

# 蔗糖溶液中新生磷酸钙对单宁酸的吸附性能研究

田玉红, 杜丹丹, 唐婷范, 伍善广

(广西科技大学生物与化学工程学院, 广西柳州 545006)

**摘要:** 研究了蔗糖溶液中新生磷酸钙对单宁酸的吸附特性。根据吸附动力学数据进行了粒内扩散模型、准一级动力学模型和准二级动力学模型的拟合, 在蔗糖溶液中新生磷酸钙对单宁酸的吸附过程符合准二级动力学方程 ( $R^2=0.9994\sim 0.9998$ ), 蔗糖分子的存在并不影响新生磷酸钙对单宁酸的吸附动力学行为, 在不含蔗糖溶液中新生磷酸钙对单宁酸的吸附也符合准二级动力学方程 ( $R^2=0.9997\sim 1.000$ )。新生磷酸钙对单宁酸的吸附呈单分子层吸附, 符合 Langmuir 等温吸附模型 ( $R^2=0.9934\sim 0.9963$ ), 蔗糖的浓度对吸附量有一定影响, 在不含蔗糖体系中新生磷酸钙对单宁酸的吸附量最大, 随着溶液中蔗糖浓度的升高, 吸附量逐渐减小。当蔗糖溶液的浓度为分别为 0.0%、5.0%、10.0% 时, 新生磷酸钙对单宁酸的饱和和吸附量依次降低分别为 125.00、91.74、86.96 mg/g。

**关键词:** 新生磷酸钙; 单宁酸; 吸附动力学; 吸附等温线

文章编号: 1673-9078(2018)07-143-148

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2018.7.021

## Adsorption Characteristics of Tannic Acid on Fresh Calcium Phosphate in Sucrose Solution

TIAN Yu-hong, DU Dan-dan, TANG Ting-fan, WU Shan-guang

(College of Biological and Chemical Engineering, Guangxi University of Science and Technology, Liuzhou 545006, China)

**Abstract:** The adsorption characteristics of tannic acid on fresh calcium phosphate in sucrose solution were discussed. Three kinetic models, including pseudo-first-order model, pseudo-second-order model and intraparticle diffusion model, were selected to model the adsorption processes. The adsorption of fresh calcium phosphate for tannic acid conformed to the pseudo-second order kinetic equation both in 10% sucrose solution and in the solution without sucrose, which showed that the existence of sugar molecules did not influence the adsorption dynamics model of fresh calcium phosphate. Adsorption isotherm curves of tannic acid from different concentrations of sucrose solution on fresh calcium phosphate all conformed to the Langmuir model. Sucrose concentration had certain influence on the adsorption quantity of fresh calcium phosphate for tannic acid, besides, the adsorption quantity of that in the system containing no sugar was the largest. With the increase of sucrose solution concentration, the adsorption quantity of fresh calcium phosphate to tannic acid gradually reduced.

**Key words:** fresh calcium phosphate; tannic acid; adsorption kinetics; adsorption isotherm

在甘蔗制糖生产过程中, 如何除去制品中的有色物质以及抑制新的有色物质的生成是保证成品糖品质的关键因素之一。亚硫酸法澄清技术由于具有设备较少、工艺流程比较简单、管理方便等特点, 在我国制糖工业中得到比较广泛的应用。在亚硫酸法澄清工艺中, 磷酸钙和亚硫酸钙的吸附絮凝作用对蔗汁的脱色起着重要作用。磷酸钙是工业中最常用的固体清净剂之一, 由于磷酸钙的沉淀是无定形的, 通常形成蓬松的絮状物, 在一定的条件下能够形成一定尺寸的软胶状的团块, 是一种有许许多多空腔的网状物, 在一定

收稿日期: 2018-01-26

基金项目: 广西高校科学技术研究项目 (ZD2014077); 广西自然科学基金项目 (2016GXNSFBA380073)

作者简介: 田玉红 (1969-), 女, 博士, 教授, 研究方向: 天然产物化学

条件下可以连接形成一层有厚度的完整的膜状物, 且磷酸钙具有如无毒、较高的化学和热稳定性以及较高的生物相容性等优良特性, 已成为研究热点<sup>[1]</sup>。甘蔗汁原有的颜色并不深, 而提汁后所得混合汁的色值却很高, 主要是生产过程产生了下列增色反应: 酚酶将酚类物质催化氧化成深色物质; 设备中的铁在有氧及酸性条件下溶解到蔗汁中, 与酚类物质生成深色的铁络合物; 蔗汁中的还原糖与氨基酸反应产生的美拉德反应物<sup>[2]</sup>。澄清时除去酚类物质的效果是决定蔗糖晶体色泽的重要因素。单宁酸又名鞣质, 是一种结构非常复杂的大分子多元酚类化合物, 广泛存在于植物中的水溶性多酚类化合物, 是甘蔗汁中的主要酚类物质, 甘蔗压榨汁呈暗绿色的主要原因就是因为鞣质受氧化酶作用并与铁反应<sup>[1]</sup>。目前对于磷酸钙对单宁酸的吸

