

阴离子交换树脂对米糠植酸的吸附解吸性能*

王琳 罗建平 查学强 张海林 潘利华

(合肥工业大学生物与食品工程学院, 合肥 230009)

【摘要】 通过静态和动态试验研究了6种阴离子交换树脂对植酸的吸附与解吸性能。结果表明,D201树脂对植酸的吸附交换作用较好,且在pH值为2.2时吸附能力最强,静态吸附量达到94.54 mg/g,1.5 mol/L的NaOH溶液利于植酸解吸;Freundlich吸附等温方程可以较好地描述D201树脂对植酸的等温吸附,表明吸附在常温下进行即可;D201树脂对植酸的吸附过程符合 Lagergren 一级速率方程,表观吸附速率常数 k 与植酸起始植酸浓度呈负相关关系,与温度呈正相关关系。在D201树脂对植酸的动态吸附与解吸过程中,层析柱管径、上样液浓度、上样液流速和洗脱剂流速对吸附与解吸效果影响较大。

关键词: 植酸 脱脂米糠 阴离子交换树脂 吸附交换 解吸 动力学

中图分类号: TQ914.1; TQ028.1+5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2011)05-0160-06

Adsorption and Desorption Properties of Phytic Acid from Rice Bran on Anion Exchange Resin

Wang Lin Luo Jianping Zha Xueqiang Zhang Hailin Pan Lihua

(School of Biotechnology and Food Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract

The absorption and desorption properties of phytic acid on anion exchange resin were investigated through static and dynamic experiments. The results showed that D201 resin had the best exchange adsorption performance among all tested resins. The static absorption capacity of D201 resin reached 94.54 mg/g when the pH value of phytic acid solution was adjusted to 2.2, and sodium hydroxide solution of 1.5 mol/L was beneficial to desorption. The absorption behavior of D201 resin for phytic acid obeyed the Freundlich adsorption isotherm equation, indicating that the absorption can be performed under normal temperature. The absorption kinetic data complied with Lagergren pseudo-first-order rate equation. The apparent adsorption rate k has a negative correlation with the initial concentration of phytic acid and has a positive correlation with temperature. As far as the dynamic absorption and desorption of phytic acid on D201 resin was concerned, the effects of chromatography column diameter, sample concentration, sample flowing velocity and eluant flowing velocity were notably observed.

Key words Phytic acid, Defatted rice bran, Anion exchange resin, Adsorptive exchange, Desorption, Kinetics

引言

植酸($C_6H_{18}O_{24}P_6$)又名肌醇六磷酸酯,以菲汀形式广泛存在于植物界,其中禾谷类作物种子中最为丰富,含量能达到6%~10%^[1],已广泛应用于食

品、医药、油漆涂料、日用化工、金属加工、纺织工业、塑料工业及高分子工业等领域^[2~3]。

目前,植酸的精制方法主要是离子交换法,电渗析、沉淀法和膜分离等方法也均需要离子交换法来辅助分离纯化^[4~6]。在植酸的分离纯化中,应用较

收稿日期: 2010-08-16 修回日期: 2010-12-03

* 安徽省“十一五”科技攻关项目(08010202143)和安徽省教育厅自然科学研究重点项目(KJ2009A042)

作者简介: 王琳,硕士生,主要从事农产品加工与贮藏研究,E-mail: wanglin198631@163.com

通讯作者: 罗建平,教授,主要从事中草药与功能食品研究,E-mail: jianpingluo@yahoo.com.cn

多的阴离子交换树脂主要有 $201 \times 7^{[7]}$ 、 $704^{[8]}$ 和 $D315^{[9]}$ 等,且不同类型的树脂纯化分离效果差异较大,但有关阴离子交换树脂对植酸的吸附解吸性能研究却鲜见报道。本文比较 6 种阴离子交换树脂对植酸的吸附解吸效果,在筛选出适合植酸吸附的树脂基础上,通过静态和动态试验研究阴离子交换树脂对植酸的吸附与解吸性能,为探求适宜的纯化工工艺,制备较高纯度的植酸提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

