

硅藻土吸附梨果汁中棒曲霉素的动力学模型研究

陆宗燕^{1#}, 魏万姣^{1#}, 魏天福², 薛华丽^{1*}

(1. 甘肃农业大学理学院, 兰州 730070; 2. 西北大学化学与材料科学学院, 西安 710127)

摘要: 目的 寻找一种有效去除梨果汁中棒曲霉素(patulin, PAT)的方法。**方法** 以硅藻土作为吸附剂对梨果汁中棒曲霉素进行吸附, 分析了吸附等温线, 吸附热力学和动力学特征。**结果** 在 35 °C下 AG-3000#型硅藻土对梨果汁中棒曲霉素具有较好的吸附作用, 最高吸附量为 1066.152 μg/g, 最大吸附率为 88.8%, 且吸附为自发吸热过程。吸附等温线结果显示, 棒曲霉素的吸附量随着棒曲霉素初始浓度的增大而增大; 吸附热力学特征符合 Langmiur 吸附等温线模型。吸附动力学结果显示, 硅藻土对梨果汁中棒曲霉素的吸附符合准二级速率方程模型。**结论** AG-3000#硅藻土适合梨果汁中棒曲霉素的吸附。

关键词: 棒曲霉素; 硅藻土; 吸附; 梨果汁

Study on kinetic model of adsorption of patulin from pear juice by diatomite

LU Zong-Yan^{1#}, WEI Wan-Jiao^{1#}, WEI Tian-Fu², XUE Hua-Li^{1*}

(1. College of Science, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China; 2. School of Chemistry and Materials Science, Northwestern University, Xi'an 710127, China)

ABSTRACT: Objective To find a method to effectively remove patulin from pear juice. **Methods** Diatomite was used as adsorbent to adsorb patulin from pear juice, and the adsorption isotherms, adsorption kinetics and adsorption thermodynamics for patulin by diatomite were analyzed in this study. **Results** AG-3000# diatomite had a good adsorption effect on patulin from pear juice at 35 °C, with a maximum adsorption capacity of 1066.152 μg/g and a maximum adsorption rate of 88.8%. And the reaction process is a spontaneous endothermic reaction. The adsorption isotherm results showed that the adsorption capacity increased with the increase of the original concentration of patulin, and the adsorption thermodynamic characteristics were fit with the langmiur adsorption isotherm model. The results of adsorption kinetics showed that the adsorption of patulin from pear juice by diatomite was in accordance with the quasi-second-order rate equation model. **Conclusion** AG-3000# diatomite is suitable for the adsorption of patulin from pear juice.

KEY WORDS: patulin; diatomite; adsorption; pear juice

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 (2016YED0400902), Natural Science Foundation of China (31560475), and The Program of Scientific Research and Training for Students of Gansu Agricultural University

[#]陆宗燕、魏万姣为共同第一作者。

[#]LU Zong-Yan and WEI Wan-Jiao 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

“皇冠梨”是梨果实的一个品种,具有开胃、美容、养颜、滋阴、润肺,有助于消化吸收等功效,因而越来越受到人们的追捧^[1]。然而,梨果实采后储藏期间容易受到病原真菌等的侵染而发生腐烂^[2]。其中,由青霉素和曲霉属的病原真菌引起的果实腐烂最为严重。腐烂的果实不仅造成巨大的经济损失,还会在果实体内积累棒曲霉素^[3]。

棒曲霉素(patulin, PAT)又称展青霉素,是由青霉菌(*Penicillium* spp.)和曲霉菌(*Aspergillus* spp.)真菌在一定条件下代谢产生的,是一种白色菱形结晶,易溶于水、乙醚、甲醇、乙醇等,具有致癌、致畸、致突变等高毒性作用^[4]。棒曲霉素在酸性介质中具有稳定的化学结构^[5]。而果汁中含有一些酸类物质,所以果汁一旦被棒曲霉素污染,就很难脱除降解。

