系数。

2.2.5 树脂预处理

将XDA-600型树脂先用蒸馏水冲洗至冲洗液澄清透明,用95%乙醇将树脂浸泡12 h,然后用蒸馏水冲洗至无乙醇味,接着依次用5%NaOH和5%HCl溶分别浸泡3 h,每次浸泡后均用蒸馏水冲洗树脂,直至中性(pH=7)。

2.2.6 棒曲霉素的提取

将经大孔树脂吸附后的样品进行过滤, 将滤液转移至分液漏斗中, 用乙酸乙酯等体积重复提取 3 次, 提取液移至圆底烧瓶中, 在 40 °C 条件下, 旋转蒸发浓缩溶液至近干, 用 2 mL 的 pH=4 的乙酸溶解复溶, 然后用 0.45 μm 微孔滤膜进行过滤, 将所制得的样品保存在 -20 °C 冰箱, 待高效液相色谱仪(high performance liquid chromatography, HPLC)测定。

2.2.7 棒曲霉素的检测

PAT 测定方法根据 GB 5009.185-2016《食品安全国家标准 食品中展青霉素的测定》中第二检测法高效液相色谱法稍作修改。色谱柱: C₁₈ 反相柱(250 nm×4.6 nm×5 μm); 检测器: 紫外检测器; 波长: 276 nm; 流动相: 乙腈:水(1:9, V/V); 流速: 1.0 mL/min; 柱温: 30 °C; 进样量 20 μL。

2.2.8 大孔树脂对梨果汁中棒曲霉素的吸附热力学及动力学实验

(1) 吸附热力学试验

用移液枪分别向 100 mL 的锥形瓶中加入浓度为 3、5、8、10、12、15 μg/mL 的棒曲霉素溶液 2 mL, 再加梨果汁至 20 mL, 按照 6.67 g/L 加入 XDA-600 型树脂, 分别在 20、25、30 °C 的温度^[13](根据前期实验结果, 综合考虑选取这 3 个温度)、转速为 120 r/min 条件下, 振荡吸附 18h, 过滤除去大孔树脂, 将滤液用乙酸乙酯提取 3 次, 然后在 40 °C 下进行旋转蒸发至近干, 接着用 pH=4 的乙酸复溶, 然后 0.45 μm 微孔滤膜进行过滤, 最后采用 HPLC 测定。

(2) 吸附等温线模型

采用 Langmuir 模型和 Freundlich 模型研究 XDA-600 型大孔树脂对梨果汁中棒曲霉素的吸附, 公式如下:

$$\text{Langmuir 模型公式: } \frac{C_e}{q_e} = \frac{C_e}{q_m} + \frac{1}{q_m K_f} \quad (1)$$

其中: C_e 为吸附后棒曲霉素的平衡质量浓度, μg/mL; q_e 为树脂对棒曲霉素的平衡吸附量, μg/g; q_m 为树脂对棒曲霉素的平衡最大吸附量, μg/g; K_f 为 Langmuir 模型的平衡常数;

$$\text{Freundlich 模型公式: } \ln q_e = \ln K_f + \frac{1}{n} \ln C_e \quad (2)$$

其中: K_f 为 Freundlich 模型的吸附常数; q_e 为树脂对棒曲霉素的平衡吸附量, C_e 为吸附后棒曲霉素的平衡质量浓度, μg/mL; n 为 Freundlich 模型的特征常数。

