

# 模拟胃环境下柚皮果胶对 亚硝酸根的吸附动力学<sup>①</sup>

庄远红<sup>1</sup>, 刘静娜<sup>1</sup>, 费鹏<sup>1</sup>, 庞杰<sup>2</sup>

1. 闽南师范大学 生物科学与技术学院, 福建 漳州 363000;

2. 福建农林大学 食品科学学院, 福州 350002

**摘要:** 以柚子白皮为原料制得果胶, 在模拟人体胃环境下进行体外实验, 研究柚皮果胶对  $\text{NO}_2^-$  的吸附效果, 并进行动力学分析, 同时以市售果胶为对照进行红外光谱分析. 结果表明, 柚子白皮果胶对  $\text{NO}_2^-$  的吸附效果与胃环境的 pH 值、 $\text{NO}_2^-$  质量浓度、模拟胃蠕动的的时间和果胶添加量有关, 果胶添加量为 0.8 g/L, pH 值为 1.5,  $\text{NO}_2^-$  质量浓度为 30 mg/L, 420 min 可达吸附平衡, 此时柚子白皮果胶对  $\text{NO}_2^-$  的吸附量为 17.65 mg/g, 去除率为 56.21%. 动力学研究表明, 颗粒内扩散模型能够较好地拟合柚子白皮果胶对  $\text{NO}_2^-$  的吸附过程; 红外光谱分析表明, O—H 以及 C=O(羧酸和/或酯)等基团参与了果胶吸附  $\text{NO}_2^-$  的反应.

**关键词:** 亚硝酸根; 柚皮果胶; 模拟胃环境; 吸附动力学; 红外分析

**中图分类号:** TS201.2; Q944

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1673-9868(2018)12-0065-08

果胶是由多缩半乳糖醛酸甲酯通过  $\beta$ -1, 4 糖苷键与钙、镁结合成的天然高分子化合物, 主要存在于果皮中, 在食品工业中应用广泛, 也是医药和化妆品重要的生产辅料<sup>[1-5]</sup>. 硝酸盐( $\text{NO}_3^-$ )和亚硝酸盐( $\text{NO}_2^-$ )是引起人们食物中毒的常见物质, 亚硝基化合物中的  $\text{NO}_2^-$  能与食品中存在的仲胺、叔胺发生一系列反应, 形成能够导致癌变的亚硝胺<sup>[6]</sup>. 据研究, 膳食纤维对体内的  $\text{NO}_2^-$  有一定的吸附能力, 能防止胃癌、心脏病等一些疾病的发生<sup>[7-11]</sup>, 其中, 麦麸、米糠膳食纤维对  $\text{NO}_2^-$  的体外吸附效果明显. 而果胶作为水溶性膳食纤维, 近年来已有学者利用果胶吸附去除水体中  $\text{Pb}^{2+}$ ,  $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Hg}^{2+}$  等离子<sup>[12-16]</sup>, 但对果胶吸附  $\text{NO}_2^-$  的研究尚无报道. 本实验基于果胶的凝胶、吸附等特性, 拟在模拟胃环境下研究柚子白皮果胶对  $\text{NO}_2^-$  的吸附动力学特性, 确定果胶对  $\text{NO}_2^-$  的吸附性能, 为开发  $\text{NO}_2^-$  体内清除剂提供新思路.

## 1 材料与方法

### 1.1 实验材料

柚子皮, 由漳州市平和县蜜柚种植基地提供; 市售果胶, 上海阿拉丁生物科技股份有限公司.

### 1.2 仪器和设备

HQY-C 型恒温振荡摇床, 金坛市鸿科仪器厂; UV-1100 紫外分光光度计, 上海美谱达仪器有限公司;

① 收稿日期: 2018-05-15

基金项目: 福建省自然科学基金高校联合资助面上项目(2017J01642); 福建省教育厅中青年教育科研项目(JAT170355); 闽南师范大学杰出青年科研人才项目(MJ1602).

作者简介: 庄远红(1981-), 女, 讲师, 硕士, 主要从事功能性食品开发与质量安全的研究.

AR124W 电子天平, 奥豪斯仪器(上海)有限公司; 80-2 电动离心机, 金坛市科析仪器有限公司; NICOLET iS 10 型傅里叶红外分光光度计, 美国赛默飞世尔公司; EL20 型 pH 计, 梅特勒-托利多仪器上海有限公司; DUG-9030A 干燥箱, 上海精宏实验设备有限公司; JHBE-50S 闪式提取器, 西安太康生物科技有限公司; RE-301 旋转蒸发器, 巩义市予华仪器有限责任公司; RE-301 恒温水油浴锅, 巩义市予华仪器有限责任公司; RE-52AA 旋转蒸发器, 上海亚荣生化仪器厂; SHB-III 循环水式多用真空泵, 郑州长城科工贸有限公司; HH-2 数显恒温水浴锅, 金坛市科析仪器有限公司; EG323LC8-NS 微波炉, 广东美的电器股份有限公司; 手持式折光仪, 上海光学仪器厂; FW-100 高速万能粉碎机, 天津市泰斯特仪器有限公司。

