

当归提取剩余物制备新型膳食纤维及其结构特征的研究

钱 慈^{1,2}, 周益平², 郭 明²

(1. 塔里木大学 生命科学学院, 新疆 阿拉尔 843300; 2. 浙江农林大学 理学院, 浙江 临安 311300)

摘要: 以当归 *Angelica sinensis* 提取残渣为原料制备新型膳食纤维, 对当归膳食纤维 (angelica dietary fibre, ADF) 进行了化学成分测试及产品结构特征和理化性能分析, 开展新型 ADF 吸附胆酸钠的热力学及体外模拟对金属离子吸附率的研究。结果表明: 成功获得了新型 ADF, 其水分含量为 1.32%, 蛋白质质量分数为 5.47%, 粗脂肪质量分数 0.57%, 总灰分质量分数 5.24%, 持水力为 $3.2 \text{ g}\cdot\text{g}^{-1}$, 溶胀力为 $1.3 \text{ mL}\cdot\text{g}^{-1}$, 结合水力为 0.105 g; 结构特征分析表明: ADF 与当归残渣是不同的纤维; ADF 对胆酸钠的最大吸附量为 $40 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$, 其吸附机制符合 Freundlich 模型; 体外模拟条件下 ADF 对无机金属离子镍、铜、铅的吸附率分别为 30.18, 17.47 和 21.22 $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 。所得结果可为药用植物膳食纤维研究提供有益借鉴。图 8 表 7 参 26

关键词: 中草药学; 当归膳食纤维; 产品表征; 吸附机制; 吸附率

中图分类号: S567.2; R284 文献标志码: A 文章编号: 2095-0756(2013)04-0552-09

A new dietary fiber and structural feature analysis on *Angelica sinensis* extraction residue

QIAN Ci^{1,2}, ZHOU Yiping², GUO Ming²

(1. College of Life Science, Tarim University, Alaer 843300, Xinjiang, China; 2. School of Sciences, Zhejiang A & F University, Lin'an 311300, Zhejiang, China)

Abstract: A new dietary fiber was prepared by the enzyme-chemical method using the residue of *Angelica sinensis* as the raw material. The chemical composition, structural characteristics, and physical and chemical properties of this new *A. sinensis* dietary fiber (ADF) were determined and analyzed. Next, an adsorption thermodynamic equation was established between the new ADF and sodium cholate, and the adsorption rate of metal ions in vitro being determined. Results showed the new ADF with the following characteristics: ADF moisture content was 1.32%, protein was 5.47%, crude fat was 0.57%, total ash was 5.24%, ADF water holding capacity was $3.2 \text{ g}\cdot\text{g}^{-1}$, swelling property was $1.3 \text{ mL}\cdot\text{g}^{-1}$, and water binding capacity was 0.105 g. The structural feature analysis demonstrated that ADF and the angelica residue were not the same fiber type. Maximum ADF adsorption on sodium cholate was $40 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ with the absorption mode corresponding to the Freundlich model. Also, the ADF adsorption rate for selected inorganic metal ions (in $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$) was nickel was 30.18, copper was 17.47, and lead was 21.22. Thus, this study could provide helpful references for dietary fiber in medicinal plants. [Ch, 8 fig. 7 tab. 26 ref.]

Key words: Chinese herbology; *Angelica sinensis* dietary fiber; product structural characteristics; adsorption mode; adsorption rate

膳食纤维 (dietary fiber, DF), 通常被认为是一类不能被人体消化酶消化, 主要由可食性植物细胞壁残余物 (纤维素、半纤维素、木质素等) 及与之缔合的相关物质组成的化合物^[1]。国内外研究^[2-6]表明: 膳

收稿日期: 2012-07-04; 修回日期: 2013-01-08

基金项目: 浙江省科研创新资助项目 (101109)

作者简介: 钱慈, 从事生物活性物质研究。E-mail: qianci2009@sina.com。通信作者: 郭明, 教授, 博士, 从事活性物质的分子作用机制研究。E-mail: guoming@zafu.edu.cn

膳食纤维具有通便、减肥、调节血糖、降血脂、调节肠道菌群、控制体质量、美容养颜、心脑血管疾病等功效。膳食纤维被认为是与传统六大营养素并列的“第七大营养素”，对维持人体健康具有重要的生理作用。膳食纤维具有的生理功能使其成为营养学、分析化学、食品工程及其他领域的研究热点。诸多学者对不同原料制备膳食纤维进行了广泛研究，其中利用可食性植物纤维制备膳食纤维及相关的研究工作备受关注^[7]。本研究选取当归 *Angelica sinensis* 中提取的膳食纤维，对其进行化学成分、结构表征、理化性能的测定，并用获得的当归膳食纤维 (angelica dietary fibre, ADF) 对胆酸钠吸附热力学及对金属离子吸附率进行探究。目前，当归中提取的膳食纤维对胆酸盐及重金属离子的吸附研究尚未见文献报道。本研究对于膳食纤维理化功效的评价及作用机制的研究等具有重要的现实意义。

