罗川, 刘宏熠, 陈军, 等. 不同分子量果胶体外模拟消化特性及其对 Pb^{2+}吸附性能研究 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(3): 90−98. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025010069

LUO Chuan, LIU Hongyi, CHEN Jun, et al. *In Vitro* Simulated Digestion Characteristics of Pectin with Different Molecular Weights and Its Adsorption Performance for Pb^{2+}[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(3): 90−98. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025010069

· 研究与探讨 ·

不同分子量果胶体外模拟消化特性及其对 Pb^{2+}吸附性能研究

罗　川[1], 刘宏熠[1], 陈　军[1,2], 邓利珍[1,2], 戴涛涛[1,2], 梁瑞红[1], 李　俶[1], 王乙惠[1,2], 王日思[3,*]

（1.南昌大学食品科学与资源挖掘全国重点实验室, 江西南昌 330047;
2.江西南大国创院食品科技有限公司, 江西南昌 330200;
3.江西农业大学食品科学与工程学院, 江西南昌 330045）

摘　要: 果胶是一种非常有潜力的重金属生物吸附剂，但其在人体消化过程中对重金属的吸附性能还不清楚。为了探究不同分子量柑橘果胶在体外消化过程中的结构变化，并评估其对 Pb^{2+}的吸附性能，本研究通过酶解超滤法制备了 4 种不同分子量（505、163、51 和 21 kDa）的柑橘果胶（CP505、CP163、CP51 和 CP21），结合体外模拟消化模型（口腔、胃、肠阶段）探究其消化行为，通过 FTIR、HPSEC-MALLS-RI 和 DNS 法表征其结构变化，利用体外模拟吸附实验测定其 Pb^{2+}吸附性能。结果表明，与口腔消化阶段相比，果胶在肠消化阶段分子量显著降低（P<0.05）（如 CP21 下降 35.20%），还原糖含量增加（CP21 提升 40.06%），酯化度降低（CP21 减少 59.22%），且分子量越小降解越明显。Pb^{2+}吸附实验中，高分子量果胶（CP505、CP163）在口腔阶段对高浓度 Pb^{2+}（700 mg/L）去除率达 38.03%；胃阶段 CP163 和 CP51 对 600 mg/L Pb^{2+}的去除率分别达 68.98% 和 70.20%；肠阶段 CP163 和 CP51 对 500 mg/L Pb^{2+}仍保持 39.05% 和 39.63% 的吸附效率。研究表明，中等分子量果胶（CP163、CP51）在胃肠阶段因适度降解释放活性基团且维持结构稳定性，展现出最优吸附性能，本研究为明晰果胶在人体消化系统中的行为提供了重要信息，并为开发口服重金属吸附剂提供了理论依据。

关键词: 柑橘果胶, 分子量, 体外模拟消化, Pb^{2+}吸附

中图分类号: TS201.6　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1002−0306(2026)03−0090−09

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2025010069

本文网刊:

In Vitro Simulated Digestion Characteristics of Pectin with Different Molecular Weights and Its Adsorption Performance for Pb^{2+}

LUO Chuan[1], LIU Hongyi[1], CHEN Jun[1,2], DENG Lizhen[1,2], DAI Taotao[1,2], LIANG Ruihong[1], LI Ti[1], WANG Yihui[1,2], WANG Risi[3,*]

（1.State Key Laboratory of Food Science and Resources, Nanchang University, Nanchang 330047, China;
2.International Institute of Food Innovation Co., Ltd., Nanchang University, Nanchang 330200, China;
3.College of Food Science and Engineering, Jiangxi Agricultural University, Nanchang 330045, China）

Abstract: Pectin is a highly promising biosorbent for heavy metals, however, its adsorption performance for these metals during human digestion remains unclear. This study aimed to investigate the structural changes of *Citrus* pectin with varying molecular weights during *in vitro* digestion and to evaluate its Pb^{2+} adsorption performance. Four *Citrus* pectins (CP505, CP163, CP51, and CP21) with molecular weights of 505, 163, 51, and 21 kDa, respectively, were prepared using enzymatic hydrolysis combined with ultrafiltration. Their digestive behaviors were analyzed through an *in vitro* simulated digestion model, which included oral, gastric, and intestinal phases. Structural changes were characterized using Fourier-

收稿日期: 2025−01−09

基金项目: 国家自然科学基金（32202206）; 国家自然科学基金（32260559）。

作者简介: 罗川（2000−）, 女, 硕士, 研究方向: 食品科学, E-mail: 1666744910@qq.com。

*** 通信作者:** 王日思（1992−）, 女, 博士, 讲师, 研究方向: 食品安全与品质控制, E-mail: 410287120@qq.com。

transform infrared spectroscopy (FTIR), high-performance size-exclusion chromatography coupled with multi-angle laser light scattering and refractive index detection (HPSEC-MALLS-RI), and dinitrosalicylic acid (DNS) assays. The Pb^{2+} adsorption capacity was determined through *in vitro* simulated adsorption experiments. The results indicated that, in comparison with the oral digestion phase, the molecular weight of pectin was significantly reduced during the intestinal digestion phase (P<0.05) (e.g., a 35.20% decrease was observed for CP21), accompanied by an increase in reducing sugar content (a 40.06% rise for CP21) and a decrease in degree of esterification (a 59.22% reduction for CP21). Furthermore, the smaller the initial molecular weight of pectin, the more pronounced its degradation. In experiments involving Pb^{2+} adsorption, high-molecular-weight pectins (CP505 and CP163) achieved a removal rate of 38.03% for high-concentration Pb^{2+} (700 mg/L) during the oral phase. In the gastric phase, CP163 and CP51 demonstrated removal rates of 68.98% and 70.20%, respectively, for 600 mg/L Pb^{2+}. During the intestinal stage, CP163 and CP51 still maintained adsorption efficiencies of 39.05% and 39.63% for 500 mg/L Pb^{2+}. The study revealed that medium-molecular-weight pectins (CP163, CP51) demonstrated optimal adsorption performance in the gastrointestinal phases due to moderate degradation, which released active functional groups while maintaining structural stability. This research provides essential insights into the behavior of pectin in the human digestive system and offers a theoretical foundation for the development of oral heavy metal adsorbents.