目前,去除或降解果汁中棒曲霉素的方法主要包括:物理、化学、生物等法。其中物理法包括吸附处理、微波处理、 γ -射线辐照和超声波降解等^[6]。化学法主要是通过发生化学反应,将棒曲霉素结构氧化破坏,但降解后的物质对环境造成了潜在的污染,与此同时,降解后果汁的品质也受到了极大的影响^[7]。生物法包括还原型谷胱甘肽(GSH)和 β -乳球蛋白(β -Lg)法降解等^[8]。因此寻求一种既能高效降解棒曲霉素,又不会影响果汁品质的方法势在必行。

硅藻土的化学成分主要是 SiO_2 ,是一种硅质岩石,具有细腻、松散、质轻、吸附性强等物理特性^[9]。近年来,随着国家对环保重视程度的不断提高,吸附剂行业快速发展,其中硅藻土就是使用较广的一种吸附剂^[10]。目前,硅藻土的提纯方法主要有擦洗法和酸浸法,本研究主要用酸浸法,酸浸后的硅藻土,除去了大量的 Al_2O_3 杂质,提升了比表面积,具有更好的吸附作用^[11]。目前,有关硅藻土吸附梨果汁中棒曲霉素的研究已有报道^[12],然而未对吸附过程的热力学和动力学行为进行深入而系统的研究。

通过研究硅藻土吸附梨果汁中的棒曲霉素,本研究建立了吸附热力学、动力学模型,可为果汁生产企业有关硅藻土对棒曲霉素的吸附提供一定的理论依据。

2 材料与方法

2.1 材料、试剂与仪器

2.1.1 材料

梨(品种:皇冠梨):无病斑症状的皇冠梨;棒曲霉素(patulin):购于青岛普瑞邦生物工程有限公司;硅藻土(AG-3000#,目数为3000,吉林省临江市大华硅藻土产品有限公司)。

2.1.2 试剂

乙酸乙酯(分析纯,天津市富宇精细化工有限公司);棒曲霉素标品(优级纯,青岛普瑞邦生物工程有限公司);

乙腈(优级纯,成都市科隆化学品有限公司);乙酸(分析纯,成都市科龙化工试剂厂)。

2.1.3 仪器

Sigma-3K15 高速冷冻离心机(北京五洲东方科技发展有限公司);SPX-250-Z-S型振荡 PEIYA 培养箱(上海跃进医疗器械有限公司);RE-2000B 旋转蒸发器(上海亚荣生化仪器厂);Agilent1260 型高效液相色谱仪(浙江福立分析仪器股份有限公司)。

2.2 实验方法

2.2.1 梨汁的制备

挑选无明显病害症状的皇冠梨,用75%乙醇擦拭果实表面,按照质量比1:10(m:m)的比例加入去离子水进行榨汁,加入料液比为0.05%的果胶酶,在50℃水浴条件下进行1h酶解、冷却,5000 r/min离心5 min,取上清液,保存在冰箱中备用。

2.2.2 硅藻土的前处理

硅藻土先用蒸馏水清洗2~3次,然后浸泡24 h,每隔6 h搅拌1次,最后用蒸馏水多次清洗至接近中性,然后在60℃烘箱中烘干,研磨碎后保存待用^[13]。

2.2.3 棒曲霉素标准液的配制

将1.0 mg棒曲霉素标准品用2 mL乙腈溶解于小烧杯中,然后转移到10 mL的容量瓶中,用乙腈定容至刻度线,得到质量浓度为100 $\mu\text{g}/\text{mL}$ 的棒曲霉素标准储备液^[14]。

2.2.4 高效液相色谱检测条件

色谱柱: C_{18} 反相柱(250 nm \times 4.6 nm, 5 μm); 检测器: 紫外检测器(ultraviolet detector, UV); 进样量: 20 μL ; 柱温: 30℃; 检测波长: 276 nm; 流动相: 乙腈-水(1:9, V:V); 流速: 1.0 mL/min^[15]。