1 实验部分

1.1 实验仪器与试剂

AA-6890 型原子吸收分光光度计 (Shimadzu, 日本); UV-265FW 型紫外可见分光光度计 (Shimadzu, 日本); 752N 型紫外可见分光光度计 (Shimadzu, 日本); SS-550 型扫描电子显微镜 (Shimadzu, 日本); RPrestige-21 型傅立叶变换红外光谱仪 (Shimadzu, 日本); SHZ-D(Ⅲ) 循环水式真空泵 (巩义市予华仪器有限责任公司, 中国); DHG-9123A 型电热恒温鼓风干燥箱 (上海一恒科学仪器有限公司, 中国); STA 409PC 同步热分析仪 (Netzsch, 德国); 800 型台式离心机 (常州国华电器有限公司, 中国); AB104-N 型分析天平 (南京安铎贸易有限责任公司, 中国); ZD-2 自动电位滴定仪 (上海雷磁有限公司, 中国)。

胆酸钠 (分析纯, 浙江杭州安耐吉制药有限公司); 硫酸铁铵试剂 (分析纯, 上海华东医药有限公司); 冰醋酸 (分析纯, 上海三鹰化学有限公司); 其他试剂均为分析纯。

1.2 当归膳食纤维 (ADF) 的制备

将当归提取剩余物清洗, 抽滤, 研磨, 过筛, 加入质量分数为 0.4% α -淀粉酶溶液, 65 °C 水解 40 min。热水洗涤数次, 按固液比 1:10 加入 100.0 g·L⁻¹ 氢氧化钠溶液中, 室温下处理一定时间, 水洗至中性。4 000 r·min⁻¹ 离心 10 min, 60 °C 干燥 10 h, 即得当归膳食纤维。

1.3 当归膳食纤维 (ADF) 化学成分的测定

1.3.1 水分含量的测定 采用常压干燥法测水分含量^[8]。5 g ADF 于 105 ~ 110 °C 干燥 24 h, 称量, 按公式(1)计算水分含量。

$$W_1(\%) = \frac{W}{W_0} \times 100\% \quad (1)$$

式(1)中: W_1 为水分含量, W 为样品干质量差, W_0 为样品初质量。

1.3.2 蛋白质质量分数的测定 采用消煮法测蛋白质质量分数。0.3 ~ 0.5 g ADF 和一定体积的浓硫酸振荡, 静置过夜。然后多次加入定量双氧水, 加热并连续消煮, 直至溶液变为澄清, 冷却至室温, 定容至容量瓶。取上述溶液, 稀释 10 倍, 取稀释液 1.00 mL, 加入靛酚蓝溶液, 在紫外分光光度计 625 nm 处比色, 同时做空白试验及绘制氮标液的工作曲线。按公式(2)计算蛋白质质量分数。

$$W_N(\%) = \frac{\rho \times V \times t_s}{m \times 10} \times 100\% \quad (2)$$

式(2)中: W_N 为蛋白质质量分数(%), ρ 为测得显色液中氮的质量浓度 (mg·L⁻¹), V 为显色液体积 (mL), t_s 为稀释倍数, m 为烘干样品质量 (g)。

1.3.3 粗脂肪质量分数的测定 采用索式抽提法测定粗脂肪质量分数。取定量干燥 ADF, 包裹在滤纸包中放入索式抽提器中, 投入稍过量的无水乙醚, 加热, 用无水乙醚对样品进行连续抽提, 反复干燥并称量记录。按公式(3)计算粗脂肪质量分数。

$$d(\%) = \frac{b-c}{b-a} \times 100\% \quad (3)$$

式(3)中: d 为粗脂肪质量分数(%), a 为称量瓶加滤纸包质量 (g), b 为称量瓶加滤纸包和烘干样质量 (g), c 为称量瓶加滤纸包和抽提后烘干残渣质量 (g)。

1.3.4 总灰分质量分数的测定 采用灼烧法测定总灰分质量分数。一定量干燥 ADF 碳化至无烟, 500

℃马福炉中灼烧到灰白色,冷却,称至恒量。按公式(4)计算总灰分质量分数。

$$D(\%) = \frac{m_2 - m_0}{m_1 - m_0} \times 100\% \quad (4)$$

式(4)中: D 为总灰分质量分数(%), m_2 为坩埚的质量(g), m_1 为坩埚和样品的质量(g), m_0 为坩埚和灰分的质量(g)。

1.4 当归膳食纤维(ADF)的结构特征分析

1.4.1 红外光谱分析 取干燥 ADF 与干燥的溴化钾颗粒研磨均匀,取少许混合物进行压片,设置红外波长测量范围 $4\ 000\sim 500\ \text{cm}^{-1}$,将压片后的样品进行红外光谱分析。

1.4.2 扫描电镜分析 将干燥样品置于 SS-550-IC 型溅射仪中,在 15 mA 的电流下喷金 90 s。样品取出后在 SS-550 型扫描电子显微镜下分别观察样品表现形貌变化。

1.4.3 热性能分析 STA-409PC 型同步热分析仪分别对空白试样及 ADF 样品进行热失重(TG)及示差扫描量热分析(DSC)测定。测定条件:氮气氛围(流量为 $25.0\ \text{mL}\cdot\text{min}^{-1}$)升温速度 $10\ \text{℃}\cdot\text{min}^{-1}$,测试温度范围为室温至 $600\ \text{℃}$;样品质量为 $8.0\sim 9.0\ \text{mg}$ 。

1.5 当归膳食纤维(ADF)理化性质的测定^[9]