Key words: *Citrus* pectin; molecular weight; *in vitro* simulated digestion; Pb^{2+} adsorption

随着科技和工业的发展，向环境中释放的 Pb^{2+} 不断增加。铅难以被生物降解，但能在食物链的生物放大作用下富集。被重金属污染的食物经口摄入后，在胃肠道内消化并随血液循环富集到人体不同组织器官中。铅（Pb）是一种外源性、持久性毒物，自古以来便是威胁人类生存环境与职业健康的重要毒素之一。铅在人体内能够和蛋白质及酶等发生强烈的相互作用，使蛋白质/酶失活，也可能引起器官组织形态和新陈代谢变化，从而对人体产生毒性效应[1]。过量重金属进入人体后，将导致机体器官受损，引发心血管疾病，产生慢性或急性中毒，且铅中毒对人体的危害是多器官、多系统、多指征、终生不可逆的[2]。铅中毒如果不及时诊断和治疗，可能会影响人体的神经系统、造血系统、肝脏和肾脏功能，如引发伴有持续性胃肠和神经系统疾病[3]，也会以多种方式影响大脑，尤其是对于儿童来说会导致发育延迟或逆转、永久性学习障碍、癫痫发作、昏迷，甚至死亡[4]。目前，临床上对于急性或慢性铅中毒的患者，通常采取洗胃、利尿、螯合性合成药物等支持疗法，然而这些方法也会对肝肾代谢造成很大负担[5]。因此，亟待开发有效安全的铅离子吸附剂对减少人体中铅的残留。

果胶是一种存在于植物细胞壁中的天然多糖[6]，具有免疫调节[7]、抗肿瘤[8]、调节血糖水平[9]、调节肠道菌群[10] 等生理活性。果胶还能作为螯合剂，可以有效结合重金属离子并将其排出体外，具有高安全性[11]。果胶对重金属的吸附性能取决于其结构特性，主要有酯化度（DM）、中性糖的组成和分子量（Mw）等。已有研究表明，与高酯化果胶相比，由于低酯化果胶带负电荷的羧基数量更多，其对铅离子的吸附性能更好[12]，但低酯化果胶更易被消化[13−14]。另外，果胶结构中 RG-Ⅰ的分支程度及 RG-Ⅱ上的中性糖被认为对果胶的重金属结合有影响，果胶的侧链可能限制了羧基与金属离子的结合，从而抑制了对重金属的吸附[15]。然而，不同分子量果胶对金属离子吸附性能的影响还存在着争议。Mudugamuwa 等[16] 研究了天然甘薯果胶（7.53 g/mol）和改性甘薯果胶（0.05 g/mol）在水溶液中对 Pb^{2+} 的去除能力，发现改性后甘薯果胶的 Pb^{2+} 结合能力远高于天然甘薯果胶；而 Khozhaenko 等[17] 对天然海草果胶（596.19 kDa）、海草果胶衍生物（半乳糖醛酸 A（30.55 kDa）和 B（3.42 kDa））以及商业苹果果胶（289.92 kDa）的 Cd^{2+}、Pb^{2+} 结合活性进行了比较评估，结果表明，半乳糖醛酸 A 具有最高的重金属结合能力，而苹果果胶金属结合能力最差。此外，不同分子量果胶在人体消化系统中的消化特性差异仍不完全清楚，且果胶在消化过程中结构的变化会影响其对铅离子的吸附。体外模拟消化法[18] 是一种有效的研究手段，可以模拟人体消化系统中的物理和化学条件，用于研究食品成分的消化过程[19]。通过这种方法，可以更好地理解不同分子量果胶在消化过程中的组成结构变化以及对铅离子的吸附效果。

本研究旨在通过体外模拟消化模型，研究不同分子量柑橘果胶在消化过程中的组成结构变化，并评估其对消化系统中 Pb^{2+} 的吸附性能。研究结果将有助于深入明晰分子量对果胶消化特性及其对 Pb^{2+} 吸附性能的影响，为开发新型的重金属离子吸附材料提供理论支持，并为不同分子量果胶在功能性食品中的应用提供科学依据。

1　材料与方法

1.1　材料与仪器

柑橘果胶（P9135）、岩藻糖、鼠李糖、阿拉伯糖、半乳糖、葡萄糖、甘露糖（以上均为色谱纯）　上海 Sigma 公司；多聚半乳糖醛酸酶（≥3300 PGNU/g）　上海阿拉丁；胃蛋白酶（USP 级，1∶30000%）、胰酶（BR，1∶4000%）、胆盐　上海源叶；所有试剂均为国产分析纯。

Vivaflow 50 超滤膜包　赛多利斯；SB-2000 数显恒温水浴锅　上海爱朗仪器有限公司；LC 1260 高

效液相色谱系统(配有示差检测器和 LC1260 色谱工作站) 美国安捷伦公司; ZHWY-2102 摇床 上海智城分析仪器制造有限公司; TU-1810 紫外分光光度计、A3AFG-12 火焰原子吸收光谱(AAS) 北京普析通用仪器有限责任公司; FE-28 数显 pH 计 上海梅特勒-托利多仪器有限公司; AlpHa1-2LD 真空冷冻干燥机 北京照生行仪器设备有限公司; Nicolet iS10 傅里叶红外光谱仪 美国赛默飞公司; 940 系列谱峰思维™ 离子色谱系统 瑞士万通公司。

1.2 实验方法

1.2.1 样品制备 将 200 μL 多聚半乳糖醛酸水解酶加入 1% 柑橘果胶(CP505),混合物在 30 ℃ 水浴锅中搅拌 1 h,然后沸水浴 5 min 灭酶。冷却后将果胶溶液泵送至不同截留分子量的超滤膜包,经冷冻干燥 48 h 得到不同分子量的果胶,分别命名为 CP163(>100 kDa)、CP51(30~100 kDa)和 CP21(<30 kDa)。

1.2.2 分子量测定 采用尺寸排阻色谱系统(SEC-MALLS-VISC-RI)测定分子量[20]。色谱柱:保护柱 PL aquagel-OH(7.5 mm×50 mm, 8 μm),分离柱 PL aquagel-OH 30(7.5 mm×300 mm, 8 μm),分离柱 PL aquagel-OH MIXED-H(7.5 mm×300 mm, 8 μm)。检测器:多角度激光散射检测器(DAWN),黏度检测器(ViscoStar),示差检测器(Optilab)。流动相为 0.1 mol/L $NaNO_3$;测试条件:柱温 40 ℃,洗脱液流速 0.5 mL/min,进样量 100 μL。

不同分子量果胶用 0.1 mol/L $NaNO_3$ 配制成 1 mg/mL 溶液,用 0.22 μm 水相膜过滤后进行分析。采用 ASTRA 7.3.2 软件记录果胶样品的洗脱曲线,分析果胶的分子量信息。

1.2.3 还原糖含量 以葡萄糖为标准,采用 3,5-二硝基水杨酸(DNS)法测定还原糖含量[21]。不同分子量果胶:用超纯水配制成 1 mg/mL 溶液。移取 2 mL 样品溶液于 25 mL 的具塞试管,并向其中加入 1.5 mL 的 DNS,混匀,置 100 ℃ 水浴中加热 10 min,待冷却至室温后,用去离子水定容至 25 mL,在 540 nm 波长处测吸光度(标准曲线:y=0.3884x−0.0086, R^2=0.998)。