2.2.5 棒曲霉素的定量

以浓度为横坐标,峰面积为纵坐标作标准曲线,得到峰面积与浓度的线性方程为 $Y=56.88803X+6.11729(r^2=0.999842)$ 。

2.3 吸附热力学研究

2.3.1 吸附热力学实验

先准确配制质量浓度为20 $\mu\text{g}/\text{mL}$ 的棒曲霉素标准工作液,然后稀释成20 mL浓度为3、5、10、12、15 $\mu\text{g}/\text{mL}$ 的加标系列梨果汁溶液,再转移至150 mL的干燥锥形瓶中,各加入0.1 g的硅藻土,在25、35、45℃(120 r/min)条件下振荡吸附24 h后,过滤,除去硅藻土,用乙酸乙酯进行萃取,萃取液转移至50 mL圆底烧瓶中,在40℃下旋转蒸发浓缩至近干,然后再加2 mL pH=4的乙酸,用高效液相色谱测定棒曲霉素的含量^[16]。

2.3.2 吸附等温线模型

吸附热力学过程通常是由Langmuir和Freundlich吸附等温线方程来对其吸附过程进行描述的,2种模型的公式^[15]如下:

Langmuir 吸附等温方程式:

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{q_m k_L} + \frac{C_e}{q_m}$$

Freundlich 吸附等温方程式:

$$\ln q_e = \ln K_f + \frac{1}{n} \ln C_e$$

公式中 C_e 为硅藻土吸附后棒曲霉素的平衡浓度, $\mu\text{g/mL}$;

q_e 为棒曲霉素的平衡吸附量, $\mu\text{g/g}$;

q_m 为棒曲霉素的平衡最大吸附量, $\mu\text{g/g}$;

K_L 为 Langmuir 2 种吸附平衡常数;

K_f 为 Freundlich 模型中与吸附量有关的常数;

n 为 Freundlich 模型中的吸附指数。

2.4 吸附动力学研究

准确配制棒曲霉素质量浓度为 $12.0 \mu\text{g/mL}$ 的梨果汁 20 mL 于 100 mL 的锥形瓶中, 加 0.1 g 处理好的硅藻土, 放入 $35 \text{ }^\circ\text{C}$ 振荡培养箱中, 在 120 r/min 的条件下振荡吸附 $0、6、12、18、24、30 \text{ h}$, 离心分离, 取上清液进行测定, 随后进行动力学方程拟合。

为准确了解硅藻土在梨果汁中的吸附动力学, 本研究采用准一级和准二级速率方程来描述和说明, 具体方程如下^[17]:

准一级速率方程:

$$\ln(q_1 - q_t) = \ln q_1 - k_1 t$$

准二级速率方程:

$$\frac{t}{q_t} = \frac{t}{q_2} + \frac{1}{k_2 q_2^2}$$

公式中 q_t 为 t 时刻的吸附量, 单位为 $\mu\text{g/g}$; q_1 为准一级模型的平衡吸附量, $\mu\text{g/g}$; k_1 为准一级模型的平衡吸附速率常数, $1/\text{min}$; q_2 为准二级模型的平衡吸附量, $\mu\text{g/g}$; k_2 为准二级模型的吸附平衡速率常数, $\text{g}/(\mu\text{g}\cdot\text{min})$ 。

3 结果与分析

3.1 硅藻土对梨果汁中棒曲霉素的吸附

图 1 A 为 AG-3000#型硅藻土吸附前青霉病梨果汁中棒曲霉素的 HPLC 图, 图 1 B 为 AG-3000#型硅藻土吸附后梨果汁中棒曲霉素的 HPLC 图。由图 1 可见, 棒曲霉毒素在 10.18 min 左右有一个很强的吸收峰, 峰形尖锐, 且周围没有杂峰出现, 容易定量; 重要的是, AG-3000#型硅藻土对棒曲霉毒素具有较好的吸附效果, 吸附前样品中具有较高的棒曲霉毒素浓度 ($3.86 \mu\text{g/mL}$), 吸附后果汁中棒曲霉毒素明显降低 ($0.15 \mu\text{g/mL}$)。由此表明, AG-3000#型硅藻土较好地吸附了梨果汁中棒曲霉毒素。