1.5.1 持水力的测定 精确称取 ADF $1.00\ \text{g}$ 于 $20\ \text{℃}$ 水浸泡 1 h,滤干后称量。按公式(5)计算持水力。

$$\text{持水力} = (\text{样品湿质量} - \text{样品干质量}) / \text{样品干质量} \quad (5)$$

1.5.2 溶胀力测定 $0.1\ \text{g}$ ADF 置于量筒中,加入 $5\ \text{mL}$ 蒸馏水,读取干体积。振荡均匀后室温放置 24 h,读取湿体积。按公式(6)计算溶胀力。

$$\text{溶胀力} = (\text{湿体积} - \text{干体积}) / \text{样品干质量} \quad (6)$$

1.5.3 结合水力测定 将 $0.1\ \text{g}$ ADF 浸泡于 $25\ \text{mL}$ $4\ \text{℃}$ 的蒸馏水中, $4\ 000\ \text{r}\cdot\text{min}^{-1}$ 下离心 1 h,收集残留物置于 G-2 多孔玻璃上静置 1 h 干燥该残留物后称量,两者差值即为所结合的水重量。按公式(7)计算结合水力。

$$\text{结合水} = \text{初质量} - \text{末质量} \quad (7)$$

1.6 当归膳食纤维(ADF)对胆酸盐的吸附热力学

含 $10\ \text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 胰酶的 $200\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的胆酸钠溶液(pH 6.5)为备用液。用备用液配制 10, 30, 50, 70, 90, 110, 130, 140, $150\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的胆酸钠标准液,取胆酸钠标准液 $4\ \text{mL}$ 于玻璃塞试管内,在沸水浴下蒸干,加入 $4\ \text{mL}$ 冰醋酸, $2\ \text{mL}$ 的铁矾显色液,混匀,放置 15 min 后在 $450\ \text{nm}$ 波长下比色,测定吸光度,绘制标准曲线。

在 $50\ \text{mL}$ 锥形瓶中加入 $0.50\ \text{g}$ 用无水乙醇饱和 2 h 后的 ADF,加入 $20\ \text{mL}$ 上述配制的不同质量浓度的胆酸钠标准储备液, $200\ \text{r}\cdot\text{min}^{-1}$ 恒温振荡 6 h。吸附完成后,按以上步骤测定吸光度,在标准曲线上查出相应的胆酸钠溶液质量浓度。

当归膳食纤维对胆酸钠的吸附分别用 Langmuir 或 Freundlich 方程对其进行吸附热力学拟合。

1.7 当归膳食纤维(ADF)对重金属离子的吸附作用^[10-12]

在生理条件($37\ \text{℃}$, pH 7.0)下运用体外模拟 ADF 对铜离子 Cu^{2+} ($1\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$), 铅离子 Pb^{2+} ($1\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$); 镍离子 Ni^{2+} ($1\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$) 无机金属离子混合液的吸附。取上述质量浓度的金属离子反应液及 $2.50\ \text{g}$ 的 ADF,在 $37\ \text{℃}$ 下恒温搅拌数小时,并采用原子吸收法测定混合液中的金属浓度,最后计算 ADF 对重金属的吸附率。

1.8 统计分析

所有测定平行重复多次,采用 Origin 软件进行统计、绘图及分析。

2 结果与讨论

制备的新型 ADF 呈现固体片状,粗糙,粒径不均匀,黄色,无味。

2.1 当归膳食纤维(ADF)化学成分测定

按 1.3 节的实验,实验数据根据公式(1)~(4)进行计算,ADF 的各项化学成分分析结果列于表 1。

表 1 当归膳食纤维各项化学成分测试结果

Table 1 Chemical constitution of angelica dietary fiber

水分含量/%	蛋白质质量分数*/%	粗脂肪质量分数/%	总灰分质量分数/%
1.320 0	0.054 7	0.570 0	5.240 0

说明：*为 ADF 中蛋白质质量分数所用消煮法采用标准曲线法按文献^[13]进行。标准曲线方程为 $y = -0.005 89 + 1.120 14 x$, $R = 0.998 4$, 标准差=0.012 97, $n=7$ 。

2.2 当归膳食纤维(ADF)结构特征分析

当归残渣提取前后化学本质差异较大,但基本组成成分则较相似^[14]。本实验所制备的 ADF 为不溶性的膳食纤维,而对于不溶性的膳食纤维,其主要成分是纤维素^[15]。为了解本实验室制备的 ADF 与提取前的残渣之间的区别,对其进行结构分析。ADF 的结构表征测定可利用红外光谱、电镜扫描测定以及热重分析,以下是各结构特征分析的结果。

2.2.1 当归膳食纤维红外光谱分析 通过红外光谱仪对当归膳食纤维及当归残渣进行测量,实验结果见图 1。由图 1 可见: ADF 的红外图谱在 $3 250 \sim 3 000 \text{ cm}^{-1}$ 之间的谱峰较当归残渣的宽,表示 ADF 中存在的 -OH 较多且伸缩振动较强。在 $1 600 \sim 1 750 \text{ cm}^{-1}$ 之间出现吸收峰,说明 ADF 中存在羰基,而当归残渣中并未出现吸收峰。ADF 除了增加了特征吸收峰羰基外,已有伯醇和仲醇的 C-O 伸缩振动峰 $1 000 \sim 1 200 \text{ cm}^{-1}$ 之间的峰强度也增加了。这些峰强度的增加是由于残渣经处理由长链变成短链,从而导致苷键断裂, -OH 增多,同时由于氧化作用而出现了 $1 600 \sim 1 750 \text{ cm}^{-1}$ 的羰基吸收峰。