1.1.1 植酸提取液

脱脂米糠(合肥金润米业有限公司)与体积分

数 40% 的乳酸以 1:10 (米糠质量(g)与乳酸体积(mL)之比)混合均匀后,放入超声提取器中,于 45℃、400 W 条件下超声预处理 5 min,得到超声预处理液;再将超声预处理液于 70℃、800 r/min 下磁力搅拌提取 30 min,得植酸粗提液;植酸粗提液于 6 000 r/min 离心 10 min,收集上清液;上清液先通过截留分子量为 1 000 Da 的超滤膜,收集透过液;透过液再通过截留分子量为 200 Da 的纳滤膜,收集截留液即得植酸提取液。

1.1.2 阴离子交换树脂

试验所用 201×4 、 201×7 、D201、D301、D311 和 D315 阴离子交换树脂均由安徽三星树脂厂提供。树脂的类型及特点见表 1。

表 1 各种离子交换树脂的类型及特点
Tab.1 Types and characteristics of ion exchange resins

树脂代号	外观	树脂结构	含水率/%	功能基团	出厂形式
201 × 4	淡黄色至金黄色球状颗粒	苯乙烯-二乙烯苯	50 ~ 60	—N ⁺ (CH ₃) ₃	Cl ⁻¹
201 × 7	淡黄色至金黄色球状颗粒	苯乙烯-二乙烯苯	42 ~ 48	—N ⁺ (CH ₃) ₃	Cl ⁻¹
D201	乳白至淡黄色不透明球状颗粒	苯乙烯-二乙烯苯	50 ~ 60	—N ⁺ (CH ₃) ₃	Cl ⁻¹
D301	乳白至淡黄色不透明球状颗粒	苯乙烯-二乙烯苯	50 ~ 60	—N(CH ₃) ₂	游离碱型
D311	乳白至淡黄色不透明球状颗粒	丙烯酸系	55 ~ 65	—NH ₂	游离碱型
D315	乳白色至乳黄色不透明球状颗粒	丙烯酸系	47 ~ 57	—NH ₂	游离碱型

树脂预处理步骤:100 g/L 的 NaCl 浸泡 18 ~ 20 h →1 mol/L 的 HCl 浸泡 8 h →1 mol/L 的 NaOH 浸泡 8 h。浸泡液均为树脂体积的 3 ~ 5 倍,每次浸泡完毕均用蒸馏水清洗树脂。

树脂再生时同预处理方法。

1.1.3 仪器设备与试剂

电子天平(AR1140/C 型,OHAUS 公司,精确至 0.000 1 g);V-1100 型可见光分光光度计(上海嘉鹏科技有限公司);恒温摇床(HQ45Z 型,中国科学院武汉科学仪器厂);电热鼓风干燥箱(DGF30/7-I 型,南京实验仪器厂);氯化钠、氢氧化钠、盐酸、偏钒酸铵、钼酸铵、硝酸、高氯酸等试剂均为国产 AR 试剂。

1.2 静态吸附与解吸

1.2.1 树脂筛选试验

分别称取 3.0 g(湿质量)已预处理的各型号阴离子交换树脂于 50 mL 烧杯中,各加入质量浓度为 8 mg/mL 的植酸溶液 20 mL,室温下浸泡 12 h,取上清液测植酸含量。计算树脂吸附量 Q 。

1.2.2 pH 值对吸附与解吸的影响

取 4 份植酸稀溶液(pH 值 2.20),各 10 mL,分别调节 pH 值至 3.15、4.40、5.38、6.23,然后将不同 pH 值的植酸溶液于 25 mL 容量瓶中定容,以确保各

植酸溶液中植酸含量相等。取不同 pH 值的植酸溶液 15 mL 分别浸泡 D201 离子交换树脂(2.0 g)12 h,取上清液测定植酸含量。弃液,分别用 20 mL 的 NaOH 溶液(1 mol/L)静态洗脱,测洗脱液中植酸含量。