(3) 吸附热力学分析

通过分析焓变、熵变、吉布斯自由能的变化有助于了解 XDA-600 型大孔树脂吸附梨果汁前后内能的变化, 吸附热力学的分析有助于了解树脂吸附后其内在能量的变化以及吸附机制, 主要包括焓变(ΔH , kJ/mol), 自由能变化(ΔG , kJ/mol)和熵变 $[\Delta S$, kJ/(mol·K)]^[14]。其值的计算和相互间的计算方程如下

$$\ln C_e = \frac{\Delta H}{RT} + C$$

$$\Delta G = -nRT$$

$$\Delta S = \frac{\Delta H}{T} - \frac{\Delta G}{T}$$

式中 R 为理想气体常数, 值为 8.314 J/(mol·K); T 为华氏温度, K; C 为常数; n 为 Freundlich 模型中的吸附指数。

(4) 吸附动力学实验

准确配制棒曲霉素质量浓度 15.0 μg/mL 的梨果汁 20 mL 于 150 mL 锥形瓶中, 按照 6.67 g/L 加入经预处理的 XDA-600 型大孔树脂, 放入 25 °C 振荡培养箱中, 在 120 r/min 条件下振荡吸附 0、6、12、18、24、30 h, 过滤分离, 取滤液进行测定, 然后进行动力学方程拟合。

(5) 吸附速率方程

为了了解 XDA-600 型大孔树脂对梨果汁中棒曲霉素吸附的动力学模型, 采用准一级和准二级速率方程来进行研究分析, 具体方程如下:

$$\text{准一级速率公式: } \ln(q_1 - q_t) = \ln q_1 - k_1 t \quad (1)$$

相关参量: q_t 为 t 时刻的吸附量, μg/g; q_1 为准一级模型平衡吸附量; k_1 为准一级模型的平衡吸附速率常数, min⁻¹。

$$\text{准二级速率公式: } \frac{t}{q_t} = \frac{t}{q_2} + \frac{1}{q_2 k_2} \quad (2)$$

相关参量: q_2 为准二级模型的平衡吸附量, μg/g; k_2 为准二级模型的吸附平衡速率常数, g/(μg·min)。

2.2.9 数据处理

在实验数据处理中, 采用 Origin9.0 作图分析, SPSS17.0 软件进行 Duncan's 多重比较及差异显著分析, 并用 Microsoft Excel 2003 软件进行标准偏差计算。

3 结果与分析

3.1 大孔树脂对梨果汁中棒曲霉素的吸附

由图 1 可见, 棒曲霉素在 10.1 min 左右有一个强的吸收峰, 峰形尖锐, 且周围没有杂峰出现, 容易定量。重要的是凹凸棒土对棒曲霉素具有较好的吸附效果, 吸附前样品中具有较高的棒曲霉素浓度(3.86 μg/mL), 吸附后果汁中棒曲霉素浓度明显降低(0.15 μg/mL), 由此表明凹凸棒土较好地吸附了梨果汁中棒曲霉素。