### 1.3 实验方法

#### 1.3.1 柚子白果皮果胶的制备

新鲜柚皮, 去除黄色表皮, 将柚子白皮剪成 3~4 mm 大小, 按液料比 15:1 (mL/g) 加入去离子水, 设置闪式提取器电压 100 V, 闪式破碎 60 s, 用 HCl(1+1) 调节酸解液 pH 值至 1.5, 微波加热至微沸, 置于 80 °C 下回流提取 30 min 后, 趁热用 300 目滤布抽滤, 将滤液以 75 °C, 70 r/min 旋转蒸发浓缩至折光率为 5%, 冷却, 用稀氨水调节浓缩液 pH 值至 4.5, 在不断搅拌下加入 2 倍体积的 95% 乙醇, 放置 12 h 使之沉淀, 用 300 目滤布双层抽滤, 除去乙醇后, 再用乙醇洗涤 2 次, 抽滤, 加入 2 倍体积蒸馏水加热溶解, 浓缩至折光率为 5%, 冷却, -18 °C 预冻, 70 Pa 条件下真空冷冻干燥(加热板温度 40 °C), 得果胶(半乳糖醛酸质量分数 78.7%, 酯化度 77.4%), 粉碎后备用<sup>[17]</sup>。

#### 1.3.2 模拟胃液的制备

取 3.2 g 胃蛋白酶和 2.0 g 的固体 NaCl 溶于 1 000 mL 去离子水中, 用浓 HCl 调节至一定 pH 值, 制成模拟胃液<sup>[18]</sup>。

#### 1.3.3 实验设计

##### 1.3.3.1 NO<sub>2</sub><sup>-</sup> 初始质量浓度、吸附时间对吸附效果的影响

柚皮果胶添加量为 0.4 g/L, 设置模拟胃液中 NO<sub>2</sub><sup>-</sup> 质量浓度分别为 5 mg/L, 10 mg/L, 15 mg/L, 20 mg/L, 25 mg/L, 30 mg/L, pH 值调节至 2, 设置吸附时间分别为 10 min, 20 min, 40 min, 60 min, 80 min, 100 min, 120 min, 150 min, 180 min, 210 min, 240 min, 300 min, 360 min, 420 min, 480 min, 测定柚子白果皮果胶对 NO<sub>2</sub><sup>-</sup> 的吸附量和去除率。

##### 1.3.3.2 pH 值对果胶吸附 NO<sub>2</sub><sup>-</sup> 效果的影响

柚皮果胶添加量为 0.4 g/L, 模拟胃液 NO<sub>2</sub><sup>-</sup> 质量浓度为 30 mg/L, 调节 pH 值分别为 1, 1.5, 2, 2.5, 3, 吸附时间 420 min, 测定柚子白果皮果胶对 NO<sub>2</sub><sup>-</sup> 的吸附量和去除率。

##### 1.3.3.3 柚皮果胶添加量对 NO<sub>2</sub><sup>-</sup> 吸附效果的影响

设置柚皮果胶添加量分别为 0.2 g/L, 0.4 g/L, 0.6 g/L, 0.8 g/L, 1.0 g/L, 模拟胃液 NO<sub>2</sub><sup>-</sup> 质量浓度为 30 mg/L, pH 值调节至 1.5, 吸附时间 420 min, 测定柚皮果胶对 NO<sub>2</sub><sup>-</sup> 的吸附量和去除率。

##### 1.3.3.4 柚皮果胶和市售果胶对 NO<sub>2</sub><sup>-</sup> 吸附效果的影响

柚子白果皮果胶和市售果胶添加量为 0.8 g/L, NO<sub>2</sub><sup>-</sup> 质量浓度为 30 mg/L, pH 值调节至 1.5, 吸附时间 420 min, 测定柚皮果胶和市售果胶对 NO<sub>2</sub><sup>-</sup> 的吸附量和去除率。

#### 1.3.4 测定方法

取柚子白果皮果胶, 按一定液料比加入含一定质量浓度 NO<sub>2</sub><sup>-</sup> 的不同 pH 模拟胃液中, 于 37 °C 环境中模拟人体胃的蠕动, 以 100 r/min 恒温振荡使其吸附一定时间后, 于 4 000 r/min 离心 10 min, 上清液采用盐酸萘乙二胺法<sup>[19-20]</sup>测 NO<sub>2</sub><sup>-</sup> 残留量, 计算吸附量(式 1)和去除率(式 2), 计算公式<sup>[21]</sup>如下:  
吸附量:

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

去除率:

$$\vartheta = \frac{C_0 - C_e}{C_0} \times 100\% \quad (2)$$

式中,  $q$  为吸附量,  $\text{mg/g}$ ;  $\vartheta$  为去除率,  $\%$ ;  $C_0$  为吸附前的  $\text{NO}_2^-$  质量浓度,  $\text{mg/L}$ ;  $C_e$  为吸附后的  $\text{NO}_2^-$  质量浓度,  $\text{mg/L}$ ;  $V$  为  $\text{NO}_2^-$  溶液体积,  $\text{L}$ ;  $m$  为果胶添加量,  $\text{g}$ .