1.2.3 洗脱剂的选择

向 1.0 g 饱和吸附植酸的 D201 树脂中分别加入 5.0 mL 不同浓度的 HCl、NaOH 和 NaCl 溶液,静态洗脱 24 h,测定洗脱液中植酸的含量。

1.2.4 吸附等温线

分别考察 10、30 和 50℃ 下 D201 树脂对植酸的平衡吸附效果;向 5 个 100 mL 的锥形瓶中各加入 1.0 g 预处理好的树脂和 50 mL 不同初始质量浓度 C_0 的植酸溶液(2、4、6、8、10 mg/mL),保鲜膜封口,置恒温摇床上,在转速为 70 r/min 下振荡 24 h,测平衡质量浓度 C_e ,计算平衡吸附量 Q_e 。以 C_e 为横坐标, Q_e 纵坐标作吸附等温线。

1.2.5 吸附动力学试验

植酸质量浓度:在 30℃ 下,分别向 3 个 250 mL 锥形瓶中加入 2.0 g 预处理好的 D201 树脂和 150 mL 不同初始质量浓度 C_0 (2、6、10 mg/mL) 的植酸溶液,保鲜膜封口,置恒温摇床上,在 70 r/min 下振荡,分别于 2、5、10、15、20、25、30、40、60、90、120、

150、180、240、300、360、420 min 取 1.0 mL 样品,测各样品液中植酸的质量浓度 C_t , 计算 t 时刻吸附量 Q_t 。以 t 为横坐标、 Q_t 为纵坐标, 绘制吸附动力学曲线。

温度: 考察 10、30 和 50℃ 下树脂对植酸的吸附动力学。植酸溶液初始质量浓度为 6 mg/mL, 其他操作同上。

1.3 动态吸附与解吸

1.3.1 层析柱直径对树脂吸附的影响

取等量的 D201 树脂 (60 mL) 分别装入直径 16 mm 和直径 10 mm 的层析柱。然后将初始质量浓度为 6 mg/mL 的植酸溶液 (pH 值 2 ~ 3), 以 1 mL/min 流速分别通过上述两种层析柱, 观察树脂的渗漏情况。自动分布收集器收集流出液 (10 mL/管), 测流出液中植酸的含量。

1.3.2 上样液流速对树脂吸附的影响

向直径为 16 mm 的层析柱中装入 30 mL 的 D201 树脂, 将初始质量浓度为 6 mg/mL 的植酸溶液 (pH 值 2 ~ 3), 分别以 1 mL/min 和 2 mL/min 的流速通过树脂柱, 观察树脂的渗漏情况。自动分布收集器收集流出液 (10 mL/管), 测流出液中植酸的含量。

1.3.3 上样液质量浓度对树脂吸附的影响

向直径为 16 mm 的层析柱中装入 30 mL D201 树脂, 将初始质量浓度为 6 mg/mL 和 10 mg/mL 的植酸溶液 (pH 值 2 ~ 3), 以 1 mL/min 的流速分别通过树脂柱, 观察树脂的渗漏情况。自动分布收集器收集流出液 (10 mL/管), 测流出液中植酸的含量。

1.3.4 洗脱液流速对树脂洗脱的影响

将初始质量浓度为 6 mg/mL 的植酸溶液 (pH 值 2 ~ 3), 以 1 mL/min 的流速通过装有 30 mL D201 的树脂柱 (直径为 16 mm)。洗脱剂选用 1.5 mol/L 的 NaOH, 考察洗脱液流速 (1 mL/min、2 mL/min) 对植酸解析的影响。自动分布收集器收集流出液 (10 mL/管), 测流出液中植酸的含量。