1.2.4 单糖组成和糖醛酸含量 采用 HPAEC-PAD 法[22] 测定果胶的单糖组成。不同分子量果胶样品水解:10 mg 果胶与 5 mL 2 mmol/L 三氟乙酸混合置于带盖玻璃瓶中,在 110 ℃ 下水解 2 h,冷却稀释一定倍数后用 0.22 μm 水相膜过滤用于分析。色谱洗脱条件:Metrosep Carb 2-150/2.0 分析柱(3 mm×150 mm),柱温 30 ℃,进样体积 25 μL,洗脱液流速 0.5 mL/min。洗脱液:(A)超纯水,(B)10 mmol/L NaOH。

单糖标准曲线测定:用超纯水配制 1、2、4、6、8、10 mg/mL 单糖标准溶液。分别吸取 1 mL 单糖溶液制作混标,过 0.22 μm 水相膜后用于分析,确定每个单糖的出峰时间,并建立单糖浓度与洗脱曲线中对应峰面积的标准曲线。

半乳糖醛酸含量测定:以半乳糖醛酸为标准,用间羟基联苯法测定半乳糖醛酸含量[23]。将半乳糖醛酸标准品溶于超纯水制备 100 μg /mL 的标准液;配制半乳糖醛酸含量为 60 μg/mL 的标准溶液,准确移取 0.0、0.2、0.4、0.6、0.8、1.0 mL 标准溶液于试管中,加蒸馏水至 1.0 mL。试管在冰浴中预冷后加入 5.0 mL 0.0125 mol/L 四硼酸钠-浓硫酸溶液,涡旋混匀,再沸水浴 5 min。冷却至室温后加入 200 μL 0.15% 的间羟基联苯溶液,混匀后在 525 nm 波长处测吸光度,绘制标准曲线(y=0.007x−0.0118, R^2=0.9989)。配制 100 μg/mL 不同分子量果胶溶液,移取 1.0 mL 于试管中,按上述方法处理,测定其在 525 nm 波长处的吸光度,然后根据标准曲线计算果胶的半乳糖醛酸含量。

1.2.5 体外消化模型 按照 Wang 等[24] 和 Wu 等[25] 方法稍作修改进行测定。

口腔消化阶段:将 20 mL 果胶溶液(3 mg/mL)与 6 mL 人工唾液培养基(89.6 g/L KCl、20.0 g/L KSCN、88.8 g/L NaH_2PO_4、57.0 g/L Na_2SO_4、175.3 g/L NaCl、84.7 g/L $NaHCO_3$、2.0 g/L 尿素、290 mg α-淀粉酶)混合,用 HCl(0.1 mol/L)调节 pH 至 6.8。将混合物放入含有 40 mL 蒸馏水的离心管中,在 37 ℃、150 r/min 恒温摇床中孵育 5 min。然后进行沸水浴 5 min 以终止反应,样品冷却后 4000 r/min 离心 30 min,取 2 mL 用于还原糖含量的测定,剩余上清液用超纯水透析(3500 Da)48 h。透析袋外的透析液用于游离单糖的测定,透析袋内的溶液冷冻干燥,收集后按照 1.2.2 中方法进行口腔消化后样品的分子量和酯化度的测定。

胃消化阶段:口腔消化后的混合物立即用 HCl(6 mol/L)调节 pH 至 2.0,加入溶解于 1 mL HCl(0.1 mol/L)中的胃蛋白酶(15 mg)开始胃消化。将混合物在 37 ℃ 下孵育 2 h,然后用 NaOH(6 mol/L)调节 pH 至 7.0 停止反应。按照上述口腔消化类似的步骤,测定胃消化样品的组成结构变化。

肠消化阶段:胃消化后的混合物用 NaOH(6 mol/L)调节 pH 至 6.5,加入 5 mL 胰酶(8 mg/mL)和胆盐(50 mg/mL)混合液,在 37 ℃ 下孵育 2 h。按照上述相同的步骤,测定肠消化样品的组成结构变化。每个消化阶段分别进行 3 次重复实验。

1.2.6 傅里叶红外光谱与酯化度 称取 2 mg 不同分子量果胶粉末和 140 mg 溴化钾混合并充分研磨,用压片机在 30 MPa 下压片 2 min 制备成薄片。采用傅里叶红外光谱仪在 400~4000 cm^{-1} 波段扫描[26],扫描频率设为 64 Hz。酯化度根据式(1)计算[27]。

$$DE(\%) = \frac{A_{1700\sim1750\ cm^{-1}}}{A_{1700\sim1750\ cm^{-1}} + A_{1600\sim1630\ cm^{-1}}} \times 100 \quad 式(1)$$

式中,$A_{1700\sim1750\ cm^{-1}}$ 是 1700~1750 cm^{-1} 波段的面积,$A_{1600\sim1630\ cm^{-1}}$ 是 1600~1630 cm^{-1} 波段的面积。

1.2.7　体外消化体系下果胶对铅离子的吸附　称取 1.32 g $PbCl_2$ 溶于 1 L 的超纯水中，配制成浓度为 1000 mg/L Pb^{2+} 溶液。用超纯水稀释配成 500、600、700、800、900 mg/L Pb^{2+} 溶液。分别移取 10 mL 各浓度的 Pb^{2+} 溶液于 100 mL 的离心管中，再将 0.1 g 的不同分子量果胶样品分别加入其中，空白组不加果胶，再按照 1.2.5 进行体外消化后离心取上清液用 AAS 法测定 Pb^{2+} 浓度[28]。果胶对 Pb^{2+} 的去除率根据公式(2)计算。

$$去除率(\%)=\frac{C_0V_0-(C-C_{空白})V}{C_0V_0}\times 100 \qquad 式（2）$$

式中，C_0 为 Pb^{2+} 溶液初始浓度(mg/L)；C 为吸附后的 Pb^{2+} 溶液浓度(mg/L)；$C_{空白}$ 为空白组消化后的 Pb^{2+} 溶液浓度(mg/L)；V_0 表示初始 Pb^{2+} 溶液的体积(L)；V 表示初始体积加不同阶段消化模拟液的体积(L)。

1.3　数据处理

所有实验均为三次重复，结果以均值±标准差表示。采用 SPSS 软件进行统计分析。采用单因素方差分析(ANOVA)加事后 Duncan 检验进行统计学意义分析，$P<0.05$ 为差异有统计学意义。

2　结果与分析

2.1　不同分子量柑橘果胶的结构组成

经过酶解和超滤后制备得到不同分子量的柑橘果胶，其基本指标如表 2 所示。结果表明，与原果胶 CP505(分子量 505.53 kDa)相比，新制备的 3 种果胶分子量呈梯度降低，说明成功获得了 4 种不同分子量的果胶。与 CP505 相比(还原糖含量 0.03%)，经过酶解和超滤后的果胶还原糖含量略微上升(0.64%~0.85%)，这是由于多聚半乳糖醛酸酶可以切断果胶分子中的糖苷键，将高分子量的果胶分解成较小的片段，这些小片段包含还原糖末端，从而增加了还原糖的含量[29]。4 种果胶的酯化度为 57.92%~63.90%，差异较小，均为高酯果胶。单糖的标准曲线如表 1 所示，单糖标准品的色谱峰如图 1 所示。计算出果胶的单糖含量，结果表明 4 种果胶的单糖组成和含量相似。4 种果胶的半乳糖醛酸含量均大于 65%，符合国家标准 GB 25533-2010《食品安全国家标准 食品添加剂 果胶》，且经过酶解和超滤后的果胶半乳糖醛酸含量显著增加($P<0.05$)，这是由于多聚半乳糖醛酸酶水解多聚半乳糖醛酸残基的糖苷键，产生半乳糖醛酸，从而增加果胶半乳糖醛酸的含量[30]。综上，除分子量有较大差异之外，4 种果胶的基本结构组成相近，可用于研究分子量对果胶消化特性及体外 Pb^{2+} 吸附性能的影响。