3.2 吸附热力学模型分析

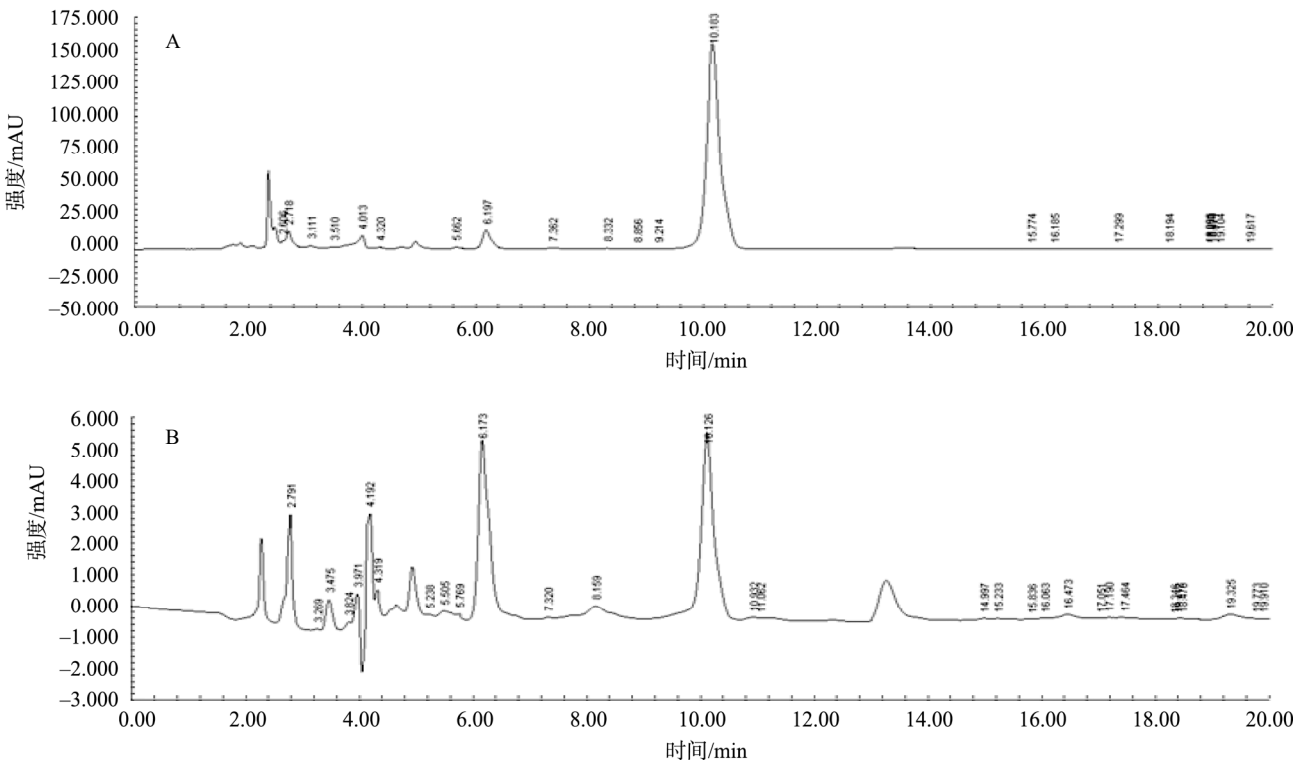
3.2.1 大孔树脂对梨果汁中棒曲霉素的吸附等温线模型拟合

由图 2 可见, 在不同温度下, XDA-600 型大孔树脂对加标梨果汁中棒曲霉素的吸附量不同。随着棒曲霉素浓度增加, XDA-600 型大孔树脂的平衡吸附量也随之增大, 20 和 30 °C 时 XDA-600 型大孔树脂对梨果汁中棒曲霉素的吸附没有显著的差异。而在 25 °C 下大孔树脂对梨果汁中棒曲霉素的吸附效果较 20 和 30 °C 时吸附效果好。从图中可以看出, 随着 PAT 浓度的增加, 大孔树脂的吸附量在逐步增加, 而 25 °C, 初始浓度 15 μg/mL 下吸附量为 2953.272 g/L, 并且 25 °C 吸

附量与 PAT 平衡浓度基本成线性关系, 在 PAT 浓度较小时却有较为显著的吸附效果, 所以在 25 °C 下大孔树脂对梨果汁中棒曲霉素的吸附效果较 20 °C 和 30 °C 时吸附效果好。

根据实验所得数据对其进行 2 种吸附等温线拟合, 得到如表 1 所示的回归方程和相关参数。根据表 1 中数据可知,

在温度为 20、25、30 °C 下, 用 2 种吸附等温线模型进行拟合后发现, Freundlich 等温吸附模型的 r^2 大于 Langmuir 等温吸附模型的相关系数, 并且在 25 °C 时, Freundlich 等温吸附模型的拟合度最高, 这与吸附等温线所得的结果一致^[14]。所以 XDA-600 型大孔树脂对梨果汁中棒曲霉素的等温吸附过程更符合 25 °C 下的 Freundlich 等温吸附模型。