2.2.2 当归膳食纤维扫描电镜分析 电镜扫描对当归膳食纤维及纤维素结构进行观察,结果见图 2。

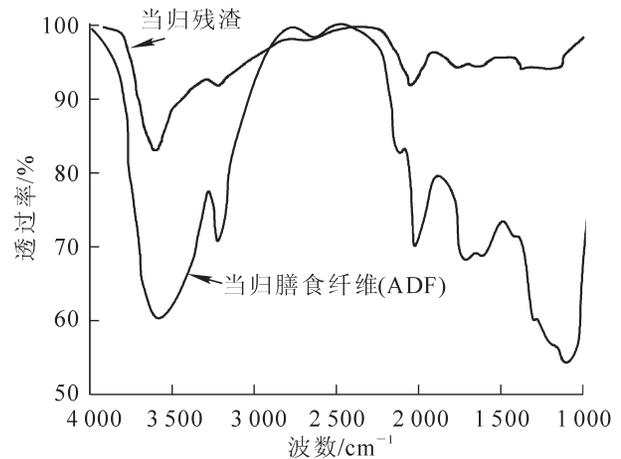
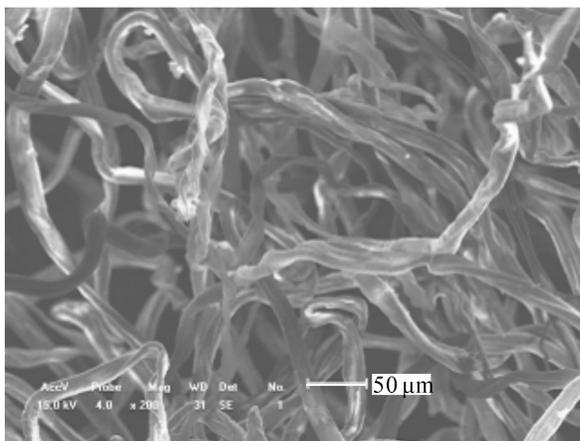
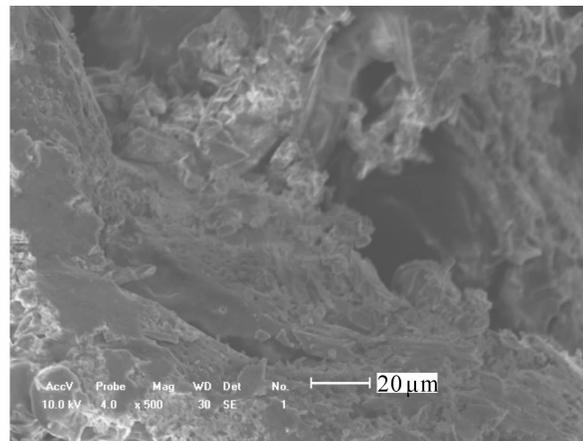


图 1 当归膳食纤维及当归残渣红外光谱图

Figure 1 Curve of IR of angelica dietary fiber and residue of angelica



A.当归膳食纤维(ADF)扫描电镜图



B.当归残渣扫描电镜图

图 2 当归膳食纤维及当归残渣扫描电镜图

Figure 2 SEM of angelica dietary fiber(A) and SEM of residue of angelica(B)

从图 2A 的电镜照片可以发现:当归膳食纤维(ADF)呈现出一条条丝线状结构,间接有空间网络的层状结构。图 2B 所示的当归残渣为紧密结合的块状结构。故 2 个电镜照片可以说明 ADF 与当归残渣是不同的纤维。

2.2.3 当归膳食纤维热性能分析 通过热重仪对当归残渣及当归膳食纤维差示扫描量热法(DSC)与热重

法(TG)进行分析,结果见图3与图4。图3结合表2可知:当归残渣与ADF都是非均相体系,故而会有2个以上的玻璃化温度。当归残渣与ADF的DSC曲线在125~225℃区别较大,可能是因为木质素与半纤维素含量不同引起的。由结果可知:当归残渣的玻璃化温度比ADF的略高。分析可能的原因:结合当归残渣与ADF的电镜图分析结果可知,当归残渣是紧密结合的块状物质,故其交联密度较大则使其玻璃化温度较高。对当归膳食纤维的热重实验分析,得出结果见表3。由图4和表3可知:ADF的TG曲线分为4个阶段:第1阶段,从室温到100℃是失水引起的质量损失;第2阶段,100℃到250℃左右为无定形部分的相变和一些有机分子的热解;第3阶段,250到450℃为晶体的熔融热解和大部分有机分子的热分解;第4阶段,450℃以后为氧化分解阶段。常温下,由于ADF存在众多的羟基,因而在100℃热解过程主要的质量损失为游离水和结晶水。从热解数据分析可以看出:ADF在200℃以下是稳定的,此意味着ADF用作膳食纤维具有较好的热稳定性。