### 1.3.5 果胶吸附前后的红外测定

将柚子白皮果胶和市售果胶按照最佳条件进行吸附后, 加入 2 倍体积无水乙醇沉淀 12 h, 抽滤, 干燥后, 进行红外光谱分析, 测试条件: 波数范围  $4\ 000 \sim 500\ \text{cm}^{-1}$  中红外, 扫描次数为 15, 分辨率  $4\ \text{cm}^{-1}$ , DTGS 检测器.

## 2 结果与分析

### 2.1 $\text{NO}_2^-$ 初始质量浓度、吸附时间对吸附效果的影响

柚子白皮果胶对  $\text{NO}_2^-$  的吸附量和去除率如图 1、图 2. 由图可知, 模拟胃环境下,  $\text{NO}_2^-$  初始质量浓度一定时, 柚子白皮果胶对  $\text{NO}_2^-$  的吸附量和去除率均随着吸附时间的延长而显著增加, 吸附 420 min 后, 果胶对  $\text{NO}_2^-$  的吸附量和去除率趋于平缓并达到吸附平衡; 同时, 随着  $\text{NO}_2^-$  初始质量浓度的增大, 柚子白皮果胶对  $\text{NO}_2^-$  的吸附量逐渐增大, 去除率逐渐降低, 当  $\text{NO}_2^-$  初始质量浓度为  $5\ \text{mg/L}$  时, 平衡吸附量为  $9.3\ \text{mg/g}$ , 去除率为  $94.1\%$ , 而当  $\text{NO}_2^-$  初始质量浓度为  $30\ \text{mg/L}$  时, 平衡吸附量为  $46.1\ \text{mg/g}$ , 去除率仅为  $72.1\%$ . 由此可知,  $\text{NO}_2^-$  初始质量浓度越大, 柚子白皮果胶对  $\text{NO}_2^-$  的平衡吸附量越大, 去除率越低. WTO/FAO 规定人体  $\text{NO}_2^-$  的日允许摄入量为  $4\ \text{mg/kg}^{[22]}$ , 经过换算接近于  $30\ \text{mg/L}$ , 因而选择此浓度为最佳初始质量浓度.

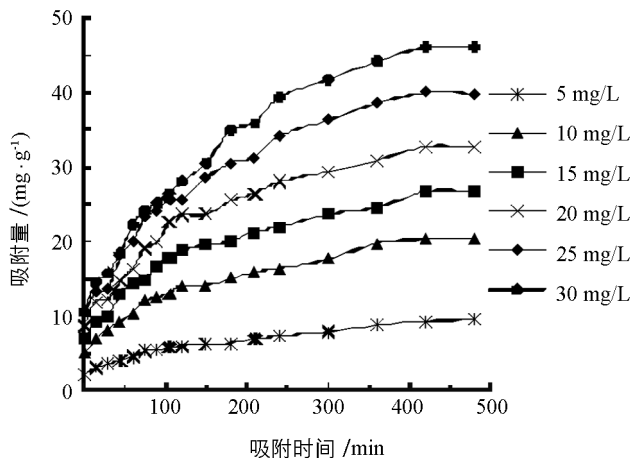


图 1 初始质量浓度、吸附时间对  $\text{NO}_2^-$  吸附量的影响

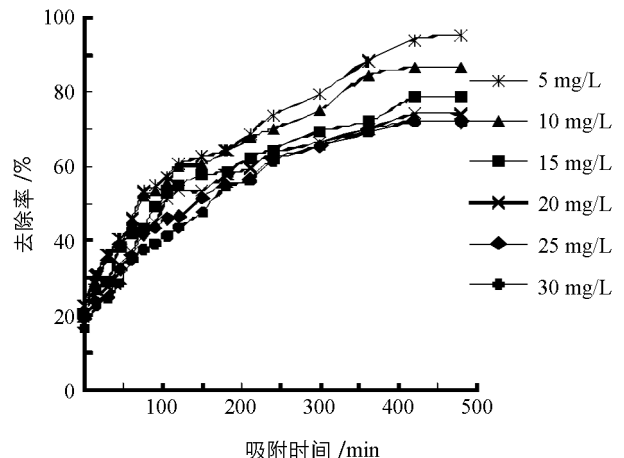


图 2 初始质量浓度、吸附时间对  $\text{NO}_2^-$  去除率的影响

### 2.2 pH 值对果胶吸附 $\text{NO}_2^-$ 效果的影响

由图 3 可知, 吸附环境酸性越强, 柚子白皮果胶对  $\text{NO}_2^-$  的吸附量越大, 去除率越高. 当 pH 值从 1 增大到 1.5 时, 柚皮果胶对  $\text{NO}_2^-$  的吸附量和去除率缓慢下降, 当模拟胃环境 pH 值大于 1.5, 随着 pH 值的逐渐增大, 柚皮果胶对  $\text{NO}_2^-$  的吸附量和去除率急速下降. pH 值为 1 时, 柚皮果胶对  $\text{NO}_2^-$  的吸附量为  $28.6\ \text{mg/g}$ , 去除率为  $54.9\%$ ; pH 值为 1.5 时, 吸附量为  $27.9\ \text{mg/g}$ , 去除率为  $53.2\%$ ; pH 值为 3 时, 吸附量仅为  $8.55\ \text{mg/g}$ , 去除率仅为  $15.0\%$ . 由此可知, 反应体系的 pH 值对柚皮果胶吸附  $\text{NO}_2^-$  的影响较大, pH 值越低吸附效果越好, pH 值为 1.5 时柚子白皮果胶模拟胃环境下对  $\text{NO}_2^-$  的吸附量和去除率较高, 也较接近真实胃环境 pH 值.