表 1　单糖标准品在 HPAEC 色谱中的标准曲线

Table 1　Standard curves of monosaccharide standards in HPAEC chromatography

单糖名称	标准曲线	R^2
岩藻糖	y=51.01576x+1.04558	0.9992
阿拉伯糖	y=43.66762x+2.98088	0.9998
鼠李糖	y=54.93964x−1.80895	0.9997
半乳糖	y=62.27652x−9.3459	0.9999
葡萄糖	y=55.15039x+8.2747	0.9996
甘露糖	y=64.24709x+0.29639	0.9994

表 2　不同分子量果胶的基本指标

Table 2　Basic indicators of pectin with different molecular weights

基本指标	CP505	CP163	CP51	CP21
分子量(kDa)	505.53±4.05^a	163.22±9.25^b	50.87±9.92^c	21.52±5.64^d
还原糖含量(%)	0.03±0.01^c	0.64±0.01^b	0.82±0.02^a	0.85±0.03^a
酯化度(%)	61.30±0.54^a	57.92±0.65^b	62.79±0.30^a	63.90±0.81^a
岩藻糖(mg/g)	0.72±0.02^a	0.74±0.04^a	0.75±0.04^a	0.51±0.03^b
鼠李糖(mg/g)	3.10±0.08^c	3.91±0.04^a	4.07±0.01^a	3.49±0.07^b
半乳糖(mg/g)	8.68±0.60^a	5.21±0.66^d	6.07±0.48^c	7.53±0.26^b
阿拉伯糖(mg/g)	4.13±0.18^a	4.52±0.27^a	3.58±0.16^b	3.08±0.09^c
葡萄糖(mg/g)	3.68±0.17^b	4.93±0.35^a	1.38±0.11^c	1.28±0.04^c
半乳糖醛酸含量(%)	69.11±0.59^b	85.06±2.08^a	87.11±5.04^a	81.63±3.93^a

注：表中数据以均值±标准偏差表示，同一行不同字母表示样品间存在显著差异($P<0.05$)，表3、表4同。

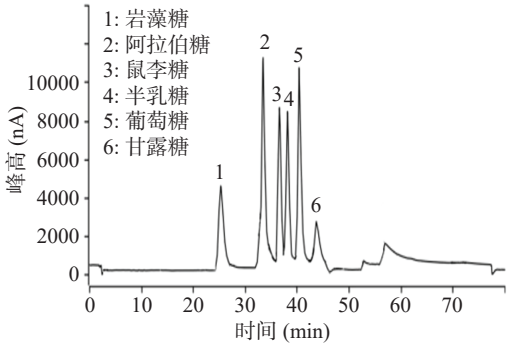


图 1　单糖标准品色谱图

Fig.1　Chromatogram of monosaccharide standard

2.2　分子量对柑橘果胶体外模拟消化特性的影响

2.2.1　体外消化过程中分子量的变化　不同分子量果胶在体外模拟消化过程中分子量变化结果如表 3 所示。与未消化样品相比，在经过口腔消化后，CP505 分子量下降了 0.56%，CP163 下降了 16.13%；CP51 和 CP21 分子量呈现增大的趋势，这可能是由于果胶结合了消化模拟液中的阳离子，导致果胶分子变大，且有研究发现消化模拟液会影响果胶的尺寸排阻色谱出峰[31]。与口腔消化后的样品相比，经过胃消化后的 CP505、CP163、CP51 和 CP21 分子量分别下降了 2.73%、14.05%、14.24% 和 12.17%。与胃消化后的样品相比，经过肠消化后，CP505、CP163、CP51 和 CP21 分子量分别下降了 17.89%、8.17%、2.40% 和 26.21%。胃肠消化后分子量的降低，表明 4 种果胶在体外消化过程中会发生降解。这与 Ferreira-lazarte 等[32] 的结论不一致，其研究发现果胶在胃肠上消化道具有不可消化性，但与王培等[33] 研究结果相似，果胶会在胃肠消化过程中降解。这可能是由于

表 3 不同分子量果胶在体外模拟消化过程中的分子量变化

Table 3 Molecular weight changes of pectin with different molecular weights during *in vitro* simulated digestion

果胶样品	Mw(kDa)			
	未消化	口腔	胃	肠
CP505	505.53±4.05^{a}	502.70±3.32^{b}	489.00±3.18^{c}	401.50±1.82^{d}
CP163	163.22±9.25^{a}	136.70±7.75^{b}	117.50±9.36^{c}	107.90±4.11^{d}
CP51	50.87±9.92^{d}	78.22±3.91^{a}	67.08±2.01^{b}	65.47±3.92^{c}
CP21	21.52±5.64^{d}	78.50±3.90^{a}	68.94±5.09^{b}	50.87±2.54^{c}

果胶来源或组成结构等的不同。总之,样品肠消化后对比口腔消化后分子量降低程度:CP21>CP163>CP505>CP51,表明 CP505 虽然在口腔消化过程中具有更高的结构稳定性,但在胃肠消化中也会进一步发生降解;而分子量小的 CP21 在整个体外模拟消化过程中都容易被降解。

2.2.2 体外消化过程中还原糖含量的变化 由于多糖在溶液中容易形成聚集体[34],很难确定果胶在体外消化过程中分子量的降低是由于糖苷键的破坏还是聚集体的破坏,因此需要进一步对果胶在体外消化过程中释放的还原糖含量进行分析,结果如图 2 所示。与未消化的果胶相比,经过口腔消化后,CP505、CP51、CP21 的还原糖含量无显著变化,说明口腔消化阶段分子量的降低是果胶聚集体被破坏导致的;然而 CP163 的还原糖含量显著降低(P<0.05),这可能是由于果胶用多聚半乳糖醛酸酶酶解后产生了三半乳糖醛酸寡糖,三半乳糖醛酸寡糖在超滤时保留于 CP163 中,口腔消化时其与钠离子形成三半乳糖醛酸盐沉淀[35],而还原糖含量是测定离心后的上清液,导致测定的含量较低。在胃消化阶段,不同分子量果胶的还原糖含量均显著增加(P<0.05)。与口腔消化阶段相比,胃消化阶段的 CP505、CP163、CP51、CP21 还原糖含量分别增加了 28.28%、25.36%、16.39%、20.22%,这可能是由于胃消化的酸性环境促使果胶发生了水解,释放出还原糖[36],说明胃消化阶段分子量的降低受到了果胶糖苷键断裂的影响,这与 Yu 等[37] 研究的白茅多糖消化结果一致,在模拟胃消化后发生了降解。肠消化期间,CP163 和 CP51 还原糖含量无显著变化,说明 CP163 和 CP51 在小肠消化阶段分子量的降低是果胶聚集体被破坏导致的;CP505 还原糖含量略微下降,这可能是由于部分糖醛酸基团可能会在体外模拟消化系统中受其他离子影响,导致样品中的还原糖含量略有变化[33];而 CP21 还原糖含量显著增加(P<0.05),这可能是由于 CP21 的分子片段小,受消化酶的影响更大,从而发生了进一步糖苷键断裂[38]。综上,分子量更小的 CP21 在体外消化过程中更容易因糖苷键破坏而发生降解。