附研究还未见研究报道, 本文对新生磷酸钙对单宁酸的吸附性能进行了实验研究, 从而加强对蔗汁和糖浆脱色的基础研究。

## 1 材料与amp;方法

### 1.1 材料与amp;仪器

单宁酸: 分析纯, 天津市鼎盛鑫化工有限公司; 氢氧化钙、磷酸: 分析纯, 西陇科学股份有限公司; 氢氧化钠、盐酸: 分析纯, 广东光华化学厂有限公司; 福林酚试剂: 上海尤瓦仪器仪表有限公司; 无水碳酸钠: 分析纯, 广东光华化学厂有限公司。

722 型可见分光光度计, 上海精密科学仪器有限公司; pH S-25CW 型 pH 计, 上海理达仪器厂; DF-101S 集热式恒温加热磁力搅拌器、SHZ-D (III) 循环水式真空泵, 巩义市予华仪器有限责任公司; FA2004N 电子天平, 上海菁海仪器有限公司; SHZ-82A 恒温振荡器, 国华电器有限公司; TDL-80-2B 低速台式离心机, 上海安亭科学仪器厂。

### 1.2 实验方法

#### 1.2.1 单宁酸的分析检测方法

准确配制 0.100 g/L 单宁酸标准溶液, 分别吸取 0、1、2、3、4、5 mL 0.100 g/L 的单宁酸溶液于 50 mL 容量瓶中, 分别加入 1.5 mL 福林酚试剂, 摇匀, 静置 3~8 min 后加入 5 mL 7.5% 碳酸钠溶液, 用 10% 蔗糖溶液稀释至刻度, 摇匀, 显色 1 h。用可见分光光度计测定 765 nm 波长处的吸光度, 以吸光度 (Y) 为纵坐标, 单宁酸的质量浓度 (X, mg/L) 为横坐标绘制标准曲线。实验数据经线性回归方程得:  $Y=0.09407X+0.02781$  ( $R^2=0.9989$ )<sup>[3]</sup>。

#### 1.2.2 新生磷酸钙的制备

准确称取 10.00 g  $Ca(OH)_2$  于 500 mL 烧杯中, 加入 200 mL 水制成石灰乳, 边搅拌边用 10%  $H_3PO_4$  滴加至 pH=7.00±0.01。继续搅拌 30 min, 进行抽滤。

#### 1.2.3 新生磷酸钙对单宁酸的吸附动力学研究

准确称取 1.50 g 新生磷酸钙样品置于一系列的 250 mL 具塞锥形瓶中, 加入 100 mL 配制好的一定浓度的单宁酸蔗糖溶液 (单宁酸浓度分别为 50、250、500 mg/L, 蔗糖浓度为 10%), 使用 NaOH 和 HCl 溶液初步调节体系的 pH 至 7.5 左右。将反应体系在 30 °C、振荡频率为 120 r/min 下分别振荡 10、30、50、70、100、120、150、180、200、300 min, 离心, 取上清液, 迅速测定上清液中单宁酸的浓度及上清液的 pH, 并计算吸附量<sup>[4-6]</sup>。

吸附量的计算公式为:

$$q = \frac{V(C_0 - C)}{m} \quad (1)$$

式 (1) 中:  $q$  为吸附量, mg/g;  $V$  为单宁酸溶液的体积, L;  $C_0$  为吸附前单宁酸溶液的浓度, mg/L;  $C$  为吸附后单宁酸溶液的浓度, mg/L;  $m$  为新生磷酸钙的质量, g。

#### 1.2.4 新生磷酸钙对单宁酸吸附等温线研究

分别在 0.0%、5.0% 和 10.0% 蔗糖溶液中配制系列浓度的单宁酸溶液, 使单宁酸的浓度系列均匀地分布在 50~3000 mg/L。分别加入 100 mL 上述配制好的系列浓度的单宁酸溶液于 250 mL 具塞锥形瓶中, 准确称取 1.50 g 新生磷酸钙样品置于锥形瓶中, 使用 NaOH 和 HCl 溶液初步调节体系的 pH 值。在 30 °C、振荡频率为 120 r/min 下振荡 150 min, 离心, 取上清液, 测定上清液中单宁酸的浓度及上清液的 pH, 并计算吸附量<sup>[4-6]</sup>。