### 2.3 柚皮果胶添加量对 $\text{NO}_2^-$ 吸附效果的影响

柚皮果胶对  $\text{NO}_2^-$  的吸附量迅速降低, 去除率急剧升高, 当柚皮果胶添加量大于  $0.8 \text{ g/L}$ , 去除率达到最大并趋于稳定(图 4).  $0.2 \text{ g/L}$  柚皮果胶对  $\text{NO}_2^-$  的吸附量为  $65.1 \text{ mg/g}$ , 去除率为  $57.3\%$ ; 而  $0.8 \text{ g/L}$  柚皮果胶对  $\text{NO}_2^-$  吸附量为  $16.4 \text{ mg/g}$ , 去除率为  $58.6\%$ ; 果胶的添加量增加到  $1 \text{ g/L}$  时, 吸附量仅为  $12.5 \text{ mg/g}$ , 去除率同为  $58.6\%$ , 说明增加柚皮果胶添加量, 吸附活性位点增加,  $\text{NO}_2^-$  去除率增大, 但单位体积柚皮果胶对  $\text{NO}_2^-$  的吸附量降低. 果胶添加量为  $0.8 \text{ g/L}$  时, 柚子白皮果胶对  $\text{NO}_2^-$  的去除率最高.

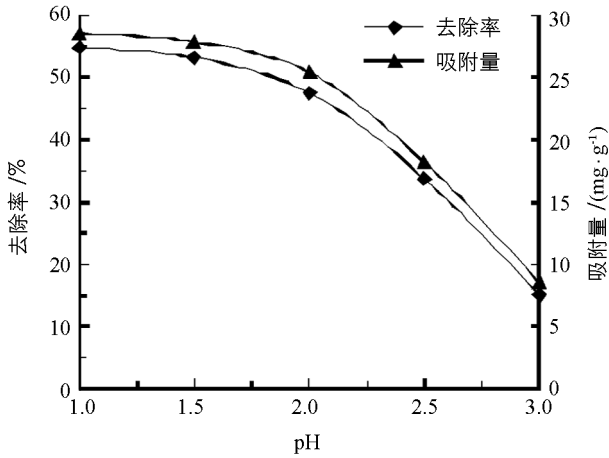


图 3 pH 对果胶吸附  $\text{NO}_2^-$  效果的影响

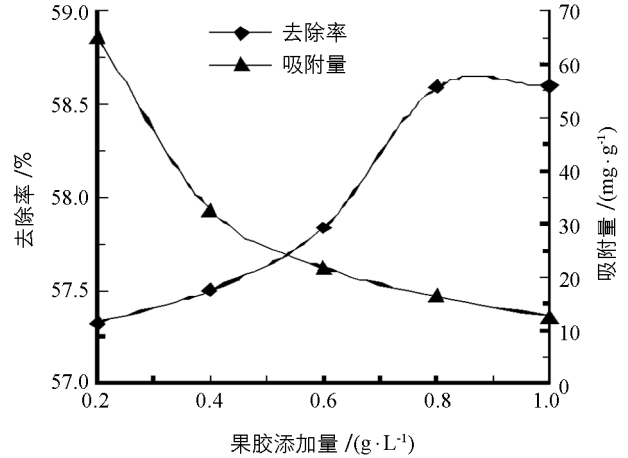


图 4 柚皮果胶添加量对  $\text{NO}_2^-$  吸附效果的影响

### 2.4 柚皮果胶和市售果胶对 $\text{NO}_2^-$ 吸附效果的影响

由表 1 可知, 柚皮果胶与市售果胶对  $\text{NO}_2^-$  吸附量和去除率相当, 由此可知, 从柚子白皮提取的果胶对  $\text{NO}_2^-$  的吸附效果与市售果胶近似相等, 产品质量可靠.

表 1 柚皮果胶和市售果胶对  $\text{NO}_2^-$  吸附效果的影响

	柚皮果胶	市售果胶
去除率/%	$56.21 \pm 1.23$	$56.42 \pm 0.70$
吸附量/( $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ )	$17.65 \pm 0.51$	$17.79 \pm 0.16$

### 2.5 柚子白皮果胶对 $\text{NO}_2^-$ 的吸附动力学

#### 2.5.1 吸附动力学方程

柚皮果胶对  $\text{NO}_2^-$  的吸附动力学可用 Lagergren 准一级动力学模型、准二级动力学模型、颗粒内扩散模型、Elovich 模型和 Bangham 模型进行拟合, 并通过线性拟合参数进行描述. 各模型方程如下<sup>[23-24]</sup>:

准一级动力学模型:

$$\ln(q_e - q_t) = \ln q_e - K_1 t \quad (3)$$

准二级动力学模型:

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{K_2 q_e^2} + \frac{t}{q_e} \quad (4)$$

颗粒内扩散模型:

$$q_t = K_1 t^{\frac{1}{2}} + C \quad (5)$$

Elovich 模型:

$$q_t = \frac{\ln(1 + abt)}{b}$$

当  $abt \gg 1$  时, 令

$$A = \frac{\ln(ab)}{b} \quad K_t = \frac{1}{b}$$

则得到 Elovich 方程的线性形式为

$$q_t = A + K_t \ln t \quad (6)$$

Bangham 模型:

$$\ln\left(\ln\left(\frac{q_e}{q_e - q_t}\right)\right) = \ln K_0 + \alpha \ln t \quad (7)$$

式中,  $q_e$  为平衡吸附量, mg/g;  $q_t$  为  $t$  时刻的吸附量, mg/g;  $K_1$  为准一级吸附速率常数<sup>[23]</sup>;  $K_2$  为准二级吸附速率常数;  $K_t$  为颗粒内扩散速率常数;  $C$  为颗粒内扩散方程常数<sup>[24]</sup>;  $a$  为常数;  $b$  为速率常数;  $K_0$  为吸附速率常数;  $\alpha$  为常数.

### 2.5.2 柚子白皮果胶对 $\text{NO}_2^-$ 的吸附动力学分析

分别利用上述 5 种动力学模型对果胶吸附  $\text{NO}_2^-$  的实验数据进行拟合, 再对拟合所得曲线进行线性回归分析, 求出各个模型的动力学参数及线性相关系数  $R^2$  (表 2).

表 2 柚子白皮果胶吸附  $\text{NO}_2^-$  的动力学模型拟合参数

$\text{NO}_2^-$ 浓度/ ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	$q_e$ 实测值/ ( $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ )	准一级动力学模型			准二级动力学模型			Elovich 模型		
		$R^2$	$q_e$	$K_1$	$R^2$	$q_e$	$K_2$	$R^2$	$A$	$K_t$
5	9.315	0.933 8	6.653	0.316 3	0.958 7	9.681	0.103 4	0.913 9	23.171	0.505
10	20.243	0.904 3	15.576	0.424 6	0.970 5	21.322	0.052 2	0.944 7	57.272	0.232
15	26.738	0.982 2	19.074	0.383 1	0.941 1	27.473	0.041 1	0.958 4	78.368	0.177
20	32.696	0.988 6	24.452	0.430 2	0.977 8	34.722	0.033 0	0.947 9	92.413	0.141
25	39.968	0.975 2	33.529	0.476 2	0.971 3	43.290	0.023 2	0.906 5	108.847	0.119
30	46.065	0.973 7	42.347	0.488 1	0.957 6	51.020	0.016 5	0.921 7	93.379	0.092

$\text{NO}_2^-$ 浓度/ ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	$q_e$ 实测值/ ( $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ )	Bangham 模型			颗粒内扩散模型		
		$R^2$	$\alpha$	$K_0$	$R^2$	$C$	$K_t$
5	9.315	0.920 4	0.253	0.606	0.990 0	1.943	2.705
10	20.243	0.902 4	0.261	0.628	0.983 5	4.803	5.847
15	26.738	0.959 3	0.252	0.631	0.976 5	6.710	7.553
20	32.696	0.931 9	0.262	0.634	0.969 8	8.054	9.472
25	39.968	0.914 6	0.279	0.617	0.975 4	8.749	11.950
30	46.065	0.906 2	0.290	0.594	0.981 1	7.932	14.481

由表 2 可知, 果胶吸附  $\text{NO}_2^-$  的颗粒内扩散模型  $R^2$  在 0.969 8~0.990 0 之间, 其线性相关系数较高, 说明颗粒内扩散模型能够较好地拟合柚子白皮果胶对  $\text{NO}_2^-$  的吸附过程, 吸附前期  $\text{NO}_2^-$  向果胶外表面扩散, 吸附中后期为  $\text{NO}_2^-$  的内扩散, 果胶孔隙中的溶液扩散和孔隙内表面的二维扩散过程随吸附反应的进行逐渐达到吸附平衡<sup>[21,25-26]</sup>;  $\text{NO}_2^-$  初始质量浓度越大,  $C$  值越大, 果胶边界层厚度对  $\text{NO}_2^-$  吸附效果的影响也越大;  $K_t$  与  $C$  越大, 说明果胶吸附  $\text{NO}_2^-$  的速率越快, 吸附越容易达到平衡.