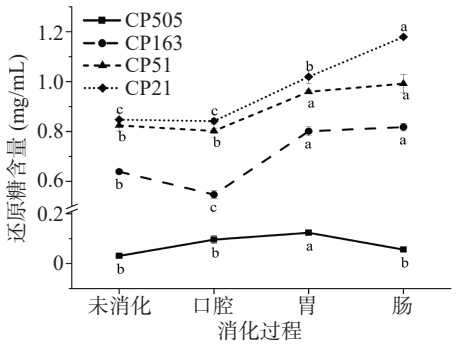


图 2 不同分子量果胶在体外模拟消化中的还原糖含量变化

Fig.2 Changes in reducing sugar content of pectin with different molecular weights during *in vitro* simulated digestion

注:不同字母表示同一样品在不同消化阶段具有显著性差异(P<0.05)。

2.2.3 体外消化过程中游离单糖的产生 与单糖标准品的 HPLC 色谱峰(图 1)相比,4 种果胶在体外模拟消化过程中的色谱图(图 3)均无明显出峰,说明 4 种果胶在体外模拟消化过程中均没有游离单糖产生[39]。结果表明虽然果胶在体外模拟消化过程中会发生降解,导致分子量降低,但不会产生游离单糖。这与 Yu 等[40] 研究的百香果皮果胶、Wu 等[25] 研究的秋葵多糖和 Fu 等[41] 研究的双孢蘑菇多糖结果一致,均发现样品在口腔-胃肠道消化过程中会发生轻微降解,但不会产生游离单糖。

2.2.4 体外消化过程中红外谱图分析 消化前后果胶的红外谱图如图 4 所示。1000~1200 cm^{-1} 的吸收峰是果胶分子中的糖醛酸;1610~1650 cm^{-1} 处为自由羧基官能团吸收峰,1700~1760 cm^{-1} 处为酯化羧基官能团吸收峰;2900 cm^{-1} 左右吸收峰为 C-H 的伸缩振动和变角振动;3400 cm^{-1} 左右的吸收峰为 O-H 的伸缩振动[42]。结果表明,4 种果胶经体外模拟口腔、胃、肠消化后,1700~1760 cm^{-1} 区域处的酯化羧基官能团吸收峰均减弱,表明酯化度降低,可能是由于消化液的酸性或碱性等环境促进果胶去酯化[43],且消化体系中添加的酶也对果胶甲酯也具有较弱的去酯化作用[44]。由表 4 可知,随着果胶分子量的降低,去酯化反应越明显。小肠消化结束后,CP505、CP163、CP51、CP21 的酯化度分别降低了 44.19%、49.27%、72.02%、87.68%。这与 Du 等[45] 研究结果类似,果胶经体外消化后酯化度明显下降,其他区域峰几乎无变化。结果表明果胶的初级化学结构没有被破坏,官能团种类没有发生变化。综上,在体外模拟消化过程中,4 种果胶的酯化度均发生了下降,但不会改变果胶的分子结构,且分子量越小的果胶酯化度降低越多。

综上,4 种柑橘果胶在体外模拟消化过程中,均会发生降解,表现为分子量降低、还原糖含量升高,但不会产生游离单糖。其中分子量小的 CP21 更容易发生降解,而分子量大的 CP505 在体外模拟消化过程中更稳定。此外,4 种柑橘果胶在体外模拟消化过程中,均会发生去酯化反应,且分子量越小的果胶酯化度降低越多。