3.2 吸附热力学研究分析

从图 2 的吸附等温线可以看出, AG-3000#型硅藻土对

棒曲霉素的平衡吸附量随着棒曲霉素浓度的增加在逐渐增加, 这可能是由于 AG-3000#型硅藻土的孔径发生了变化而引起的。在 $25 \text{ }^\circ\text{C}$ 时其吸附量最少, 表明低温条件下不利于 AG-3000#型硅藻土对棒曲霉素的吸附。而在 35 和 $45 \text{ }^\circ\text{C}$ 其吸附量差别不是很大, 表明高温有利于 AG-3000#型硅藻土对棒曲霉素的吸附^[17]。

根据实验数据拟合 2 种吸附等温线模型, 可以得出如表 1 所示的回归方程。

从表 1 可得, 2 种模型的拟合效果都较好, Langmuir 模型吸附是单分子层物理吸附, 而 Freundlich 模型吸附是一个多分子层的物理吸附。通过对比 2 种模型的相关系数发现, Langmuir 模型能更好的体现出 AG-3000#型硅藻土对梨果汁中棒曲霉素的吸附作用, 这就说明 AG-3000#型硅藻土对梨果汁中棒曲霉素的吸附作用为单分子层的物理吸附。

吸附热力学分析有利于我们掌握硅藻土吸附果汁后内能的变化以及其吸附机制, 其中包括焓变, 熵变, 吉布斯自由能的变化。可利用如下公式计算^[17]:

$$\begin{aligned} \ln C_e &= \Delta H/RT + C \\ \Delta G &= -nRT \\ \Delta S &= (\Delta H - \Delta G)/T \end{aligned}$$

利用上述公式可得到焓变值 (ΔH) 熵变值 (ΔS) 吉布斯自由能变化值 (ΔG)。根据表 2 结果显示, 硅藻土的吸附焓变 ΔH 为正值, 说明 AG-3000#硅藻土对梨果汁中棒曲霉素的吸附过程为吸热过程。3 种温度下的 ΔG 均为负值, 说明吸附过程为自发过程, 并且自由能越小, 吸附过程的自发程度越大, 表明在 $35 \text{ }^\circ\text{C}$ 下吸附效果最佳。