### 2.6 $\text{NO}_2^-$ 吸附前后柚子白皮果胶与市售果胶的红外光谱分析

图 5 反映了柚子白皮果胶与市售果胶在吸附  $\text{NO}_2^-$  前后的红外光谱变化. 由图 5 可以看出, 柚子白皮果胶与市售果胶的功能基团基本一致. 其中在  $3\ 430\ \text{cm}^{-1}$  附近较宽的吸收峰为 O—H 以及  $-\text{NH}_2$  的伸缩振动峰,  $2\ 940\ \text{cm}^{-1}$  附近为  $-\text{CH}_2$  的伸缩振动,  $1\ 750\ \text{cm}^{-1}$  为典型的羰基 C=O 伸缩振动峰, 这可

能是果胶中的羧酸或酯引起的,  $1\ 650\ \text{cm}^{-1}$  处吸收峰位于“酰胺 I 带”, 是果胶中乙酰氨基的  $\text{C}=\text{O}$  对称伸缩振动引起的;  $1\ 100\sim 1\ 000\ \text{cm}^{-1}$  间的吸收峰是由  $\text{C}-\text{O}-\text{H}$  和糖环  $\text{C}-\text{O}-\text{C}$  的  $\text{C}-\text{O}$  伸缩振动引起的. 吸附  $\text{NO}_2^-$  后, 柚子白皮果胶与市售果胶在  $3\ 430\ \text{cm}^{-1}$  处吸收峰均发生了明显位移, 这可能是由于  $\text{O}-\text{H}$  与  $\text{NO}_2^-$  结合后, 吸收峰向低波长方向移动; 另外, 从图中可以观察到, 吸附  $\text{NO}_2^-$  后, 柚子白皮果胶在  $1\ 750\ \text{cm}^{-1}$  处的羰基吸收峰发生位移, 表明果胶中的羧酸和/或酯也参与了对  $\text{NO}_2^-$  的吸附; 而市售果胶乙酰氨基的  $\text{C}=\text{O}$  伸缩振动峰的相对强度发生显著变化, 这意味着羧酸和/或酯与  $\text{NO}_2^-$  结合后发生了氨基化现象, 同时也表明柚子白皮果胶与市售果胶的分子组成基本一致, 但具体的成分仍然略有区别<sup>[27-29]</sup>.