2.3 分子量对柑橘果胶体外模拟 Pb^{2+} 吸附性能的影响

由图 5 可知,4 种果胶在体外模拟消化过程中,

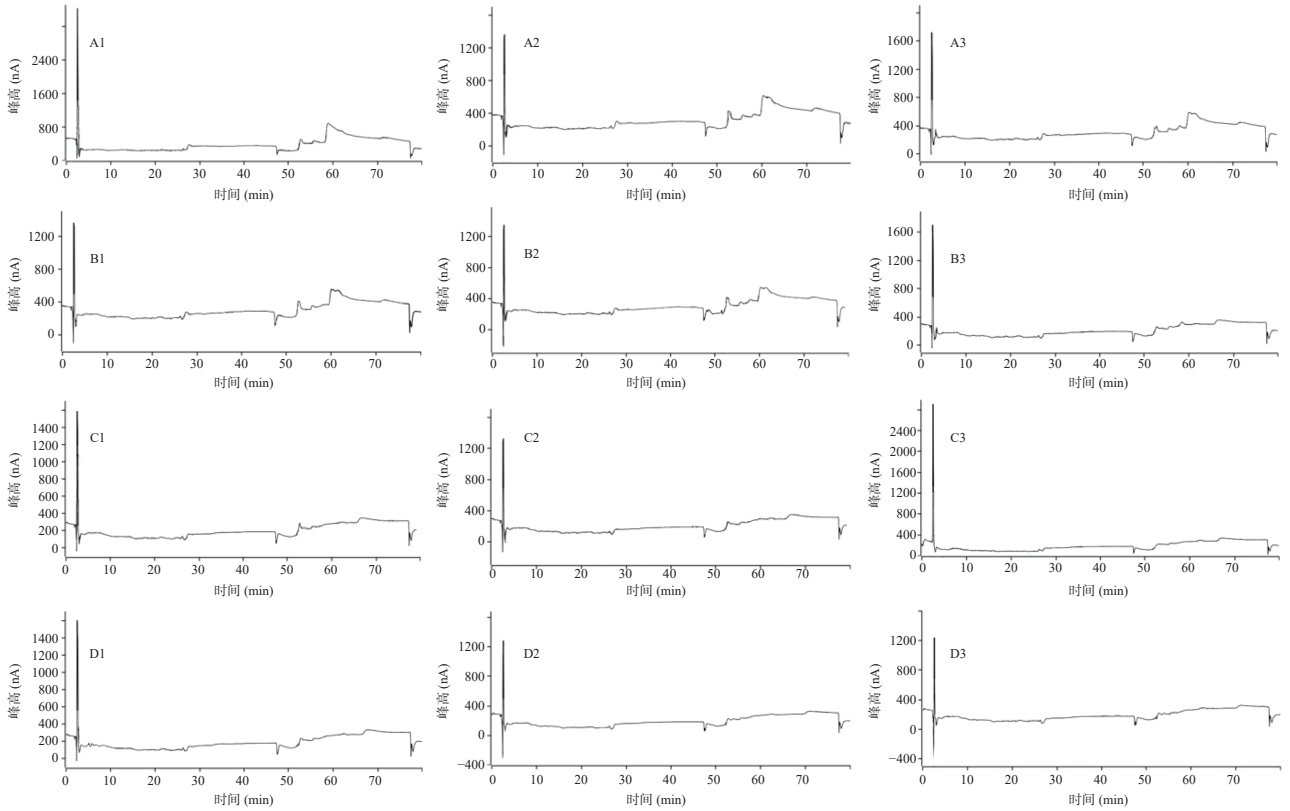


图 3　不同分子量果胶在体外模拟消化过程中的游离单糖变化

Fig.3　Changes in free monosaccharides of pectin with different molecular weights during *in vitro* simulated digestion

注：A1：CP505-口腔，A2：CP505-胃，A3：CP505-肠，B1：CP163-口腔，B2：CP163-胃，B3：CP163-肠，C1：CP51-口腔，C2：CP51-胃，C3：CP51-肠，D1：CP21-口腔，D2：CP21-胃，D3：CP21-肠。

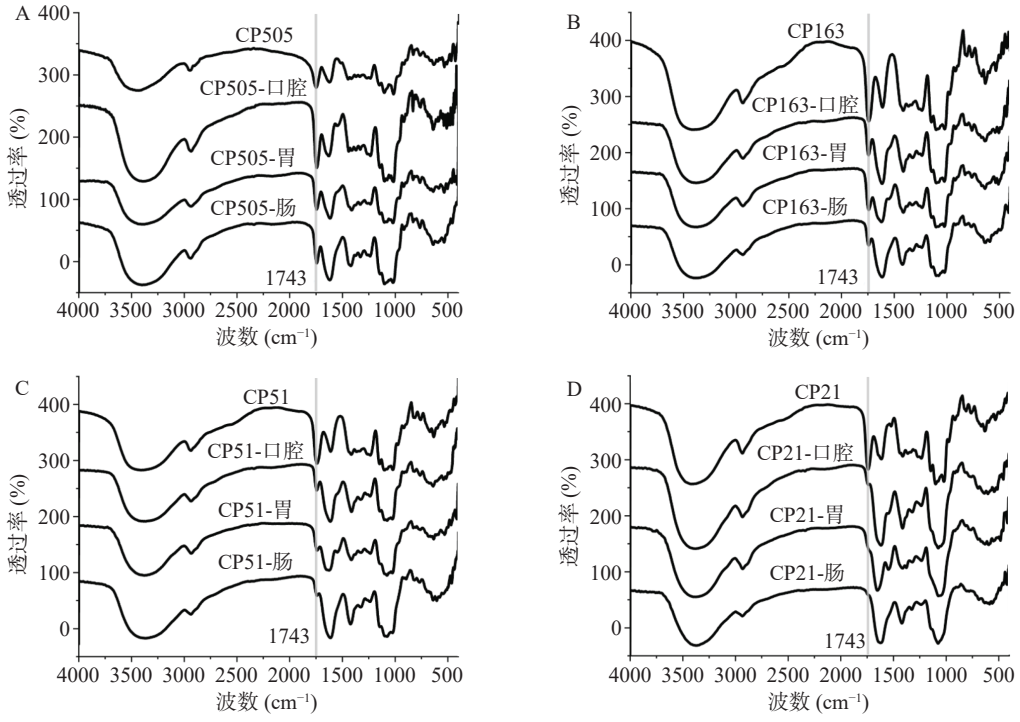


图 4　不同分子量果胶在体外模拟消化过程中的红外谱图变化

Fig.4　Changes in infrared spectra of pectin with different molecular weights during *in vitro* simulated digestion

注：(A)CP505 体外模拟消化过程的红外谱图；(B)CP163 体外模拟消化过程的红外谱图；(C)CP51 体外模拟消化过程的红外谱图；(D)CP21 体外模拟消化过程的红外谱图。

均对 Pb^{2+}具有一定的吸附能力，且存在剂量依赖性。已有研究也报道了果胶对 Pb^{2+}的去除率与 Pb^{2+}的初始浓度密切相关[46]。由图 5A 可知，在口腔消化阶段，CP505、CP163 和 CP51 对 Pb^{2+}的去除率

表 4 不同分子量果胶在体外模拟消化过程中酯化度的变化

Table 4 Changes in esterification degree of pectin with different molecular weights during *in vitro* simulated digestion

果胶样品	酯化度(%)			
	未消化	口腔	胃	肠
CP505	61.30±0.54[a]	57.20±0.65[b]	42.53±0.08[c]	34.21±0.21[d]
CP163	57.92±0.65[a]	40.87±0.04[b]	31.33±1.42[c]	29.38±1.45[c]
CP51	62.79±0.30[a]	25.07±1.66[b]	19.53±0.11[c]	17.57±5.74[c]
CP21	63.90±0.81[a]	19.30±0.99[b]	14.64±0.62[c]	7.87±0.17[d]

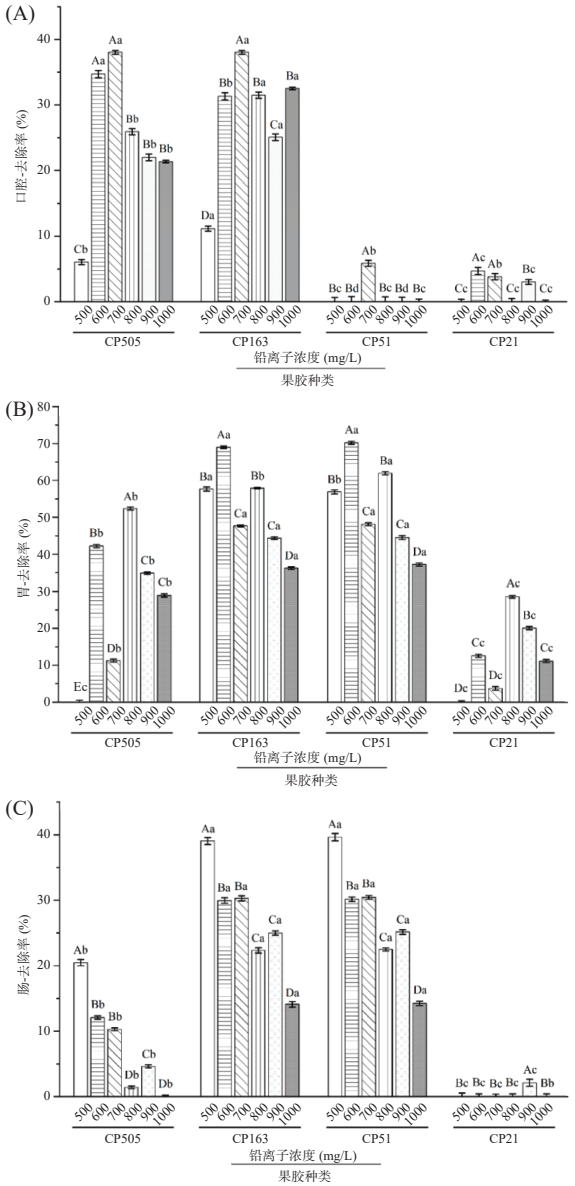


图 5 不同分子量果胶在体外模拟消化体系下对 Pb^{2+}的去除率

Fig.5 Removal rate of Pb^{2+} by pectin with different molecular weights in an *in vitro* simulated digestion system