#### 1.2.5 吸附模型

##### 1.2.5.1 动力学吸附模型

分别采用粒内扩散模型、准一级动力学模型和准二级动力学模型对新生磷酸钙对单宁酸的吸附动力学曲线数据进行拟合。

粒内扩散速率可由 Weber-Morris 扩散模型方程求出<sup>[7-9]</sup>:

$$q_t = k_p t^{0.5} + C \quad (2)$$

式 (2) 中,  $k_p$  为代表颗粒内扩散速率常数,  $mg/(g \cdot min^{0.5})$ ; 以  $q_t$  对  $t^{0.5}$  作直线, 直线部分的斜率即为颗粒内扩散速率常数  $k_p$ 。

准一级动力学方程式<sup>[10-12]</sup>:

$$\ln(q_e - q_t) = \ln q_e - k_1 t \quad (3)$$

准二级动力学方程式<sup>[10-12]</sup>:

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{t}{q_e} \quad (4)$$

式 (3) 和 (4) 中,  $q_e$  与  $q_t$  分别为平衡时刻和  $t$  时刻新生磷酸钙的吸附量, mg/g;  $k_1$  为准一级吸附速率常数,  $min^{-1}$ ;  $k_2$  为准二级吸附速率常数,  $g/(mg \cdot min)$ 。

##### 1.2.5.2 等温吸附模型

为了研究单宁酸溶液的平衡质量浓度与吸附量之间的关系以及新生磷酸钙对单宁酸的最大吸附量, 采用 Langmuir 等温吸附方程和 Freundlich 等温吸附方程来拟合吸附过程。

Langmuir 等温吸附方程为<sup>[12-14]</sup>:

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{C_e}{q_m} + \frac{1}{q_m k_L} \quad (5)$$

式 (5) 中,  $C_e$  为吸附平衡时溶液中单宁酸的浓度, mg/L;

$q_e$  为平衡吸附量, mg/g;  $q_m$  为饱和吸附量, mg/g;  $k_L$  为常数, L/mg.

Freundlich 等温吸附方程为<sup>[12-14]</sup>:

$$\ln q_e = \ln k + n \ln C_e \quad (6)$$

式(6)中,  $C_e$  为吸附平衡时溶液中单宁酸的浓度, mg/L;  $q_e$  为平衡吸附量, mg/g;  $k$  和  $n$  为吸附特征常数.

### 1.2.6 数据统计分析

运用 Microsoft Excel 软件对试验数据进行动力学模型和等温吸附模型的拟合分析.

## 2 结果与分析

### 2.1 新生磷酸钙对单宁酸的吸附动力学

在温度为 30 °C, pH=7.4±0.1, 蔗糖浓度为 10%, 单宁酸的初始浓度分别为 50、250、500 mg/L 时, 新生磷酸钙对单宁酸的吸附动力学曲线如图 1 所示, 不含蔗糖溶液中新生磷酸钙对单宁酸的吸附动力学曲线如图 2 所示.

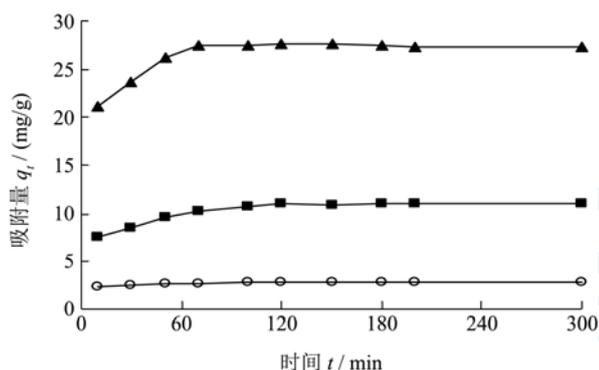


图 1 10%蔗糖溶液中新生磷酸钙对单宁酸的吸附动力学曲线

Fig.1 Adsorption kinetic curves of tannic acid on fresh calcium phosphate in 10% sucrose solution

注: ○-50 mg/L; ■-250 mg/L; ▲-500 mg/L.