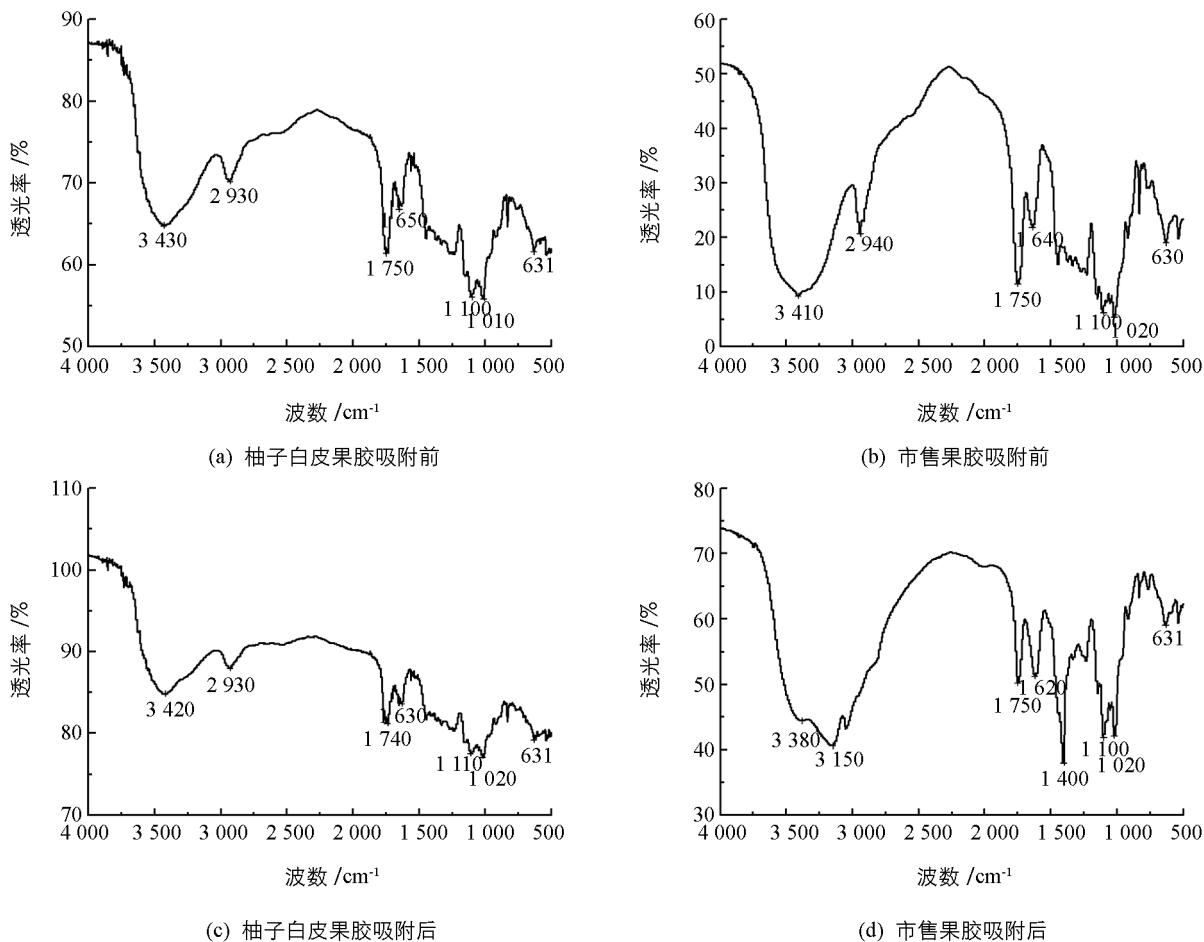


图 5  $\text{NO}_2^-$  吸附前后柚子白皮果胶与市售果胶的红外光谱图

### 3 结 论

1) 柚子白皮果胶对  $\text{NO}_2^-$  的吸附性能受果胶添加量、 $\text{NO}_2^-$  浓度、模拟胃环境 pH 值、吸附时间等因素的影响; 柚皮果胶添加量与  $\text{NO}_2^-$  的单位吸附量呈负相关, 而吸附时间、 $\text{NO}_2^-$  的浓度、模拟胃环境的 pH 值与  $\text{NO}_2^-$  的单位吸附量则呈正相关; 当果胶添加量为  $0.8\ \text{g/L}$ , pH 值为  $1.5$ ,  $\text{NO}_2^-$  质量浓度为  $30\ \text{mg/L}$ , 吸附时间为  $420\ \text{min}$  时, 果胶对  $\text{NO}_2^-$  的去除率达到  $56.21\%$ , 吸附量达  $17.65\ \text{mg/g}$ .

2) 采用准一级动力学模型、准二级动力学模型、Evolich 模型、Bangham 模型、颗粒内扩散模型分别对柚皮果胶吸附  $\text{NO}_2^-$  的数据进行拟合, 发现颗粒内扩散模型能够较好地拟合柚子白皮果胶对  $\text{NO}_2^-$  的吸附过程,  $\text{NO}_2^-$  初始质量浓度越大,  $C$  值越大, 果胶边界层厚度对  $\text{NO}_2^-$  吸附效果的影响也越大;  $Kt$  与  $C$  的值越大, 说明果胶吸附  $\text{NO}_2^-$  的速率越快, 吸附越容易达到平衡.

3) 柚子白皮果胶和市售果胶吸附  $\text{NO}_2^-$  前后在  $3\ 400\ \text{cm}^{-1}$ ,  $1\ 750\ \text{cm}^{-1}$ ,  $1\ 650\ \text{cm}^{-1}$  处的吸收峰发生了明显的偏移和强度的变化, 说明吸附前后柚皮果胶和市售果胶的功能基团基本相似, 羟基、羰基(羧酸和/或酯)等基团参与了果胶吸附  $\text{NO}_2^-$  的反应。