1.4 试验过程中的相关计算

1.4.1 植酸含量测定

采用磷钼黄比色法^[10]测定植酸含量, 溶液中植酸质量浓度计算公式为

$$C = 3.552(C_1 - C_2)$$

式中 C_1 ——溶液中总磷质量浓度, mg/mL

C_2 ——溶液中无机磷质量浓度, mg/mL

1.4.2 阴离子交换树脂的吸附量计算

阴离子交换树脂的吸附量计算公式为

$$Q_t = V(C_0 - C_t) / [G(1 - a)]$$

式中 V ——溶液体积, mL G ——树脂湿质量, g

a ——树脂含水率, %

2 结果与分析

2.1 静态吸附与解吸

2.1.1 树脂的筛选

比较 201 × 4、201 × 7、D201、D301、D311 和 D315 等 6 种阴离子树脂对植酸的吸附效果, 结果表明 D201 大孔强碱性苯乙烯系阴离子交换树脂对植酸的吸附效果最好, 吸附量达到 94.54 mg/g, D311 树脂的吸附效果最差, 其吸附量仅为 D211 的 50% 左右。201 × 4、201 × 7、D201、D301 属于苯乙烯-二乙烯苯系, D311 和 D315 属于丙烯酸系, 总的看来, 前者对植酸的吸附效果要优于后者。与普通强碱性阴离子交换树脂 (201 × 4、201 × 7) 相比, D201 具有大孔结构, 植酸交换能够深入到颗粒内部, 交换能力增大; 与大孔弱碱性阴离子交换树脂 (D301、D311 和 D315) 相比, D201 碱性较强, 交换能力也较强。因此, 后续关于树脂精制植酸的研究均采用 D201 树脂。

2.1.2 pH 值对吸附与解吸的影响

结果表明, 随着植酸提取液 pH 值的增大, 平衡吸附后上清液中植酸含量呈递增趋势, 洗脱液中植酸含量呈减小趋势 (图 1)。pH 值为 2.2 时, D201 树脂对植酸的吸附量较大; 相同浓度、不同 pH 值的植酸溶液被 D201 饱和吸附后, 用浓度为 1 mol/L 的 NaOH 静态洗脱, pH 值为 2.2 时, 洗脱液中植酸含量较大。所以, D201 树脂对植酸进行精制时, 植酸提取液 pH 值应调至 2.2, 有利于进行吸附和洗脱。

2.1.3 洗脱剂的选择

图 2 显示的是以 NaOH、HCl 和 NaCl 为洗脱剂时的植酸洗脱效果。结果表明, NaCl 的洗脱效果在低浓度时好于同浓度下另两种洗脱剂, 且在浓度为 1 mol/L 时达到最好, 之后浓度增加洗脱效果减弱; NaOH 与 HCl 的洗脱效果随浓度的增大而增强, 当 NaOH 浓度高于 1.5 mol/L 后, 植酸洗脱量显著高于同浓度下 HCl 和 NaCl 组, 浓度为 2.5 mol/L 时, 洗脱液中植酸质量浓度达到 3.89 mg/mL, 但与浓度为 1.5 mol/L 和 2 mol/L 的 NaOH 洗脱的植酸相比较无显著性差异 ($P < 0.05$)。考虑到 NaOH 浓度过大会影响植酸的后续精制, 因此选择 1.5 mol/L 的 NaOH 为洗脱剂。

2.1.4 吸附等温线

从图 3 和表 2 可以看出拟合曲线与试验数据点吻合较好, 相关度 R^2 均约 0.98, 表明 Freundlich 吸附等温方程^[11]可以较好地描述 D201 对植酸的等温吸附。且 $n > 1$, $1/n$ 约为 0.216, 表示 D201 树脂对