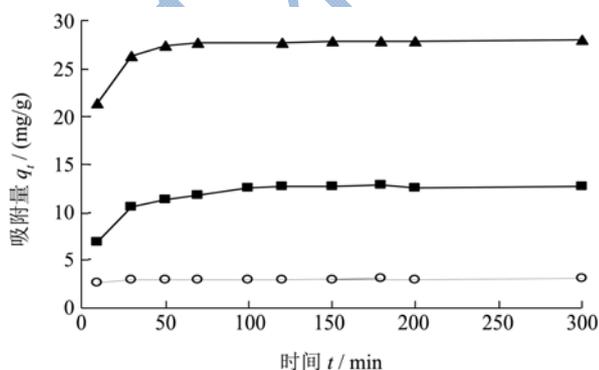


图 2 不含蔗糖溶液中新生磷酸钙对单宁酸的吸附动力学曲线

Fig.2 Adsorption kinetic curves of tannic acid on fresh calcium phosphate in the solution without sucrose

注: ○-50 mg/L; ■-250 mg/L; ▲-500 mg/L.

从图中可以看出, 在吸附开始时, 新生磷酸钙对

单宁酸的吸附量随着吸附时间的延长而增加, 当吸附时间达到 150 min 时, 新生磷酸钙对单宁酸的吸附达到平衡, 其后随着反应时间的延长吸附量不再增加.

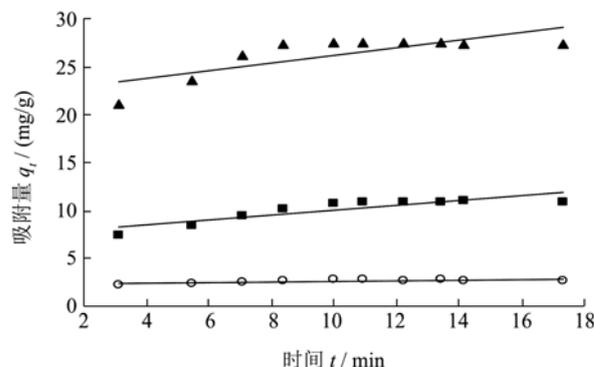


图 3 10%蔗糖溶液中新生磷酸钙对单宁酸吸附动力学的粒内扩散方程拟合结果

Fig.3 Intraparticle diffusion equation of tannic acid on fresh calcium phosphate in 10% sucrose solution

注: ○-50 mg/L; ■-250 mg/L; ▲-500 mg/L.

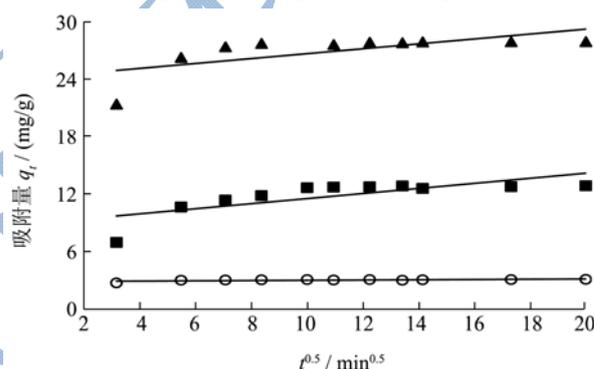


图 4 不含蔗糖溶液中新生磷酸钙对单宁酸吸附动力学的粒内扩散方程拟合结果

Fig.4 Intraparticle diffusion equation of tannic acid on fresh calcium phosphate in the solution without sucrose

注: ○-50 mg/L; ■-250 mg/L; ▲-500 mg/L.

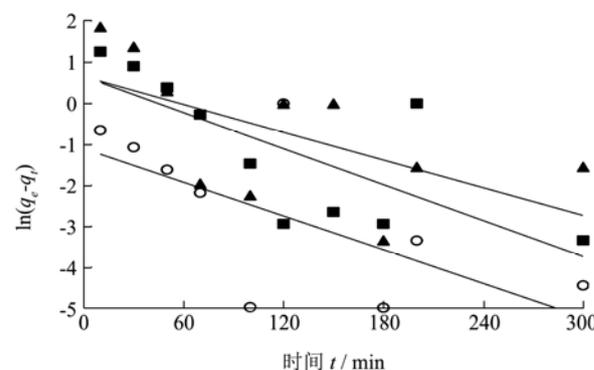


图 5 10%蔗糖溶液中新生磷酸钙吸附单宁酸的准一级动力学方程拟合结果

Fig.5 Pseudo-first-order reaction equation of tannic acid on fresh calcium phosphate in 10% sucrose solution

注: ○-50 mg/L; ■-250 mg/L; ▲-500 mg/L.