### 参考文献:

- [1] 王雅婷. 籽瓜皮中果胶的提取及纯化技术研究 [D]. 石河子: 石河子大学, 2013.
- [2] 孙彦妮. 葡萄皮果胶的提取及在制剂中的应用 [D]. 青岛: 青岛科技大学, 2018.
- [3] 汪多仁. 果胶的开发与应用进展 [J]. 饮料工业, 2011, 14(11): 8-13.
- [4] 谢峰, 王碧, 刘义武, 等. 一种利用酶法从柠檬皮渣中提取果胶的方法: CN103232555A [P]. 2013.
- [5] 孙宝国. 食品添加剂 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2013.
- [6] 李来好, 杨贤庆, 戚勃. 4 种海藻膳食纤维对  $\text{NO}_2^-$  吸附作用的研究 [J]. 中国海洋药物, 2006, 25(1): 28-31.
- [7] 庄远红, 林娇芬, 刘静娜. 微粉碎对香蕉皮可溶性膳食纤维功能特性的影响 [J]. 四川农业大学学报, 2015, 33(3): 289-293.
- [8] 杨青松, 武阳, 王白娟, 等. 红雪茶渣水不溶性膳食纤维的提取及其特性 [J]. 食品工业, 2017, 38(6): 12-15.
- [9] 罗非君, 聂莹. 膳食纤维抗癌作用及其分子机理的研究进展 [J]. 食品与生物技术学报, 2015, 34(12): 1233-1238.
- [10] 汪平权. 豆渣及其膳食纤维和蛋白质对 T2DM 胰岛素抵抗预防作用的研究 [D]. 武汉: 华中农业大学, 2015.
- [11] 李铭, 陈晓麟, 王利. 野生木瓜营养成分及其对  $\text{NO}_2^-$  消除能力的比较研究 [J]. 西南师范大学学报(自然科学版), 1998, 23(3): 355-357.
- [12] DEBBAUDT A, ZALBA M, FERREIRA M L, et al. Theoretical and Experimental Study of  $\text{Pb}^{2+}$  and  $\text{Hg}^{2+}$  Adsorption on Biopolymers, 2. Experimental Part [J]. Macromolecular Bioscience, 2001, 1(6): 249-257.
- [13] 赵艳, 李凤亭, 鲁敏. 果胶在水处理中的研究进展 [J]. 环境保护科学, 2006, 32(2): 19-21, 24.
- [14] SCHIEWER S, PATIL S B. Pectin-Rich Fruit Wastes as Biosorbents for Heavy Metal Removal: Equilibrium and Kinetics [J]. Bioresource Technology, 2008, 99(6): 1896-1903.
- [15] 王喜洋. 果胶修饰的磁性纳米材料吸附剂的制备及其去除重金属的研究 [D]. 长沙: 湖南大学, 2012.
- [16] 王春香, 杨鲲, 李玉静, 等. 改性果胶絮凝剂对废水中油脂和  $\text{Cr(VI)}$  的去除 [J]. 西南师范大学学报(自然科学版), 2014, 39(1): 20-27.
- [17] 张秀芳, 王克冰, 贺文英, 等. 柚子皮中果胶的提取工艺研究 [J]. 内蒙古农业大学学报(自然科学版), 2012, 33(2): 245-248.
- [18] 陈雪, 刘秀红, 张东杰, 等. 体外模拟胃环境法优先排铅功能饮料配方的研制 [J]. 黑龙江八一农垦大学学报, 2010, 22(4): 80-84.
- [19] 牛广财, 朱丹, 肖盾, 等. 沙果膳食纤维对胆固醇和亚硝酸根离子吸附作用的研究 [J]. 中国酿造, 2011, 30(9): 47-50.
- [20] 王秀丽, 李海云. 白果壳水不溶性膳食纤维对  $\text{NO}_2^-$  的吸附作用 [J]. 桂林工学院学报, 2006, 26(4): 559-561.
- [21] 孙哲, 全凤玉, 徐文, 等. 海藻酸纤维对碱性染料 T 的吸附动力学研究 [J]. 广州化工, 2012, 40(3): 7-9.
- [22] 赵静, 王娜, 冯叙桥, 等. 蔬菜中硝酸盐和亚硝酸盐检测方法的研究进展 [J]. 食品科学, 2014, 35(8): 42-49.
- [23] KUMAR V, POOJA GUPTA A, NIGAM K D P, et al. Fluid Flow and Heat Transfer in Curved Tubes with Temperature-Dependent Properties [J]. Industrial and Engineering Chemistry Research, 2007, 46(10): 3226-3236.
- [24] AGERWAL S K, RAO M R. Heat Transfer Augmentation for the Flow of a Viscous Liquid in Circular Tubes Using Twisted Tape Inserts [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1996, 39(17): 3547-3557.
- [25] AKSU Z. Determination of the Equilibrium, Kinetic and Thermodynamic Parameters of the Batch Biosorption of Nickel (II) Ions Onto *Chlorella Vulgaris* [J]. Process Biochem, 2002, 38(1): 89-99.
- [26] JANOS P, MICHALEK P, TUREK L. Sorption of Ionic Dyes Onto Untreated Low-Rank Coal-Oxihumolite: A Kinetic Study [J]. Dyes and Pigments, 2007, 74(2): 363-370.

- [27] 李会端. 具有开放骨架双核锌羧酸配合物的设计合成与结构表征 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2017, 39(11): 102—106.
- [28] 徐贵钰, 孙全文, 陈媛娟. 有机改性累托石制备及其对  $\text{NH}_4^+$  的吸附研究 [J]. 西南师范大学学报(自然科学版), 2016, 41(7): 74—78.
- [29] 赵 巍, 刘 凡, 冯雄汉, 等. 水钠锰矿吸附  $\text{Pb}^{2+}$  亚结构变化的红外光谱研究 [J]. 地球化学, 2011, 40(1): 99—107.

## Adsorption Kinetics of Pectin from Pomelo Peel on Nitrite in a Simulated Gastric Environment

ZHUANG Yuan-hong<sup>1</sup>, LIU Jing-na<sup>1</sup>, FEI Peng<sup>1</sup>, PANG Jie<sup>2</sup>

1. College of Biological Science and Technology, Minnan Normal University, Zhangzhou, Fujian 363000, China;

2. College of Food Science, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China

**Abstract:** In this study, pectin was extracted from pomelo peel, and the adsorption effect of pectin on  $\text{NO}_2^-$  was investigated, followed by a dynamic analysis in an environment of human stomach simulation. Then an infrared spectrometer was used to characterize the adsorption sites on pomelo peel pectin, with commercial pectin as the control. The results indicated that the adsorption of  $\text{NO}_2^-$  by the white pomelo peel pectin was related to pH of the simulated gastric environment, initial mass concentration of  $\text{NO}_2^-$ , adsorption time and adsorbent dosage of pectin. An adsorption equilibrium was reached when the adsorbent dosage of pectin was 0.8 g/L, pH of the gastric juice was 1.5, and the initial mass concentration of  $\text{NO}_2^-$  was 30 mg/L after 420-minute adsorption. Under this optimal circumstance, the adsorption quantity reached 17.65 mg/g, and the removal rate was 56.21%. Kinetic studies showed that the whole adsorption process of white pomelo peel pectin toward  $\text{NO}_2^-$  was well fitted with the intra-particle diffusion model. The infrared spectrum indicated that O—H and C=O (carboxylic acid and/or ester) were involved in the reaction of  $\text{NO}_2^-$  adsorption by pectin.

**Key words:** nitrite ion; pomelo peel pectin; simulated gastric environment; adsorption kinetics; infrared analysis

责任编辑 周仁惠