注: A 为大孔树脂吸附前梨果汁中棒曲霉素的 HPLC 图; B 为大孔树脂吸附后梨果汁中棒曲霉素的 HPLC 图。

图 1 大孔树脂吸附前后青霉病梨果汁棒曲霉素的 HPLC 图

Fig.1 High performance liquid chromatogram of patulin in pear juice before and after adsorption by macroporous resin

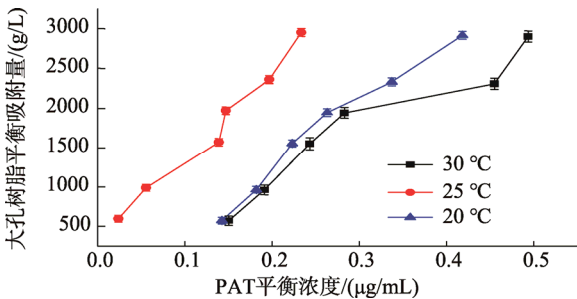


图 2 大孔树脂在不同温度下对加标梨果汁中棒曲霉素的吸附 (n=3)

Fig.2 Adsorption of patulin in standard pear juice by macroporous resin at different temperatures (n=3)

由表 2 可以看出, XDA-600 型大孔树脂吸附棒曲霉素的焓变值 ΔH 为正。所以 XDA-600 型大孔树脂对梨果汁中棒曲霉素的吸附过程是吸热过程, 温度越高, 吸附效果越好, 这和吸附等温线所得出的结果一致^[15-17]。3 种温

度所得到的 ΔG 都是负值, 说明该吸附过程是自发反应, 也说明 XDA-600 型大孔树脂对棒曲霉素有极强的亲和力。并且 $\Delta G < 20 \text{ kJ/mol}$, 也说明 XDA-600 型大孔树脂对棒曲霉素的吸附过程属于物理吸附。 $\Delta S > 0$, 混乱度增大, 平均自由度增加^[18,19], 从而说明棒曲霉素被 XDA-600 型大孔树脂吸附后, 水分子容易把棒曲霉素解析下来, 而且它在溶剂中的运动也不受到抑制。

3.3 XDA-600 型大孔树脂对梨果汁中棒曲霉素的吸附动力学研究

3.3.1 静态吸附曲线

从图 3 可以得知: XDA-600 型大孔树脂对梨果汁中棒曲霉素的吸附变化趋势是随着吸附时间的延长先增大, 当达到一定的峰值后, 后显现降低的趋势。峰值出现在 18 h。因此对于吸附并非是吸附时间越长, 吸附效果越好, 在实际应用中, 我们要采取最佳吸附时间进行对梨果汁中棒曲霉素进行有效的吸附。同时也说明当达到饱和和吸附量后可能发生了解吸现象。

表 1 2 种吸附等温线模型的线性回归方程及相关参数
Table 1 Linear regression equation and related parameters of 2 kinds of adsorption isotherm models

温度 /°C	Langmuir 模型				Freundlich 模型			
	回归方程	相关参数			回归方程	相关参数		
		q_m	K_L	r^2		n	K_f	r^2
20	$\frac{I}{q_e} = 3180.1 \frac{I}{q_e} + 1.4499$	2333.4	1.0	0.8995	$\ln q_e = 0.6732 C_e + 8.8544$	0.8193	7178.53	0.9056
25	$\frac{I}{q_e} = 28344 \frac{I}{C_e} - 7.8726$	3333.4	0.0003	0.9736	$\ln q_e = 1.2206 C_e + 8.87885$	1.4874	7005.14	0.9754
30	$\frac{I}{q_e} = 3080.1 \frac{I}{C_e} + 1.9359$	2000	1.67	0.9256	$\ln q_e = 1.4882 C_e + 9.407$	0.6720	12173.3	0.9461

表 2 XDA-600 型树脂吸附梨果汁中棒曲霉毒素的热力学参数
Table 2 Thermodynamic parameters of patulin adsorbed by XDA-600 resin in pear juice