注:(A)口腔消化过程 Pb^{2+}去除率;(B)胃消化过程 Pb^{2+}去除率;(C)肠消化过程 Pb^{2+}去除率。大写字母表示在不同 Pb^{2+}初始浓度下同一果胶样品的去除率具有显著性差异(P<0.05);小写字母表示在同一 Pb^{2+}初始浓度下不同果胶样品的去除率具有显著性差异(P<0.05)。

均随着 Pb^{2+}初始浓度的增加(500~900 mg/L)而先增大后减小。其中在 Pb^{2+}初始浓度为 700 mg/L 时,CP505、CP163 和 CP51 对 Pb^{2+}的去除率最高,分别为 38.03%、38.03% 和 5.88%;在 Pb^{2+}初始浓度为 600 mg/L 时,CP21 对 Pb^{2+}的去除率最高(4.69%)。这可能是由于在低 Pb^{2+}浓度下,果胶具有较多的可以与 Pb^{2+}相互作用的位点,且表面吸附位点并未达到饱和,初始 Pb^{2+}浓度梯度是果胶吸附 Pb^{2+}的主要驱动力[17]。当 Pb^{2+}初始浓度超过一定量时,吸附位点达到饱和状态,所以 Pb^{2+}浓度继续升高反而会降低果胶吸附率,表现出去除率下降。这与 Wang 等[47]的研究结果一致,对于一定量的吸附剂,可用吸附位点的数量受到限制,去除率随着初始 Pb^{2+}浓度的增加而降低。在 4 种果胶各自最佳 Pb^{2+}初始浓度下,不同分子量果胶对 Pb^{2+}的去除率 CP505≈CP163>CP51>CP21,即果胶分子量越大,对口腔中 Pb^{2+}的吸附越强。

与口腔消化相比,4 种果胶在胃消化阶段对 Pb^{2+}的去除率显著增强(图 5B),这可能是由于胃消化过程中的酸性 pH 增加了果胶的游离羧酸和游离羟基用于 Pb^{2+}的吸附,从而提高了 Pb^{2+}去除效果[48];且果胶在消化过程中酯化度的降低(表 4)也有利于提高对 Pb^{2+}的吸附能力[17]。随着 Pb^{2+}初始浓度的增加,4 种果胶对 Pb^{2+}的去除率无明显规律性变化,其中 CP163 和 CP51 在 Pb^{2+}初始浓度为 600 mg/mL 时对 Pb^{2+}的去除率最高,分别为 68.98% 和 70.20%;CP505 和 CP21 在 Pb^{2+}初始浓度为 800 mg/mL 时的去除率最高,分别为 52.38% 和 28.57%。在最佳 Pb^{2+}初始浓度下,不同分子量果胶对 Pb^{2+}的去除率 CP163≈CP51>CP505>CP21,表明分子量适中的果胶对胃中 Pb^{2+}的吸附更强。CP21 的去除率最低可能是由于果胶结合 Pb^{2+}是静电作用结合,没有形成稳定的合作结区[12]。

在小肠消化阶段,4 种果胶对 Pb^{2+}的去除率低于胃消化阶段(图 5C),这可能是由于在小肠消化阶段 pH 的改变[12]。随着 Pb^{2+}初始浓度的增加,CP505、CP163、CP51 对 Pb^{2+}的去除率总体呈降低趋势,在 Pb^{2+}初始浓度为 500 mg/L 时,这 3 种果胶对 Pb^{2+}的去除率最高,分别为 20.46%、39.05%、39.63%。这可能是由于经过了口腔和胃阶段的吸附,果胶吸附位点逐渐趋于饱和,继续升高 Pb^{2+}浓度不会增加果胶的吸附率,反而会降低果胶对 Pb^{2+}的去除率。CP21 对 Pb^{2+}的去除率在 Pb^{2+}初始浓度为 900 mg/L 达到最高,为 2.11%。结果表明 4 种果胶中在体外模拟小肠消化阶段,CP163 和 CP51 对 Pb^{2+}的吸附能力最强,其次是 CP505,CP21 对 Pb^{2+}的吸附能力最弱,这与胃消化阶段的趋势一致。

综上,在体外模拟消化过程中果胶对 Pb^{2+}的去除效果与果胶分子量密切相关。在口腔消化阶段,分子量越大的果胶对 Pb^{2+}的去除率越高,这可能是由于较高分子量果胶的复杂结构使其拥有更多的分支点和内腔,在短时间内为铅离子提供了更多的吸附位

点和较好的保留能力[16]；而低分子量的果胶具有更简单的线性结构和较小的分子尺寸[49]，所以对 Pb^{2+}的去除能力较弱。在胃肠消化阶段，分子量适中的 CP163 和 CP51 对 Pb^{2+}的去除率更高，而分子量最大的 CP505 和分子量最小的 CP21 对 Pb^{2+}的吸附能力较弱，说明在一定范围内，果胶分子量越小对 Pb^{2+}的吸附能力越强，但是超过这个范围后，果胶对铅的吸附能力下降，该结果与 Khozhaenko 等[17] 研究的结果一致，该研究发现半乳糖醛酸 A（30.55 kDa）对 Pb^{2+}的吸附能力高于高分子量海草果胶（596.19 kDa）和低分子量的半乳糖醛酸 B（3.42 kDa），表明中等分子量果胶对 Pb^{2+}的吸附能力更强。

3　结论

本研究通过体外模拟消化系统分析了不同分子量柑橘果胶的消化特性及其对 Pb^{2+}的吸附性能。结果表明，不同分子量柑橘果胶在口腔消化过程中，高分子量果胶表现出更高的稳定性；在胃肠消化过程中均发生显著降解和去酯化，且分子量越小（如 CP21），降解程度和酯化度降低越显著。在体外吸附实验中，胃肠消化阶段中等分子量果胶（CP163 和 CP51）对 Pb^{2+}的吸附能力最强，去除率分别达 68.98% 和 70.20%，优于高分子量（CP505）和低分子量（CP21）果胶，表明果胶吸附性能与分子量呈非线性关系，存在最佳分子量范围。本研究为开发基于分子量优化的新型果胶基重金属吸附剂提供了科学依据，并拓展了其在功能性食品中的潜在用途。然而，本研究仍存在局限性：体外模拟消化系统与真实人体环境的差异可能影响结果的普适性，未来需通过体内实验验证。

© The Author(s) 2026. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).