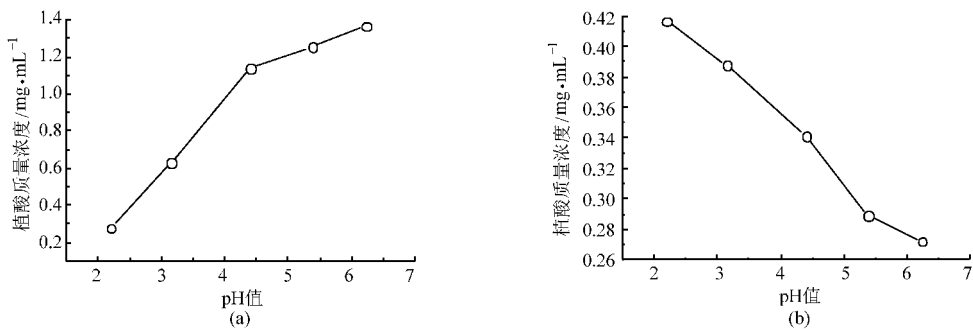


图 1 pH 值对吸附与解吸的影响
Fig. 1 Effects of pH value on absorption and desorption of phytic acid
(a) 吸附平衡后上清液 (b) 洗脱液

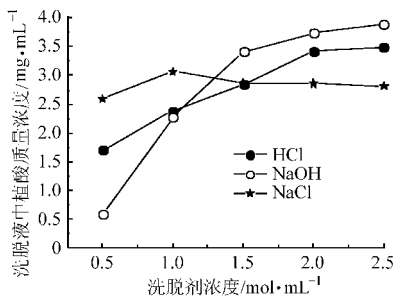


图 2 洗脱剂种类和浓度对植酸洗脱的影响
Fig. 2 Effects of eluant type and concentration on phytic acid

植酸的吸附交换容易进行,是优惠吸附^[12]。从图 3 还可看出,30℃时的平衡吸附量 Q_e 比 10℃ 时大,而 50℃ 时的平衡吸附量 Q_e 比 10℃ 时小,表明 D201 树脂吸附植酸的量与温度密切相关,它对温度要求存在一个阈值,当低于此阈值时,植酸吸附量随着温度的升高而增加,而高于此阈值的温度不利于植酸的吸附。为了生产方便和降低生产成本,从试验数据上分析,采用 D201 树脂精制植酸在常温下进行即可。

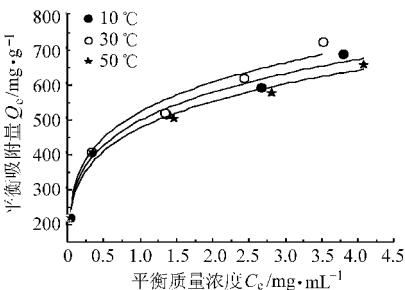


图 3 植酸在 D201 树脂上的吸附等温线
Fig. 3 Isothermal curves of adsorption for phytic acid on D201 resin

表 2 植酸在 D201 树脂上的吸附等温方程

Tab. 2 Adsorption isotherm equations for phytic acid on D201 resin

温度/℃	拟合方程	n	R^2
10	$Q_e = 497.4C_e^{0.217}$	4.608	0.988 10
30	$Q_e = 522.8C_e^{0.216}$	4.634	0.979 10
50	$Q_e = 475.8C_e^{0.215}$	4.659	0.986 35

2.1.5 吸附动力学

由图 4a 和图 4c 可知,不同条件下的植酸在吸附前期均具有较快的吸附速度,在 120 min 时吸附率达到 85% ~ 98%,表现吸附量随着时间的延长而增大,当时间超过 240 min 后表现吸附量逐渐趋于稳定。对图 4a 和图 4c 数据采用 Lagergren 一级速率方程^[13]进行拟合,拟合结果见图 4b、图 4d 和表 3。拟合的相关性较好,相关度 R^2 均超过 0.94,表明植酸在 D201 树脂上吸附符合一级动力学方程,其表现吸附速率常数 k 与植酸起始质量浓度呈负相关关系,而与温度呈正相关关系,类似现象在研究 D201 树脂对磺基水杨酸的吸附性能过程中也有发现^[14]。

表 3 不同条件下 D201 对植酸的吸附动力学方程

Tab. 3 Adsorption kinetic equations for phytic acid on D201 resin under different conditions