3.3 吸附动力学研究分析

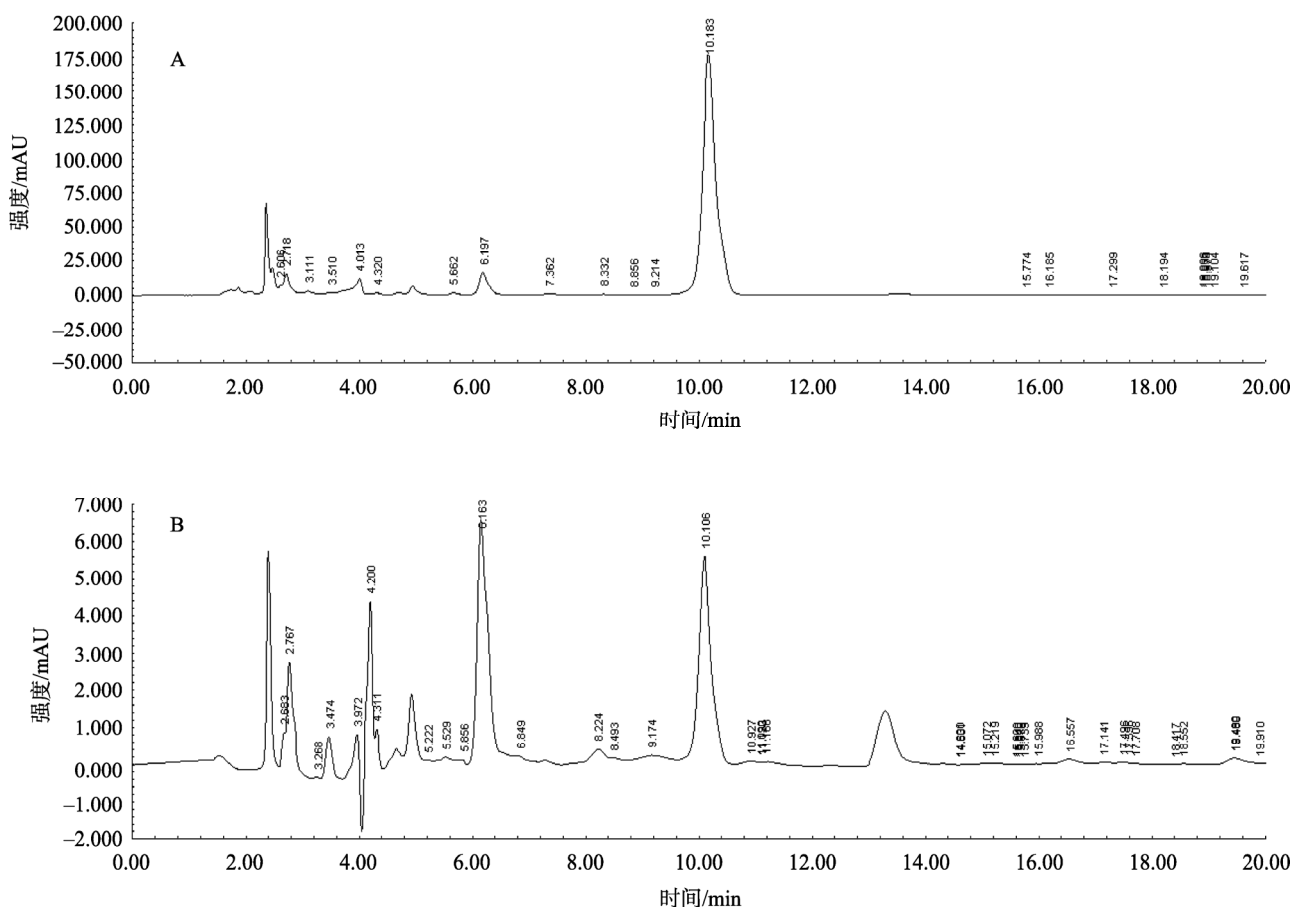
硅藻土对梨果汁中棒曲霉素的静态吸附如图 3 所示, 基于前期实验结果, 在吸附剂用量为 5.0 g/L 、温度 $35 \text{ }^\circ\text{C}$ 、吸附时间 24 h 时对初始浓度一定的样品进行吸附, 随着吸附时间的延长, AG-3000#型硅藻土对棒曲霉毒素吸附量逐渐增加。最大吸附量 $1066.152 \mu\text{g/g}$ 和最大吸附率为 88.8% 。

表 3 显示的是 2 种动力学模型拟合方程以及相关模型的相关参数, 不同吸附时间内硅藻土对梨果汁中棒曲霉素的吸附量变化。结果显示, 吸附量随着吸附时间的延长随之增大, 准二级模型预测的吸附量 q 值为 1111.11 与实验结果相近, 即准二级速率方程能更好的描述 AG-3000#硅藻土对梨果汁中棒曲霉素的吸附过程。

4 结论与讨论

AG-3000#硅藻土对梨果汁中棒曲霉毒素有很好的吸附效果, 当棒曲霉毒素初始浓度为 $12 \mu\text{g/mL}$ 时, 它的最高吸附量为 $1066.152 \mu\text{g/g}$, 最大吸附率为 88.8% 。本研究采用不同的吸附等温线进行线性回归方程分析发现: Langmuir 吸