棒曲霉毒素初始浓度 C_0 /(μg/mL)	焓变 ΔH /(kJ/mol)	自由能变化 ΔG /(kJ/mol)			熵变 ΔS /(J/(mol·K))		
		20 °C	25 °C	30 °C	20 °C	25 °C	30 °C
3	17.577				66.80	71.35	63.59
5	12.065				47.99	52.85	45.40
8	6.435				28.77	33.95	26.82
10	7.103	-1.995	-3.685	-1.7	31.05	36.20	29.02
12	12.194				48.43	53.29	45.82
15	9.357				38.74	43.77	36.46

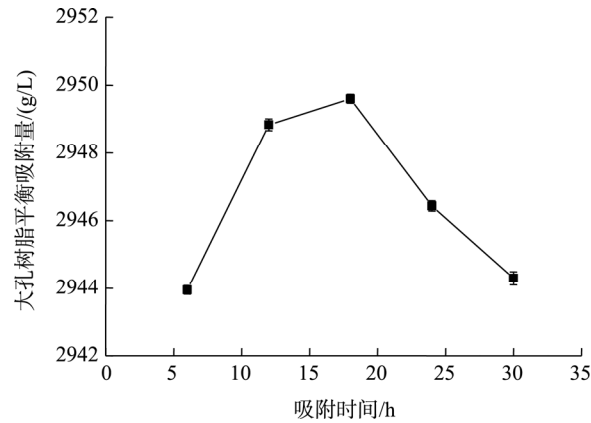


图 3 树脂对梨果汁中棒曲霉毒素的静态吸附曲线($n=3$)
Fig.3 Static adsorption curve of patulin in pear juice by resin ($n=3$)

根据实验所得数据对其进行 2 种速率方程的拟合,得到如表 3 所示的回归方程和相关参数。表中所示是拟合的准一级、准二级速率方程及相关参数,经过对比可得出,

准二级速率方程的 r^2 要大于准一级速率方程的 r^2 , 与实验结果比较接近。因此, XDA-600 型大孔树脂对梨果汁中棒曲霉毒素的吸附过程更加符合准二级速率方程模型。

4 结论与讨论

XDA-600 型大孔树脂对梨果汁中棒曲霉毒素具有良好的吸附效果。从 20、30、25 °C 的吸附效果来看, 25 °C 在初始浓度为 15 μg/mL PAT 浓度下, 大孔树脂吸附量为 2953.272 g/L, 同时在吸附时间为 18 h 时大孔树脂也具有较好的吸附效果。等温线模型拟合表明, Freundlich 吸附等温线模型更能描述 XDA-600 型大孔树脂对梨果汁中棒曲霉毒素的吸附过程($r^2>0.99$)。根据热力学分析结果表明, XDA-600 型大孔树脂对梨果汁中棒曲霉毒素的吸附为自发吸热的物理吸附过程, 而且棒曲霉毒素被吸附后不易被水分子解吸。动力学方程拟合表明, 准一级速率方程 $r^2=0.9491$, 准二级速率方程 r^2 接近于 1, 从而证明了大孔树脂吸附棒曲霉毒素符合准二级速率方程, 更能描述吸附过程, 并且表明此吸附过程主要为化学吸附。

表 3 动力学模型拟合方程及相关参数
Table 3 Fitting equation of dynamic model and related parameters

模型类型	拟合方程	模型参数	
准一级速率方程	$\ln(q_1-q_t)=0.5056-0.0167t$	$k_1/(h^{-1})$	0.0167
		$q_1/(\mu\text{g/g})$	165.79
		R^2	0.9491
		$K_2/(\mu\text{g/h})$	0.0047
准二级速率方程	$\frac{1}{q_t}=0.0003+2\text{E}-06t$	$q_2/(\mu\text{g/g})$	1043
		R^2	1

注: t 为吸附时间, h ; q_t 为 t 时刻的吸附量, ng/g ; k_1 为准一级模型的吸附平衡速率常数, h^{-1} ; q_1 为准一级模型的平衡吸附量, ng/g ; k_2 为准二级模型的吸附平衡速率常数, $\text{g}/(\text{ng}\cdot\text{h})$; q_2 为准二级模型的平衡吸附量, ng/g ; R_2 为决定系数。

参考文献

[1] 付杰, 李燕虎, 叶长荣, 等. DMF 在大孔吸附树脂上的吸附热力学及动力学研究[J]. 环境科学学报, 2012, 32(3): 639–644.