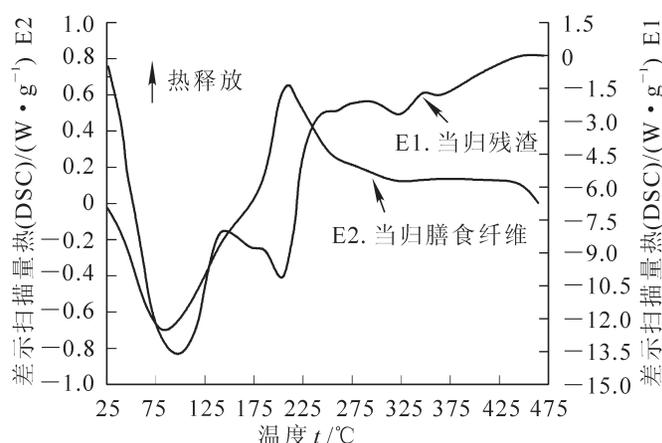


图3 当归膳食纤维及当归残渣的差示扫描量热法曲线

Figure 3 DSC curve of angelica dietary fiber and residue of angelica

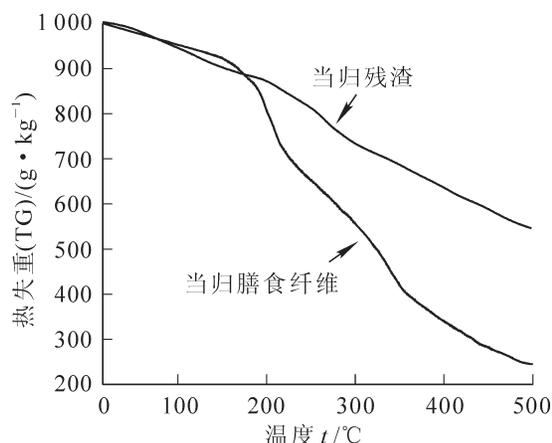


图4 当归膳食纤维及当归残渣的热重法曲线

Figure 4 TG curve of angelica dietary fiber and residue of angelica

表2 当归膳食纤维及当归残渣的热重变化

Table 2 Heat changes of angelica dietary fiber and residue of angelica

样品	热量区间/°C	玻璃化温度 T _g /°C	熔化峰温 T _m /°C	熔化热 Δ _m H/(J·g ⁻¹)	比热变化 ΔC _p /(J·g ⁻¹ ·K ⁻¹)
当归残渣	25.5~130.6	87.5	93.9	139.028 0	5.516
	130.6~182.4	143.1	145.5	-9.111 6	0.269
	182.4~231.1	197.2	202.1	31.781 8	0.474
当归膳食纤维	25.5~150	83.8	84.5	191.194 4	4.364
	188.2~239.9	204.4	208.6	-69.405 8	2.261

表3 当归DF的质量变化

Table 3 Weight changes of angelica dietary fiber

样品	失重范围/°C	质量变化百分比/%	残余质量百分比/%	质量损失变化最快的温度/°C
当归残渣	26.7~122.2	7.02	55.19	80.3
	223.5~290.4	15.14		268.0
当归膳食纤维	179.0~216.8	22.00	24.53	204.5
	314.4~370.3	18.01		341.9

2.3 当归膳食纤维(ADF)理化性质的测定

按1.5节的实验,实验数据根据公式(5)~(7)进行计算。ADF的各项理化性质测定结果为:持水力

(3.2 ± 0.2) g·g⁻¹, 溶胀力(1.3 ± 0.2)mL·g⁻¹, 结合水力(0.105 1 ± 0.010 0)g。

2.4 当归膳食纤维(ADF)对胆酸钠的吸附热力学研究

中药材对胆酸盐的吸附, 最常用的模型为 Langmuir 和 Freundlich 等温式^[16]。Langmuir 方程是从动力学理论推导出的单分子层吸附等温式^[17]。它所表述的是非均匀分布吸附, 并且只是吸附在表面的特定位置, 这叫特异吸附^[18-21]。Freundlich 型吸附等温线是基于吸附剂在多相表面上的吸附建立的经验吸附平衡模式^[22-24]。Langmuir 和 Freundlich 方程分别为^[25]:

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{q_m} \cdot C_e + \frac{1}{K_L q_m} \tag{8}$$

$$\lg q_e = \lg K_F + n \lg C_e \tag{9}$$

式(8)和式(9)中: C_e 为溶液平衡质量浓度, mg·L⁻¹; q_e 为平衡吸附量, μmol·g⁻¹; q_m 为单层最大吸附量, μmol·g⁻¹; K_L 与吸附能有关的常数; n 和 K_F 是 Freundlich 等温方程的特征参数。

胆酸盐吸光度与浓度的标准曲线见图 5。静态吸附模拟实验平衡时所测得的胆酸钠吸光度见表 4。

表 4 胆酸钠吸光度及质量浓度

Table 4 Concentration and absorbance of sodium cholate

胆酸钠初始质量浓度 $C_0 / (\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	平衡时的吸光度	胆酸钠平衡质量浓度 $C_e / (\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	平衡吸附量 $q_e / (\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1})$	C_e / q_e 的数值比值 (10 ³)	$\lg q_e$	$\lg C_e$
30	0.075 1	11.8	23.6	0.654	-1.627	1.072
50	0.148 8	27.4	29.4	0.932	-1.531	1.438
70	0.243 1	44.8	32.7	1.370	-1.485	1.651
90	0.343 9	63.4	34.5	1.842	-1.462	1.802
110	0.451 2	81.2	37.4	2.384	-1.427	1.910
130	0.554 7	100.3	38.6	2.730	-1.413	2.001
140	0.592 1	109.2	40.0	2.990	-1.397	2.038
150	0.646 9	119.3	39.9			