附等温线能更好的描述棒曲霉素的吸附。



注: A 为 AG-3000#型硅藻土吸附前青霉病梨果汁中棒曲霉毒素的 HPLC 图; B 为 AG-3000#型硅藻土吸附后梨果汁中棒曲霉毒素的 HPLC 图。

图 1 AG-3000#型硅藻土吸附前后青霉病梨果汁棒曲霉毒素的 HPLC 图
Fig.1 HPLC analysis of aspergillus toxin in pear juice bar before and after adsorption of ag-3000 # diatomite

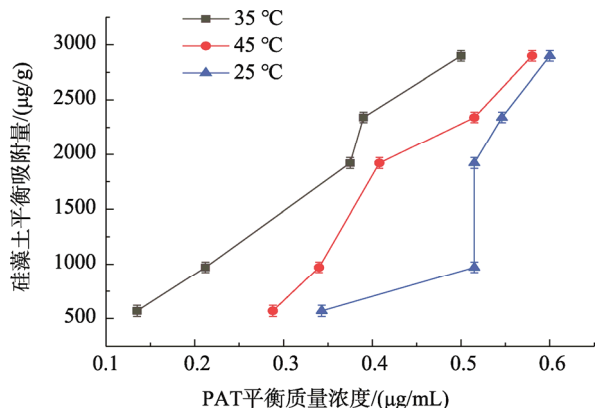


图 2 AG-3000#型硅藻土对梨果汁中棒曲霉素的吸附等温线
Fig.2 Adsorption isotherm of AG-3000 # diatomite on patulin in pear juice

在热力学模型中, ΔG 均为负值, ΔS 为正值, 而 ΔH 为正值, 说明了硅藻土对梨果汁中棒曲霉素的吸附是自发的吸热过程。动力学研究结果显示, 准二级速率方程能更好的符合此实验结果。

从吸附等温线可以看出, 硅藻土对棒曲霉素的平衡吸附量随着棒曲霉素浓度的增加在逐渐增加, 这可能是由于硅藻土的孔径发生了变化。在 25 °C 时其吸附量最少, 表明低温下硅藻土不利于吸附棒曲霉素。相反在 35 和 45 °C 其吸附量差别不是很大, 这就表明高温有利于对棒曲霉素的吸附。Langmuir 模型能更好的体现出硅藻土对梨果汁中棒曲霉素的吸附作用, 这就说明硅藻土对梨果汁中棒曲霉素的吸附作用为单分子层的物理吸附。总之通过本研究以期为果汁生产工艺的开发提供科学参考。

表 1 2 种吸附等温线模型的回归方程及其相关参数
Table 1 Regression equations and related parameters of the two 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
25	$\frac{1}{q_z} = 0.0012 \frac{1}{C_z} - 0.0016$	625	1.33	0.8805	$\ln q_z = 2.847 \ln C_z + 9.2772$	0.351	10170.03	0.8023
35	$\frac{1}{q_z} = 0.0003 \frac{1}{C_z} - 0.0002$	5000	0.667	0.9973	$\ln q_z = 1.249 \ln C_z + 8.828$	0.801	6822.63	0.9927
45	$\frac{1}{q_z} = 0.0008 \frac{1}{C_z} - 0.0012$	833.33	1.50	0.9047	$\ln q_z = 2.246 \ln C_z + 9.2312$	0.445	10210.79	0.9387

表 2 AG-3000#硅藻土吸附梨果汁中棒曲霉素的热力学参数
Table 2 Thermodynamic parameters of AG-3000 # diatomite adsorption for patulin in pear juice