按照实验方法 1.2.5.1, 采用粒内扩散模型、准一级动力学模型和准二级动力学模型分别对蔗糖溶液和不含蔗糖溶液中新生磷酸钙对单宁酸的吸附动力学曲线数据进行拟合, 拟合结果见图 3~8 和表 1。由图 3~图 8 以及表 1 的拟合参数可以看出, 在 3 个实验质量浓度条件下蔗糖溶液中新生磷酸钙对单宁酸的吸附动力学数据与粒内扩散模型、准一级动力学模型拟合的线性相关性较差, 相关系数  $R^2$  的范围分别为 0.6069~0.7704 和 0.3584~0.5523。

用准二级动力学模型拟合的得到的相关系数  $R^2$  的范围为 0.9994~0.9998, 说明蔗糖溶液中新生磷酸钙对单宁酸的吸附动力学符合准二级动力学方程。通过准二级动力学拟合方程计算出在实验条件下:

单宁酸的初始的浓度分别为 50、250、500 mg/L 时, 在 10%蔗糖的溶液中新生磷酸钙对单宁酸的吸附的速率常数分别为 0.1237、0.0134、0.0156 g/(mg·min), 其理论的吸附量分别为 2.8458、11.3507、27.7778 mg/g。蔗糖分子的存在并不影响新生磷酸钙对单宁酸的吸附动力学行为, 在不含蔗糖溶液中新生磷酸钙对单宁酸的吸附也符合准二级动力学方程, 相关系数  $R^2$  的范围为 0.9997~1.000。

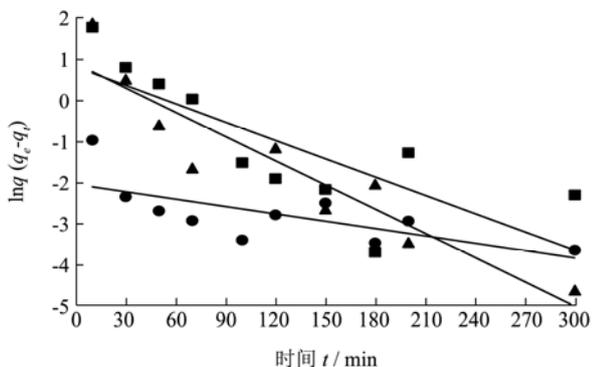


图 6 不含蔗糖溶液中新生磷酸钙吸附单宁酸的准一级动力学方程拟合结果

Fig.6 Pseudo-first-order reaction equation of tannic acid on fresh calcium phosphate in the solution without sucrose

注: ○-50 mg/L; ■-250 mg/L; ▲-500 mg/L。

表 1 新生磷酸钙吸附单宁酸的动力学模型拟合参数

Table 1 Adsorption kinetics constant of tannic acid on fresh calcium phosphate

单宁酸初始质量浓度/(mg/L)	粒内扩散模型		准一级动力学模型		准二级动力学模型		
	$K_p$ /[mg/(g·min <sup>0.5</sup> )]	$R^2$	$K_1$ /(min <sup>-1</sup> )	$R^2$	$q_e$ /(mg/g)	$K_2$ /[g/(mg·min)]	$R^2$
10%蔗糖溶液中							
50	0.0352	0.7209	0.0137	0.4213	2.8458	0.1237	0.9998
250	0.2510	0.7704	0.0147	0.5523	11.3507	0.0134	0.9994
500	0.3944	0.6069	0.0112	0.3584	27.7778	0.0156	0.9997

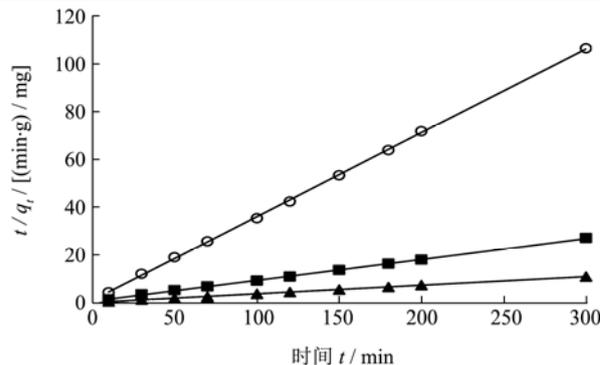


图 7 10%蔗糖溶液中新生磷酸钙吸附单宁酸的准二级动力学方程拟合结果

Fig.7 Pseudo-second-order reaction equation of tannic acid on fresh calcium phosphate in 10% sucrose solution