说明: 平衡吸附量 q_e 根据 $q_e = \frac{C_0 - C_e}{a_m}$ 计算^[26], 其中 a_m 可根据平均溶胀力(mL·g⁻¹)的倒数得出 $a_m = 0.77 \times 10^3 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1}$ 。

从图 6 可知: 在胆酸钠初始质量浓度为 140 mg·L⁻¹ 时, ADF 达到了吸附饱和, 故 ADF 对胆酸盐最大吸附量 Q_0 大约为 40 μg·g⁻¹。在胆酸钠初始质量浓度为 140 mg·L⁻¹ 时, ADF 的吸附量未显著增大, 故在进行方程模拟时只采用质量浓度小于 140 mg·L⁻¹ 的数据。

根据 Langmuir 方程, 在特定情况下, $1/q_m$ 和 $1/(K_L \cdot q_m)$ 为定值, 所以变量 C_e/q_e 与 C_e 呈线性关系。

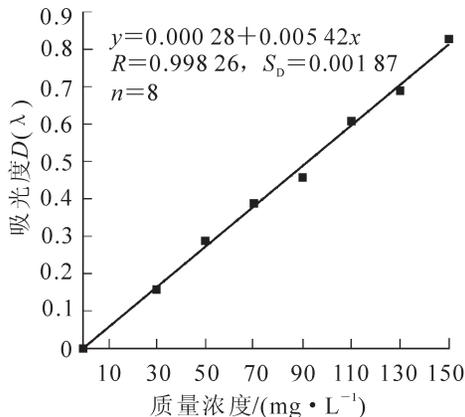


图 5 胆酸盐标准曲线

Figure 5 Standard curve of the concentration of sodium cholate

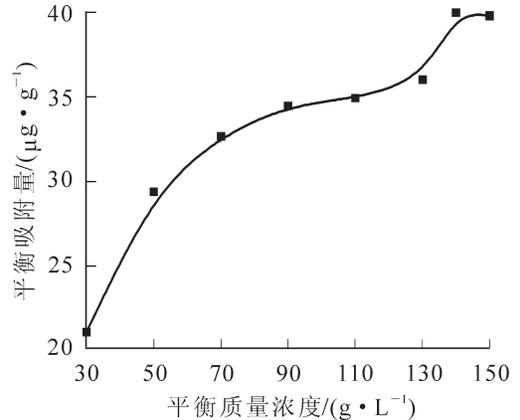


图 6 胆酸钠吸附量与胆酸钠质量浓度关系

Figure 6 Relation between absorptive capacity of Bile salt and concentration of sodium cholate

根据表 5 的数据可以拟合出 Langmuir 线性方程, 结果见图 7。

根据 Freundlich 方程, 其中 K_F 和 n 是 Freundlich 方程的吸附特性常数, 故 $\lg E_e$ 和 $\lg C_e$ 成线性关系。根据表 4 数据可以拟合出 Freundlich 线性方程, 结果见图 8。

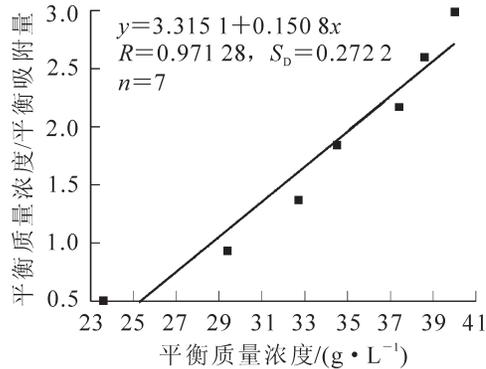


图 7 Langmuir 线性拟合
Figure 7 Langmuir linear-fitting

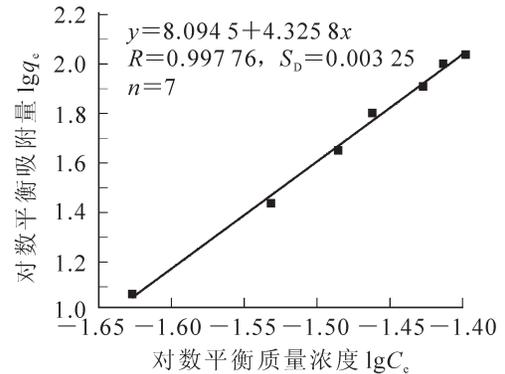


图 8 Freundlich 线性拟合
Figure 8 Freundlich linear-fitting

从表 5 可知: 当归膳食纤维对胆酸盐的吸附更符合 Freundlich 模型, 实验数据与这个模型十分吻合。

2.5 当归膳食纤维 (ADF) 对无机重金属的吸附研究

本研究主要探究了当归膳食纤维 (ADF) 对镍离子 Ni^{2+} , 铜离子 Cu^{2+} , 铅离子 Pb^{2+} 等无机金属离子的吸附率。吸附率按照公式(10)进行计算。

$$\text{吸附率}(\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}) = \frac{100 \times (M_1 - M_2)}{N} \quad (10)$$

式(10)中: 100 为反应总体积(mL), M_1 为离子的初始质量浓度($\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$), M_2 为平衡时测定的质量浓度($\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$); N 为当归膳食纤维的反应量(g)。