棒曲霉素初始浓度 C_0 /($\mu\text{g/mL}$)	焓变 ΔH /(kJ/mol)	自由能变化 ΔG /(kJ/mol)			熵变 ΔS /(J/(mol·k))		
		25 °C	35 °C	45 °C	25 °C	35 °C	45 °C
3	13.74				49.00	51.24	46.89
5	21.71				75.73	77.10	71.94
10	10.50	-0.87	-2.05	-1.18	38.14	40.72	36.71
12	4.84				19.15	22.36	18.92
15	2.35				10.80	14.28	11.10

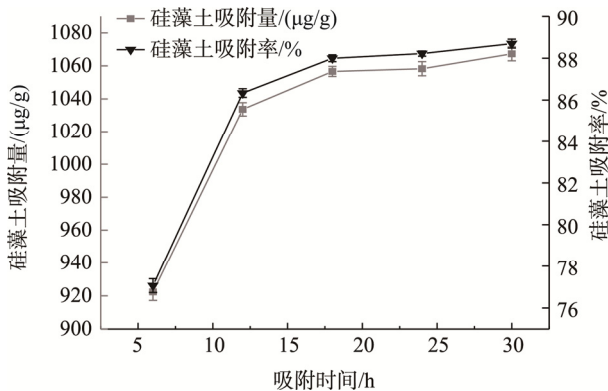


图 3 硅藻土对梨果汁中棒曲霉素的静态吸附曲线

Fig.3 Static adsorption curve of diatomite to patulin in pear juice

表 3 动力学模型拟合方程及模型参数

Table 3 Kinetic model fitting equation and model parameters

模型类型	拟合方程	模型参数
准一级 速率方程	$\ln(q_z - q_1) = -0.0628t + 5.2077$	K_1/min^{-1} 0.0628
		$q_1/(\mu\text{g/g})$ 182.67
		r^2 0.809
准二级 速率方程	$\frac{t}{q_t} = 0.0009t + 0.0009$	$K_2/[\text{g}/(\mu\text{g}\cdot\text{min})]$ 0.0009
		$Q_2/(\mu\text{g/g})$ 1111.11
		r^2 0.9997

注: t 为吸附时间, min; q_t 为 t 时刻的吸附量, $\mu\text{g/g}$; k_1 为准一级模型的吸附平衡速率常数, min^{-1} ; q_1 为准一级模型的平衡吸附量, $\mu\text{g/g}$; K_2 为准二级模型的吸附平衡速率常数, $\text{g}/(\mu\text{g}\cdot\text{min})$; q_2 为准二级模型的平衡吸附量, $\mu\text{g/g}$; r^2 为决定系数。

参考文献

- 郝贵增, 褚贝贝, 陈星光. 皇冠梨饮料的研制[J]. 饮料工业生产工艺, 2015, 5(20): 13-16.
Hao GZ, Chu BB, Chen XG. Development of crown pear beverage [J]. Bever Ind Prod Technol, 2015, 5(20): 13-16.
- 谢芳超. 梨果棒曲霉毒素产生菌的分离鉴定及其生长规律的研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2012.
Xie FC. Isolation and identification of patulin toxin producing bacteria from pear fruit sticks and study on its growth rules [D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2012.
- Sun C, Fu D, Lu H, et al. Autoclaved yeast enhances the resistance against *Penicillium expansum* in postharvest pear fruit and its possible mechanisms of action [J]. Biol Control, 2018, 119(8): 51-58.
- 孙艳, 蒲陆梅, 龙海涛, 等. 辉光放电等离子体对水溶液中棒曲霉素的降解作用[J]. 食品科学, 2015, 36(19): 29-33.
Sun Y, Pu LM, Long HT, et al. Degradation of patulin in aqueous solution by glow discharge plasma [J]. Food Sci, 2015, 36(19): 29-33.
- 蒋雄图, 虞左向. 《棒曲霉毒素测定方法的研究》取得成果[J]. 无锡轻工业学院学报, 1989, (1): 90.
Jiang XT, Yu ZX. The research on the determination method of patulin has obtained the results [J]. J Wuxi Institute Light Ind, 1989, (1): 90.
- 孙艳, 蒲陆梅, 龙海涛, 等. 辉光放电等离子体对苹果汁中棒曲霉素的降解作用及对苹果汁品质的影响[J]. 食品工业科技, 2015, 36(24): 29-33.
Sun Y, Pu LM, Long HT, et al. Effects of glow discharge plasma on degradation and quality of patulin in apple juice [J]. Sci Technol Food Ind, 2015, 36(24): 29-33.
- 王丽. 棒曲霉毒素降解技术方法研究[D]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2012.