注: ○-50 mg/L; ■-250 mg/L; ▲-500 mg/L。

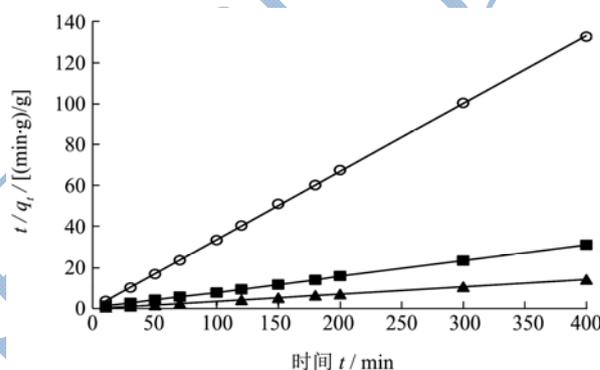


图 8 不含蔗糖溶液中新生磷酸钙吸附单宁酸的准二级动力学方程拟合结果

Fig.8 Pseudo-second-order reaction equation of tannic acid on fresh calcium phosphate in the solution without sucrose

注: ○-50 mg/L; ■-250 mg/L; ▲-500 mg/L。

不含蔗糖溶液中单宁酸的初始质量浓度分别为 50、250、500 mg/L 时, 新生磷酸钙对单宁酸的吸附速率常数分别为 0.1836、0.0123、0.0198 g/(mg·min), 其理论吸附量分别为 3.0157、13.0548、28.0899 mg/g, 高于在 10%蔗糖溶液体系中新生磷酸钙对单宁酸的理论吸附量。

接上页

不含蔗糖溶液中

50	0.0136	0.4466	0.0060	0.4893	3.0157	0.1836	0.9999
250	0.2640	0.5667	0.0150	0.6191	13.0548	0.0123	0.9997
500	0.2567	0.4481	0.0198	0.8680	28.0899	0.0198	1.0000

2.2 新生磷酸钙吸附单宁酸的吸附等温线研究

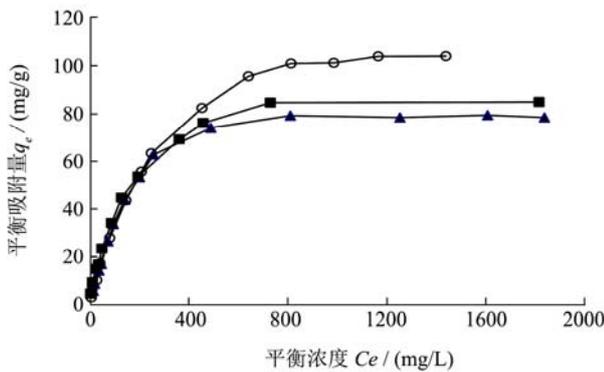


图9 不同浓度蔗糖溶液中新生磷酸钙对单宁酸的吸附等温线

Fig.9 Adsorption curve of tannic acid on fresh calcium phosphate in different concentrations of sucrose solution

注: ○-蔗糖浓度 0.0%; ■-蔗糖浓度 5.0%; ▲-蔗糖浓度 10.0%。

在温度为 30 ℃、吸附时间 150 min、pH 为 7.40±0.1 的实验条件下,蔗糖浓度分别为 0.0%、5.0%、10.0% 的溶液体系中新生磷酸钙对单宁酸的吸附等温线见图 9。由图 9 可以看出,在单宁酸质量浓度较低的范围,新生磷酸钙对单宁酸的吸附量随着平衡浓度的升高而迅速增大,当单宁酸的平衡浓度大于 450 mg/L 时,吸附量增长变缓。当单宁酸的平衡浓度达到 800 mg/L 时,新生磷酸钙对单宁酸的吸附量基本达到饱和。蔗糖浓度对新生磷酸钙对单宁酸的吸附量具有一定影响,在不含蔗糖体系中对单宁酸的吸附量最大,随着溶液中蔗糖浓度的升高,新生磷酸钙对单宁酸的吸附量逐渐降低。

按照实验方法 1.2.5.2 分别用 Langmuir 等温方程和 Freundlich 等温方程对不同浓度蔗糖溶液中新生磷酸钙对单宁酸的吸附等温线数据进行拟合,得到的结

表 2 新生磷酸钙吸附单宁酸的等温线拟合结果

Table 2 Isothermal parameters for adsorption of tannic acid on fresh calcium phosphate

溶液中蔗糖浓度/%	Langmuir 吸附等温方程			Freundlich 吸附等温方程		
	$q_m/(mg/g)$	$K_L$	相关系数 $R^2$	$k$	$n$	相关系数 $R^2$
0.0%	125.00	0.004192	0.9934	1.3823	0.6449	0.9712
5.0%	91.74	0.008667	0.9954	3.2075	0.4980	0.9607
10.0%	86.96	0.006810	0.9963	2.4920	0.5122	0.8898