参数	数值	拟合方程	k/min^{-1}	R^2
初始质量浓度 /mg·mL ⁻¹	2	$-\ln(1-F) = 0.03t$	0.030 00	0.944 50
	6	$-\ln(1-F) = 0.018 9t$	0.018 90	0.985 44
	10	$-\ln(1-F) = 0.014 46t$	0.014 46	0.982 68
温度/℃	10	$-\ln(1-F) = 0.017t$	0.017 00	0.973 52
	30	$-\ln(1-F) = 0.018 9t$	0.018 90	0.985 44
	50	$-\ln(1-F) = 0.023 1t$	0.023 10	0.958 54

注:拟合方程为 Lagergren 一级速率方程, $-\ln(1-F) = kt$, k 为表现吸附速率常数; $F = Q_t/Q_e$ 代表 t 时刻的吸附分数。

2.2 动态吸附与解吸

2.2.1 层析柱管径对树脂吸附的影响

在固定树脂用量的条件下,植酸在直径 d 为 16 mm 和 10 mm 的层析柱内穿透体积分别为 980 mL 和 920 mL(图 5),计算得穿透容量分别为 98 mg/mL 和 92 mg/mL。结果表明,等量的 D201 树脂在直径 16 mm 层析柱内的吸附效果要优于直径 10 mm。

2.2.2 上样液流速与质量浓度对树脂吸附的影响

由图 6a 可以看出,上样液流速为 1 mL/min 和 2 mL/min 时的穿透体积分别为 350 mL 和 220 mL。

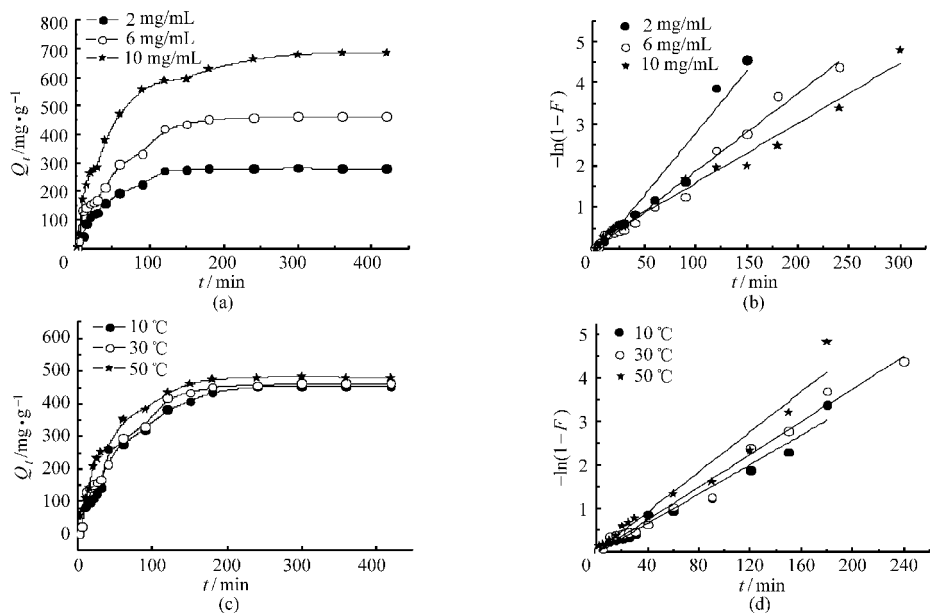


图 4 D201 树脂对植酸的吸附动力学曲线及 $-\ln(1-F)$ 与 t 的线性拟合曲线

Fig.4 Dynamic curves of adsorption of phytic acid on D201 resin and linear fitting of $-\ln(1-F)$ and t