- Wang L. Study on degradation technology of patulin [D]. Xianyang: Northwest A&F University, 2012.
- [8] 张晓瑞, 郭玉蓉, 孟永宏. 苹果制品中棒曲霉素脱除技术的研究进展[J]. 食品工业科技, 2014, 35(14): 363–369.
- Zhang XR, Guo YR, Meng YH. Research progress on the removal of patulin from apple products [J]. Food Ind Sci Technol, 2014, 35(14): 363–369.
- [9] 朱健, 王平, 雷明婧, 等. 硅藻土理化特性及改性研究进展[J]. 中南林业科技大学学报, 2012, (12): 61–66.
- Zhu J, Wang P, Lei MJ, *et al.* Research progress on physical and chemical properties and modification of diatomite [J]. J Central South Univ Forest Technol, 2012, (12): 61–66.
- [10] 刘洁, 赵东风. 硅藻土的研究现状及进展[J]. 环境科学与管理, 2009, 34(5): 104–106.
- Liu J, Zhao DF. Research status and progress of diatomite [J]. Environ Sci Manage, 2009, 34(5): 104–106.
- [11] 姜玉芝, 贾嵩阳. 硅藻土的国内外开发应用现状及进展[J]. 有色矿冶, 2011, 27(5): 31–37.
- Jiang YZ, Jia SY. Development and application status and progress of diatomite at home and abroad [J]. Nonferrous Ore Metall, 2011, 27(5): 31–37.
- [12] 罗威, 罗立新. 果胶酶和硅藻土联合澄清荔枝果汁的研究[J]. 饮料工业, 2010, 13(10): 10–13.
- Luo W, Luo LX. Study on clarification of litchi juice by pectinase and diatomite [J]. Bever Ind, 2010, 13(10): 10–13.
- [13] 金洋, 王春贺, 黄帮蕊, 等. 硅藻土的特点及其应用进展[J]. 硅酸盐通报, 2016, 35(3): 810–814.
- Jin Y, Wang CH, Huang BR, *et al.* Characteristics and application progress of diatomite [J]. Silicate Bull, 2016, 35(3): 810–814.
- [14] 张丙云, 李志忠. 凹凸棒土对啤酒稳定性的影响研究[J]. 酿酒科技, 2007, 7: 40–41.
- Zhang BY, Li ZZ. Effects of attapulgiteclay on beer stability [J]. Liquor Mak Sci Technol, 2007, 7: 40–41.
- [15] 张珊, 张蕊, 薛华丽, 等. 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 HL, *et al.* Adsorption effect of attapulgite on patulin in pear juice [J]. Food Sci, 2019, 40(15): 57–63.
- [16] Fernandes AN, Almeida CAP, Debacher NA, *et al.* Isotherm and thermodynamic data of adsorption of methylene blue from aqueous solution onto peat [J]. J Mol Struct, 2010, 982(1): 62–65.
- [17] 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 macroporous resin on patulin in jujube juice [J]. Trans Chin Soc Agric Eng, 2015, 31(23): 285–291.

(责任编辑: 于梦娇)

作者简介



陆宗燕, 主要研究方向为应用化学。
E-mail: 31597984@qq.com



魏万娟, 主要研究方向为应用化学。
E-mail: 2694017096@qq.com



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