由表 2 的拟合结果可以看出,数据采用 Langmuir 吸附等温方程对吸附过程进行拟合的相关系数为

果如图 10 和图 11 所示,拟合参数如表 2 所示。

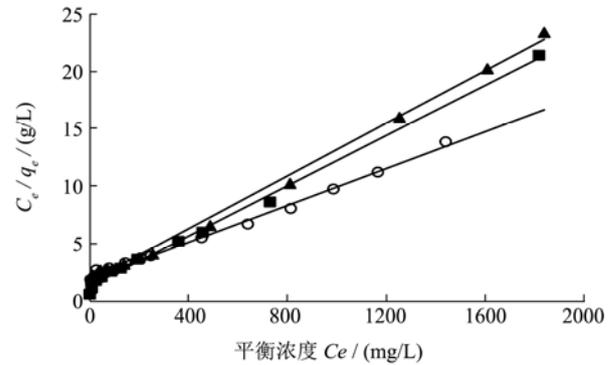


图 10 不同浓度蔗糖溶液中新生磷酸钙对单宁酸吸附等温线的 Langmuir 等温方程线性拟合结果

Fig.10 Linear fit of Langmuir isotherm equation in different concentrations of sucrose solution

注: ○-蔗糖浓度 0.0%; ■-蔗糖浓度 5.0%; ▲-蔗糖浓度 10.0%。

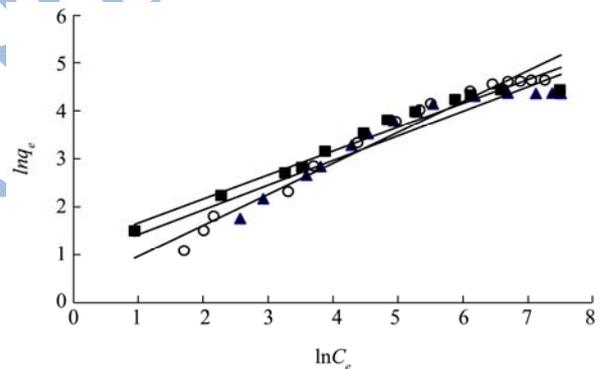


图 11 不同浓度蔗糖溶液中新生磷酸钙对单宁酸吸附等温线的 Freundlich 等温方程线性拟合

Fig.11 Linear fit of Freundlich isotherm equation in different concentrations of sucrose solution

注: ○-蔗糖浓度 0.0%; ■-蔗糖浓度 5.0%; ▲-蔗糖浓度 10.0%。

0.9934~0.9963, 采用 Freundlich 吸附等温方程对吸附过程进行拟合的相关系数为 0.8898~0.9712, Langmuir

吸附等温方程的相关系数较 Freundlich 吸附等温方程更接近于 1, 新生磷酸钙对单宁酸的吸附过程更符合 Langmuir 等温吸附模型, 根据 Langmuir 等温吸附模型的假定, 认为新生磷酸钙对单宁酸的吸附呈单分子层吸附。蔗糖的浓度对吸附量具有一定影响, 当蔗糖溶液的浓度为分别为 0.0%、5.0%、10.0%时, 新生磷酸钙对单宁酸的饱和吸附量依次降低分别为 125.00 mg/g、91.74 mg/g、86.96 mg/g。

### 3 结论

3.1 在蔗糖溶液中新生磷酸钙对单宁酸的吸附动力学符合准二级动力学方程, 用准二级动力学模型拟合得到的相关系数  $R^2$  的范围为 0.9994~0.9998。当单宁酸的初始浓度分别为 50、250、500 mg/L 时, 10%蔗糖溶液中新生磷酸钙对单宁酸的吸附速率常数分别为 0.1237、0.0134、0.0156 g/(mg·min), 其理论吸附量分别为 2.8458、11.3507、27.7778 mg/g; 蔗糖分子的存在并不影响新生磷酸钙的吸附动力学模型, 但其吸附量具有一定影响, 不含蔗糖溶液中单宁酸的初始质量浓度分别为 50、250、500 mg/L 时, 新生磷酸钙对单宁酸的吸附速率常数分别为 0.1836、0.0123、0.0198 g/(mg·min), 其理论吸附量分别为 3.0157、13.0548、28.0899 mg/g, 高于在 10%蔗糖溶液体系中新生磷酸钙对单宁酸的理论吸附量。

3.2 新生磷酸钙对单宁酸的吸附呈单分子层吸附, 符合 Langmuir 等温吸附模型, 新生磷酸钙对单宁酸的饱和吸附量随着蔗糖浓度的升高而降低, 在不含蔗糖溶液体系中对单宁酸的吸附量最大, 当蔗糖溶液的浓度为分别为 0.0%、5.0%、10.0%时, 新生磷酸钙对单宁酸的饱和吸附量依次降低分别为 125.00、91.74、86.96 mg/g。