(a) 起始质量浓度对吸附动力学曲线的影响 (b) 起始质量浓度对线性拟合曲线的影响

(c) 温度对吸附动力学曲线的影响 (d) 温度对线性拟合曲线的影响

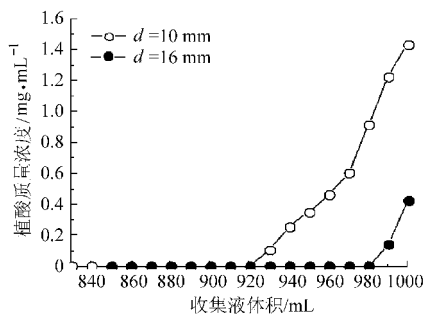


图 5 层析柱管径对 D201 吸附植酸效果的影响

Fig.5 Effect of chromatography column diameter on adsorption of phytic acid on D201 resin

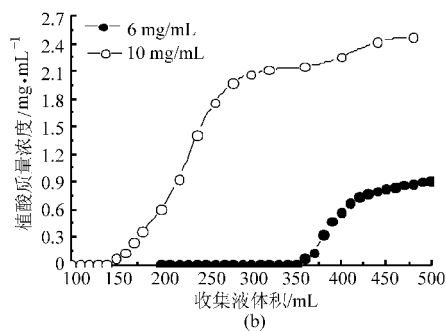
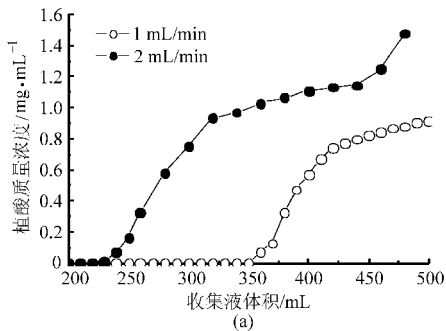


图 6 上样液流速与质量浓度对 D201 吸附植酸效果的影响

Fig.6 Effect of flowing velocity and concentration on adsorption of phytic acid on D201 resin

(a) 流速 (b) 质量浓度

2.2.3 洗脱液流速对树脂洗脱的影响

考察了洗脱剂流速为 1 mL/min 和 2 mL/min 时的动态洗脱曲线 (图 7)。结果表明, 流速为 2 mL/min 时的洗脱峰不太集中, 且有拖尾现象; 而流速为 1 mL/min 时的洗脱曲线呈正态分布, 效果较理想。

3 结论

(1) D201 树脂对植酸的吸附交换作用最强, 静态吸附量为 94.54 mg/g, 且在植酸溶液 pH 值为 2.2 时进行吸附和洗脱的效果较好; 洗脱剂为 1.5 mol/L 的 NaOH 溶液。

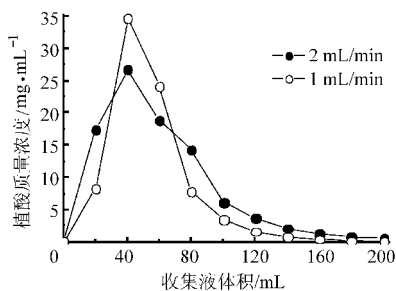


图 7 洗脱液流速对 D201 吸附植酸效果的影响
Fig.7 Effect of eluant flowing velocity on phytic acid elution

(2) Freundlich 模型能较好地描述 D201 树脂对植酸的等温吸附过程,为优惠吸附,且在常温下进行较好;D201 树脂对植酸的吸附符合 Lagergren 一级速率方程,表观吸附速率常数 k 与植酸起始植酸质量浓度呈负相关关系,与温度呈正相关关系。

(3)层析柱管径、上样液流速、上样液质量浓度和洗脱剂流速对 D201 树脂吸附与解吸植酸的过程均有一定影响。

参 考 文 献

1 Oatway L, Vasanthan T, Helm J H. Phytic acid[J]. Food Reviews International, 2001, 17(4): 419 ~ 431.

2 李好管. 植酸的生产及应用开发[J]. 上海化工, 2001(20): 33 ~ 36.

3 万忠民. 植酸对草莓保鲜的研究[J]. 食品科学, 2008, 29(10): 619 ~ 621.