原子吸收法测定混合液中金属浓度的标准曲线见表 6。

表 6 镍离子 Ni^{2+} , 铜离子 Cu^{2+} , 铅离子 Pb^{2+} 标准曲线

Table 6 The Standard curve of Ni^{2+} , Cu^{2+} and Pb^{2+}

金属离子	质量浓度范围/($\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$)	标准曲线方程	相关系数 R	样本数	标准差
Ni^{2+}	0~1.00	$y=0.122\ 97+0.085\ 87x$	0.996\ 33	5	0.011\ 347
Cu^{2+}	0~1.00	$y=-0.006\ 54+0.065\ 82x$	0.997\ 39	5	0.004\ 180
Pb^{2+}	0~1.00	$y=0.004\ 67+0.013\ 43x$	0.998\ 95	5	0.001\ 130

当归膳食纤维对镍离子 Ni^{2+} , 铜离子 Cu^{2+} , 铅离子 Pb^{2+} 吸附率的实验结果见表 8。

从表 7 的实验数据结果可知: 在生理条件下(37 °C, pH 7.0), 当归膳食纤维对镍离子 Ni^{2+} 的吸附能力最强, 其次是铅离子 Pb^{2+} , 最后是铜离子 Cu^{2+} 。

3 结论

本研究以当归残渣中提取膳食纤维为研究对象, 测得当归膳食纤维水分占 1.32%, 蛋白质质量分数为 5.47%, 粗脂肪为 0.57%, 总灰分为 5.24%; 通过对当归膳食纤维理化性质测定, 得到其持水力为 $3.2\ \text{g}\cdot\text{g}^{-1}$, 溶胀能力为 $1.3\ \text{mL}\cdot\text{g}^{-1}$, 结合水力为 $0.105\ 1\ \text{g}$ 。根据吸附热力学研究, 测得当归膳食纤维对胆酸盐的吸附符合 Freundlich 模型, 对胆酸钠的最大吸附量为 $40\ \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$, 在生理条件下对重金属镍离子

Ni²⁺, 铜离子 Cu²⁺, 铅离子 Pb²⁺ 的吸附率分别为 30.18, 17.47 和 21.22 mg·g⁻¹。

本研究为开发和充分利用当归药渣中膳食纤维提供了有益的研究基础和理论价值。提取的膳食纤维进一步处理可广

泛应用于制成保健品及食品添加剂, 也可以置换膳食纤维素上的基团而进一步改变膳食纤维素上的基团增强其吸附功效等。

表 7 镍离子 Ni²⁺, 铜离子 Cu²⁺, 铅离子 Pb²⁺ 吸附率实验

Table 7 Adsorption rate of Ni²⁺, Cu²⁺ and Pb²⁺

金属离子	初始质量浓度/(mg·L ⁻¹)	平衡质量浓度/(mg·L ⁻¹)	吸附率/(mg·g ⁻¹)
Ni ²⁺	1.00	0.245 6	30.18
Cu ²⁺	1.00	0.563 3	17.47
Pb ²⁺	1.00	0.469 4	21.22

参考文献:

- [1] ALEIXANDRE A, MIGUEL M. Dietary fiber in the prevention and treatment of metabolic syndrome: a review [J]. *Crit Rev Food Sci Nutr*, 2008, **48**: 905 - 912.
- [2] 刘秀英, 胡怡秀, 马征, 等. 膳食纤维对动物通便效果观察[J]. 现代预防医学, 2007, **34**(3): 511 - 513.
LIU Xiuying, HU Yixiu, MA Zheng, *et al.* Study on the facilitating feces excretion function of dietary fiber in mice [J]. *Modern Prevent Med*, 2007, **34**(3): 511 - 513.
- [3] 刘芳丽. 膳食纤维减肥功效的机理探讨[J]. 食品研究与开发, 2007, **28** (4): 156 - 159.
LIU Fangli. Dietary fiber's effect on weight loss and its mechanism [J]. *Food Res Dev*, 2007, **28**(4): 156 - 159.
- [4] GIACCO R, CLEMEATE G, RICCARD G. Dietary fiber in treatment of diabetes: myth or reality [J]. *Digest Liver Dis*, 2002, **34**(2): 140 - 144.
- [5] JIMENEZ A, SANCHEZ J. Dietary fiber from edible seaweeds: chemical structure, physicochemical properties and effects on cholesterol metabolism [J]. *Nutrit Res*, 2000, **20**(4): 585 - 598.
- [6] 卢宏科, 王琴, 区子弁, 等. 膳食纤维的功能与应用[J]. 广东农业科学, 2007, **27**(4): 67 - 70.
LU Hongke, WANG Qin, OU Zibian, *et al.* Function and application of the dietary fiber [J]. *Guangdong Agric Sci*, 2007, **27**(4): 67 - 70.
- [7] 孙红梅, 张本刚, 齐耀东, 等. 当归药材资源调查与分析[J]. 中国农学通报, 2009, **25**(23): 437 - 441.
SUN Hongmei, ZHANG Bengang, QI Yaodong, *et al.* Survey and Analysis on the resource of *Angelica sinensis* [J]. *Chin Agric Sci Bull*, 2009, **25**(23): 437 - 441.
- [8] DELZNE M, CANI D. A place for dietary fibre in the management of the metabolic syndrome [J]. *Curr Opin Clin Nutr Metab Care*, 2005, **8**: 636 - 640.
- [9] SANGNARK A, NOOMHORM A. Effect of particle sizes on functional properties of dietary fiber prepared from sugarcane bagasse [J]. *Food Chemistry*, 2003, **80**: 221 - 229.
- [10] URBANO G, LOPEZ M, FERNANDEZ M. Ca and P bioavailability of processed lentils as affected by phytic acid content [J]. *Nutr Res*, 1999, **19**(1): 49 - 64.
- [11] BOSSCHER D, BERTRAND M, CAUWENBERGH R. Availabilities of calcium, iron, and zine from dairy infant formulas is affected by soluble dietary fibers and modified starch fractions [J]. *Basic Nutr Invest*, 2003, **19**(8): 641 - 645.
- [12] 吕金顺, 王小芳. 生理条件下 PDF 对 Pb²⁺, Cu²⁺, Zn²⁺, Ca²⁺ 的吸附研究[J]. 食品科学, 2007, **14** (1): 132 - 138.
LÜ Jinshun, WANG Xiaofang. Adsorption Study on PDF Pb²⁺, Cu²⁺, Zn²⁺, Ca²⁺ under physiological condition [J]. *Food Sci*, 2007, **14**(1): 132 - 138.
- [13] 相波, 李义久. 吸附等温式在重金属吸附性能研究中的应用[J]. 有色金属, 2007, **59**(1): 43 - 48.
XIANG Bo, LI Yijiu. Applications of isothermal adsorption equations to heavy metal ions adsorption phenomena [J]. *Nonf Met*, 2007, **59**(1): 43 - 48.
- [14] 张金池, 姜姜, 朱丽. 黏土矿物中重金属离子的吸附规律及竞争吸附[J]. 生态学报, 2007, **27**(9): 3811 - 3819.
ZHANG Jinchi, JIANG Jiang, ZHU Li. Adsorption and competitive adsorption of heavy metal ion by clay mineral