Fu J, Li YH, Ye CS, *et al.* Adsorption thermodynamics and kinetics of DMF on macroporous resin [J]. J Environ Sci, 2012, 32(3): 639–644.

[2] 刘华峰, 韩舜愈, 盛文军, 等. 不同树脂对苹果汁棒曲霉素的吸附[J]. 甘肃农业大学学报, 2010, 45(3): 126–130.

Liu HF, Han SY, Sheng WJ, *et al.* Adsorption of patulin in apple juice by different resins [J]. J Gansu Agric Univ, 2010, 45(3): 126–130.

[3] 朱振宝, 易建华, 寇晓康. 苹果汁中棒曲霉素的吸附动力学研究[J]. 食品科学, 2006, 27(6): 91–95.

Zhu ZB, Yi JH, Kou XK. Adsorption kinetics of patulin in apple juice [J]. Food Sci, 2006, 27(6): 91–95.

[4] 李鸿江, 温致平, 赵由才. 大孔吸附树脂处理工业废水研究进展[J]. 安全与环境工程, 2010, 17(3): 21–25.

Li HJ, Wen ZP, Zhao YC. Progress in the treatment of industrial wastewater by macroporous adsorbent resins [J]. Saf Environ Eng, 2010, 17(3): 21–24.

[5] 袁怀波, 赵国华, 李洪军, 等. 利用大孔吸附树脂纯化葛根异黄酮的研究[J]. 食品与发酵工业, 2003, 29(2): 62–65.

Yuan HB, Zhao GH, Li HJ, *et al.* Purification of pueraria isoflavones by macroporous resin [J]. Food Ferment Ind, 2003, 29(2): 62–65.

[6] 胡军, 周跃华. 大孔吸附树脂在中药成分精制纯化中的应用[J]. 中成药, 2002, 24(2): 127–130.

Hu J, Zhou YH. Application of macroporous adsorptive resin in refining and purifying [J]. Chin Tradit Patent Med, 2002, 24(2): 127–130.

[7] 李朝兴, 印寿根, 王克镭, 等. 大孔吸附树脂对绞股蓝皂甙的吸附研究[J]. 离子交换与吸附, 1994, 10(3): 203–207.

Li CX, Yin SG, Wang KL, *et al.* Adsorption of gynostemma pentaphyllum saponins by macroporous resin [J]. Ion Exchange Adsorption, 1994, 10(3): 203–207.

[8] 于鹤云, 刘汉清, 刘嘉. D-101 型大孔吸附树脂纯化黄蜀葵花总黄酮的工艺研究[J]. 中成药, 2014, 36(3): 520–525.

Yu HY, Liu HQ, Liu J. Purification of total flavonoids from *Astragalus membranaceus* L. by D-101 macroporous adsorption resin [J]. Chin Pat Med, 2014, 36(3): 520–525.

[9] 岳珍珍, 王静, 方利英. 大孔吸附树脂对刺梨果汁单宁脱除及其色泽的影响[J]. 食品科学, 2016, 37(17): 109–114.

Yue ZZ, Wang J, Fang LY. Effects of macroporous resin on tannin removal and color of rosa roxburghii juice [J]. Food Sci, 2016, 37(17): 109–114.

[10] 王洪言, 董文宾, 修秀红. 浓缩苹果汁中多酚的大孔吸附树脂吸附及其 HPLC 检测[J]. 食品工业, 2014, (6): 269–272.