Wan Zhongmin. Study on preservation of phytic acid on strawberry[J]. Food Science, 2008, 29(10): 619 ~ 621. (in Chinese)

4 邹孝强. 水解法制取肌醇的离子交换层析工艺条件研究[D]. 无锡: 江南大学, 2009.

Zou Xiaoqiang. Study on processing conditions of ion exchange chromatography of hydrolysis-prepared inositol [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2009. (in Chinese)

5 刘晓庚, 陈梅梅, 李小康. 用微波辅助浸提离子交换法从米糠中提取植酸的研究[J]. 粮食与食品工业, 2003(1): 32 ~ 35.

Liu Xiaogeng, Chen Meimei, Li Xiaokang. Study on extraction of phytic acid from rice bran using microwave assistant ion exchange resin[J]. Cereal and Oil Industry, 2003(1): 32 ~ 35. (in Chinese)

6 何明威, 王煜, 李健慧. 用 PVC 膜从溶液中分离植酸、卟啉[J]. 山西大学学报, 1996, 19(4): 409 ~ 411.

He Mingwei, Wang Yu, Li Jianhui. Separation of phytic acid and porphyrin from solution by using PVC membrane [J]. Journal of Shanxi University, 1996, 19(4): 409 ~ 411. (in Chinese)

7 张五二, 戴向荣, 魏练平, 等. 低无机离子稻糠植酸提取方法的研究[J]. 生物学杂志, 2008, 25(1): 57 ~ 59.

Zhang Wuer, Dai Xiangrong, Wei Lianping, et al. Research on preparation of phytic acid from rice chaff by low concentration of inorganic acid ion [J]. Journal of Biology, 2008, 25(1): 57 ~ 59. (in Chinese)

8 章炳道. 菜籽饼粕中植酸的提取及其抗氧化活性的研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2007.

Zhang Bingyi. Studies on the extraction and antioxidant activities of phytic acid from rapeseed cake [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2007. (in Chinese)

9 陈建峰. 同步提取、分离及纯化菜籽饼粕中的多酚和植酸[D]. 武汉: 华中农业大学, 2008.

Chen Jianfeng. Synchronized extraction, isolation and purification of polyphenol and phytic acid of rapeseed cake [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2008. (in Chinese)

10 李丽, 吴波, 李庆龙. 磷钼黄比色法测定小麦麸中的植酸[J]. 粮食与饲料工业, 2008(4): 11 ~ 12.

Li Li, Wu Bo, Li Qinglong. Determination of phytic acid in wheat by phosphomolybdenum yellow spectrophotometry[J]. Cereal and Feed Industry, 2008(4): 11 ~ 12. (in Chinese)

11 宋应华, 朱家文, 陈葵, 等. 大孔吸附树脂对红霉素的平衡吸附行为及其热力学性质[J]. 化工学报, 2006, 57(4): 715 ~ 718.

Song Yinghua, Zhu Jiawen, Chen Kui, et al. Adsorption of erythromycin on macroporous resins and thermodynamic analysis [J]. Journal of Chemical Industry and Engineering, 2006, 57(4): 715 ~ 718. (in Chinese)

12 王惠君, 施林妹, 孙静亚. 110* 树脂对镝的吸附及机理研究[J]. 化学工程, 2006, 34(3): 7 ~ 9.

Wang Huijun, Shi Linmei, Sun Jingya. Studies on the sorption behavior and mechanism of 110* resin for Dy³⁺ [J]. Chemical Engineering, 2006, 34(3): 7 ~ 9. (in Chinese)

13 刘福强, 陈金龙, 费正皓, 等. 复合功能超高交联吸附树脂对氨基萘酚磺酸的静态吸附热力学及动力学特征[J]. 应用化学, 2003, 20(12): 1 123 ~ 1 128.

14 谢祖芳, 童张法, 庞起, 等. 阴离子交换树脂对磺基水杨酸的吸附解吸性能[J]. 化学工程, 2009, 37(1): 5 ~ 7.