### 参考文献

- [1] Kaili Lin, Jiang Chang, Jianxi Lu, et al. Properties of  $\beta$ - $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$  bioceramics prepared using nano-size powders [J]. *Ceramics International*, 2007, 33: 979-985
- [2] 何惠欢,梁贤慧,陆登俊.蔗汁澄清过程各种酚类含量变化的研究[J].*食品科技*,2015,40(5):105-109  
HE Hui-huan, LIANG Xian-hui, LU Deng-jun. Changes of phenols content in cane juice clarification process [J]. *Food Engineering*, 2015, 40(5): 105-109
- [3] 何中秋,程志强,康立娟,等.明胶吸附单宁酸的机理探讨及其在蓝莓汁脱涩中的应用[J].*食品科学*,2015,36(1):104-108  
HE Zhong-qiu, CHENG Zhi-qiang, KANG Li-juan, et al. Mechanism of adsorption of tannic acid by gelatin and its application to astringency removal of blueberry juice [J]. *Food Science*, 2015, 36(1): 104-108
- [4] Konggadinata M I, Chao B, Lian Q Y, et al. Equilibrium, kinetic and thermodynamic studies for adsorption of BTEX onto Ordered Mesoporous Carbon (OMC) [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2017, 336: 249-259
- [5] Kumar P S, Ramalingam S, Kiruph S D, et al. Adsorption behavior of nickel(II) onto cashew nut shell: Equilibrium, thermodynamics, kinetics, mechanism and process design [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2011, 167: 122-131
- [6] 田玉红,徐想丽,李利军,等.新生磷酸钙对没食子酸的吸附性能研究[J].*食品工业科技*,2014,35(8):126-130  
TIAN Yu-hong, XU Xiang-li, LI Li-jun, et al. Adsorption characteristics of gallic acid on fresh calcium phosphate [J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2014, 35(8): 126-130
- [7] Salam H M A E, Younis S A, Ali H R, et al. Statistical modeling and optimization of phenol adsorption from water by modified  $\text{Cu}_3(\text{BTC})_2$ : Kinetic, isotherm, and thermodynamic analysis [J]. *Microporous and Mesoporous Materials*, 2017, 241: 210-217
- [8] Jia Z G, Li Z Y, Ni T, et al. Adsorption of low-cost absorption materials based on biomass (*Cortaderia selloana*, flower spikes) for dye removal: Kinetics, isotherms and thermodynamic studies [J]. *Journal of Molecular Liquids*, 2017, 229: 285-292
- [9] Wang Y, Gao B Y, Yue W W, et al. Adsorption kinetics of nitrate from aqueous solutions onto modified wheat residue [J]. *Colloids and Surfaces A*, 2007, 308: 1-5
- [10] 安莲英,张春霞,黄献奖.磷酸铵-海藻酸钙复合吸附剂的制备及其铷吸附热力学及动力学[J].*化工学报*,2016,67(4): 1378-1385  
AN Lian-ying, ZHANG Chun-xia, HUANG Xian-jiang. Preparation of ammonium tungstophosphate-calcium alginate composite adsorbent and adsorption thermodynamic and kinetic characteristics to rubidium [J]. *CIESC Journal*, 2016, 67(4): 1378-1385
- [11] 龚正群,周文波,陈钰.花生壳活性炭对水中荧光素钠的吸附及动力学[J].*环境工程学报*,2013,7(1):221-225  
GONG Zheng-qun, ZHOU Wen-bo, CHEN Yu. Adsorption and dynamics of active peanut shell carbon adsorbing fluorescein sodium [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2013, 7(1): 221-225
- [12] Ooi C H, Cheah W K, Sim Y L, et al. Conversion and

- characterization of activated carbon fiber derived from palm empty fruit bunch waste and its kinetic study on urea adsorption [J]. *Journal of Environmental Management*, 2017, 197: 199-205
- [13] 王津南,周扬,李爱民,等.氨基修饰超高交联树脂对单宁酸的吸附行为及机理研究[J].*高分子学报*,2010,1:96-101  
WANG Jin-nan, ZHOU Yang, LI Ai-min, et al. Adsorption of tannic acid by hyper-crosslinked resin modified by amino function groups [J]. *Acta Polymerica Sinica*, 2010, 1: 96-101
- [14] Konicki W, Aleksandrak M, Moszyński D, et al. Adsorption of anionic azo-dyes from aqueous solutions onto graphene oxide: Equilibrium, kinetic and thermodynamic studies [J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2017, 496: 188-200

现代食品科技