Wang HY, Dong WB, Xiu XH. Macroporous resin adsorption of polyphenols in concentrated apple juice and its determination by HPLC [J]. Food Ind, 2014, (6): 269–272.

[11] Gong XM. Enzymatic characteristics of polyphenol oxidase in the pericarp of huangguan pear [J]. J Anhui Agric Sci, 2008, 36(31): 13541–13543.

[12] GB 5009.185-2016 食品安全国家标准 食品中展青霉素的定[S].

GB 5009.185-2016 National food safety standards-Determination of penicillin in food safety national standards [S].

[13] 王静, 雷宏杰, 岳珍珍, 等. 大孔树脂对红枣汁中棒曲霉素的吸附动力学[J]. 农业工程学报, 2015, 31(23): 285–291.

Wang J, Lei HJ, Yue ZZ, *et al.* Adsorption kinetics of patulin in jujube juice by macroporous resin [J]. J Agric Eng, 2015, 31(23): 285–291.

[14] 陆敏, 马海乐, 朱莉萍. D301-G 大孔树脂吸附菊芋多糖色素机理探究[J]. 食品工业科技, 2019, 40(16): 58–63, 70.

Lu M, Ma HL, Zhu LP. D301-G Macroporous resin adsorption mechanism of jerusalem artichoke polysaccharide pigment [J]. Food Ind Sci Technol, 2019, 40(16): 58–63, 70.

[15] 田家浩, 姜东琪, 李记明, 等. 离子交换树脂对冰葡萄汁总酸和总酚的静态吸附动力学研究[J]. 中国酿造, 2018, 37(6): 119–124.

Tian JH, Jiang DQ, Li JM, *et al.* Static adsorption kinetics of total acids and phenols in ice grape juice by ion exchange resin [J]. China Brew, 2018, 37(6): 119–124.

[16] 侯红瑞, 陈玲, 冯毅凡, 等. 大孔吸附树脂分离纯化高良姜黄酮类化合物的研究[J]. 食品科学, 2007, 28(10): 258–260.

Hou HR, Chen L, Feng YF, *et al.* Study on the separation and purification

of flavonoids from alpinia officinalis by macroporous adsorption resin [J].

Food Sci, 2007, 28(10): 258–260.

- [17] 季迎春, 吴菁岚, 周精卫. 香兰素在大孔吸附树脂上的吸附平衡、动力学及动态吸附过程[J]. 生物加工过程, 2018, 16(4): 16–22.

Ji YC, Wu JL, Zhou JW. Adsorption equilibrium, kinetics and dynamic adsorption process of vanillin on macroporous adsorption resin [J]. Bioprocess, 2018, 16(4): 16–22.

- [18] 张珊, 张蕊, 薛华丽. 凹凸棒土对梨果汁中棒曲霉素的吸附作用[J]. 食品科学, 2019, 40(15): 57–63.

Zhang S, Zhang R, Xue HH. Adsorption of patulin in pear juice by attapulgite [J]. Food Sci, 2019, 40(15): 57–63.

- [19] 李园园, 邹少华, 李洪娟, 等. 梨多酚在大孔树脂上的吸附性能研究[J]. 山东化工, 2018, 47(2): 30–32, 34.

Li YY, Zou SH, Li HJ. Adsorption properties of pear polyphenols on macroporous resins [J]. Shandong Chem Ind, 2018, 47(2): 30–32, 34.

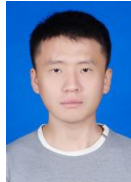
(责任编辑: 于梦娇)

作者简介



王耀晖, 主要研究方向为应用化学。

E-mail: 2412771898@qq.com



马长治, 主要研究方向为应用化学。

E-mail: 2963842682@qq.com



薛华丽, 博士, 教授, 主要研究方向为采后生物学与技术和食品质量与安全。

E-mail: xuehuali77@sina.com