- [J]. *Acta Ecol Sin*, 2007, **27**(9): 3811 - 3819.
- [15] 康琪, 朱若华. 膳食纤维的测定原理和方法[J]. 现代仪器, 2007(7): 1 - 5.
KANG Qi, ZHU Ruohua. The methods and principles of dietary fiber analysis [J]. *Modern Instrum*, 2007(7): 1 - 5.
- [16] 朱江, 周俊, 刘瑛, 等. 纳米 ZrO_2 粉末在植物氮白质测定中的催化作用[J]. 食品科技, 2005(6): 75 - 77.
ZHU Jiang, ZHOU Jun, LIU Zhen, *et al.* Catalysis of nanometer powder of ZrO_2 in the protein determination of primary products [J]. *Food Sci Technol*, 2005(6): 75 - 77.
- [17] BOSSCHER D. Thickening infant formula with digestible and indigestible carbohydrate: availability of calcium, iron, and zinc in vitro [J]. *Pediatr Gastroenterol Nutr*, 2000, **30**: 373.
- [18] 吕金顺, 韦长梅, 徐继明, 等. 马铃薯膳食纤维的结构特征分析[J]. 分析化学, 2007(3): 443 - 446.
LÜ Jinshun, WEI Changmei, XU Jiming, *et al.* Feature analysis of structure of potato dietary fibre [J]. *Chin J Anal Chem*, 2007(3): 443 - 446.
- [19] CARMO M, HUNDAL S, THOMPSON L. Sorption of hydrophobic organic compounds by soil material: application of unit equivalent Freundlich coefficients [J]. *Environ Sci Technol*, 2000, **34**(20): 4363 - 4369.
- [20] LI Xingui, FENG Hao, HUANG Meirong. Redox sorption and recovery of silver ions as silver nanocrystals on poly (aniline-co- 5-sulfo-2-anisidine) nanosorbents [J]. *Chem Eur J*, 2010, **16**(33): 10113 - 10123.
- [21] LI Xingui, LIU Run, HUANG Meirong. Facile synthesis and highly reactive silver ion adsorption of novel microparticles of sulfodiphenylamine and diamionaphthalene copolymers [J]. *Chem Mater*, 2005, **17**(22): 5411 - 5419.
- [22] NEWCOMBE G, DRIKAS M, HAYES R. Influence of characteristic nature organic material on activated carbon adsorption: effect on pore volume distribution and adsorption of 2-methylisoborneol [J]. *Water Res*, 1997, **31**(5): 1065 - 1073.
- [23] KING P, SRINIVAS P, KUMAR Y P, *et al.* Sorption of copper (II) from aqueous solution by *Tectona grandis* l. f. (teak leaves powder)[J]. *J Hazardous Mater*, 2006, **136**(3): 560 - 566.
- [24] KILISLIOGLU A, BILGIN B. Thermodynamic and kinetic investigation of uranium adsorption on amberlite IR-118H resin [J]. *Appl Rad Isot*, 2003, **58**(2): 155 - 160.
- [25] 李琴, 翟建平, 张文艺. 膨润土对 Pb^{2+} , Cu^{2+} , Cr^{3+} 的吸附动力学及等温线研究[J]. 环境污染治理技术与设备, 2006, **7**(10): 55 - 58.
LI Qin, ZHAI Jianping, ZHANG Wenyi. Study on kinetics and isotherm of Pb^{2+} , Cu^{2+} , Cr^{3+} adsorption by bentonite [J]. *Techn Equir Environ Poll Control*, 2006, **7**(10): 55 - 58.
- [26] DONAT R, AKDOGAN A, ERDEM E. Thermodynamics of Pb^{2+} and Ni^{2+} adsorption onto natural bentonite from aqueous solutions [J]. *J Coll Interf Sci*, 2005, **286**(1): 43 - 52.