参考文献

［1］ SAHA N, RAHMAN M S, AHMED M B, et al. Industrial metal pollution in water and probabilistic assessment of human health risk[J]. Journal of Environmental Management, 2017, 185: 70−78.

［2］ PATRICK L. Lead toxicity, a review of the literature. Part 1: Exposure, evaluation, and treatment[J]. Alternative Medicine Review: A Journal of Clinical Therapeutic, 2006, 11(1): 2−22.

［3］ LOCKITCH G. Perspectives on lead toxicity[J]. Clinical Biochemistry, 1993, 26(5): 371−381.

［4］ LIDSKY T I, SCHNEIDER J S. Lead neurotoxicity in children: Basic mechanisms and clinical correlates[J]. Brain, 2003, 126(Pt 1): 5−19.

［5］ WANG Zhihua, YAN Yongbin, YU Xiaohua, et al. Protective effects of chitosan and its water-soluble derivatives against lead-induced oxidative stress in mice[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2016, 83: 442−449.

［6］ BARRERA-CHAMORRO L, FERNANDEZ-PRIOR Á, RIVERO-PINO F, et al. A comprehensive review on the functionality and biological relevance of pectin and the use in the food industry[J]. Carbohydrate Polymers, 2025, 348: 122794.

［7］ BUSATO B, de ALMEIDA ABREU E C, de OLIVEIRA PETKOWICZ C L, et al. Pectin from *Brassica oleracea* var. *italica* triggers immunomodulating effects *in vivo*[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2020, 161: 431−440.

［8］ TAMIELLO C S, ADAMI E R, de OLIVEIRA N M T, et al. Structural features of polysaccharides from edible jambo (*Syzygium jambos*) fruits and antitumor activity of extracted pectins[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2018, 118: 1414−1421.

［9］ ZANG Yanqing, DU Chao, RU Xin, et al. Anti-diabetic effect of modified 'Guanximiyou' pummelo peel pectin on type 2 diabetic mice via gut microbiota[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2023, 242: 124865.

［10］ REN Ting, XU Mengran, ZHOU Shuo, et al. Structural characteristics of mixed pectin from ginseng berry and its anti-obesity effects by regulating the intestinal flora[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2023, 242: 124687.

［11］ HEXEBERG S, HEXEBERG E, WILLUMSEN N, et al. A study on lipid metabolism in heart and liver of cholesterol- and pectin-fed rats[J]. The British Journal of Nutrition, 1994, 71(2): 181−192.

［12］ CELUS M, KYOMUGASHO C, van LOEY A M, et al. Influence of pectin structural properties on interactions with divalent cations and its associated functionalities[J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2018, 17(6): 1576−1594.

［13］ GUAN Shuyi, HUA Xiao, WANG Zijie, et al. Performance of ultrahigh methoxylated pectin as the delivery material in the simulated *in vitro* digestion[J]. Food Hydrocolloids, 2023, 134: 108086.

［14］ CAO Weichao, GUAN Shuyi, YUAN Yuying, et al. The digestive behavior of pectin in human gastrointestinal tract: A review on fermentation characteristics and degradation mechanism[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2024, 64(33): 12500−12523.

［15］ PATOVA O A, GOLOVCHENKO V V, OVODOV Y S. Pectic polysaccharides: Structure and properties[J]. Russian Chemical Bulletin, 2014, 63(9): 1901−1924.

［16］ MUDUGAMUWA ARACHCHIGE M P, MU T H, MA M P. Effect of high hydrostatic pressure-assisted pectinase modification on the Pb^{2+} adsorption capacity of pectin isolated from sweet potato residue[J]. Chemosphere, 2021, 262: 128102.

［17］ KHOZHAENKO E V, KHOTIMCHENKO R Y, KOVALEV V V, et al. Metal binding activity of pectin isolated from seagrass *Zostera marina* and its derivatives[J]. Russian Journal of Marine Biology, 2015, 41(6): 485−489.

［18］ GALLEGO-LOBILLO P, FERREIRA-LAZARTE A, HERNÁNDEZ-HERNÁNDEZ O, et al. *In vitro* digestion of polysaccharides: InfoGest protocol and use of small intestinal extract from rat[J]. Food Research International, 2021, 140: 110054.

［19］ LI Cheng, YU Wenwen, WU Peng, et al. Current *in vitro* digestion systems for understanding food digestion in human upper gastrointestinal tract[J]. Trends in Food Science & Technology, 2020, 96: 114−126.

［20］ 陈瑞云. 薜荔籽果胶自凝胶机制及其对淀粉性质影响[D]. 南昌：南昌大学, 2022. [CHEN Ruiyun. The gelation and the effect on starch physicochemical properties mechanism of pectin from creeping fig[D]. Nanchang: Nanchang University, 2022.]

［21］ 赵凯, 许鹏举, 谷广烨. 3, 5-二硝基水杨酸比色法测定还原糖含量的研究[J]. 食品科学, 2008, 29(8): 534−536. [ZHAO Kai, XU Pengju, GU Guangye. Study on determination of reducing sugar content using 3, 5-dinitrosalicylic acid method[J]. Food Science, 2008, 29(8): 534−536.]

[22] PETKOWICZ C L O, VRIESMANN L C, WILLIAMS P A. Pectins from food waste: Extraction, characterization and properties of watermelon rind pectin[J]. Food Hydrocolloids, 2017, 65: 57−67.
[23] 刘宏熠. 假酸浆籽果胶提取及性质研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2022. [LIU Hongyi. Study on extraction and characterization of pectin from *Nicandra physaloides* (Linn.) Gaertn seeds[D]. Nanchang: Nanchang University, 2022.]
[24] WANG Cong, LI Weiwei, CHEN Zhongqin, et al. Effects of simulated gastrointestinal digestion *in vitro* on the chemical properties, antioxidant activity, *α*-amylase and *α*-glucosidase inhibitory activity of polysaccharides from *Inonotus obliquus*[J]. Food Research International, 2018, 103: 280−288.
[25] WU Dingtao, NIE Xirui, GAN Renyou, et al. *In vitro* digestion and fecal fermentation behaviors of a pectic polysaccharide from okra (*Abelmoschus esculentus*) and its impacts on human gut microbiota[J]. Food Hydrocolloids, 2021, 114: 106577.
[26] WANG Ruijiao, LIU Wei, LIU Lu, et al. Characterization, *in vitro* digestibility, antioxidant activity and intestinal peristalsis in zebrafish of *Dioscorea opposita* polysaccharides[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2023, 250: 126155.
[27] VRIESMANN L C, de OLIVEIRA PETKOWICZ C L. Polysaccharides from the pulp of cupuassu (*Theobroma grandiflorum*): Structural characterization of a pectic fraction[J]. Carbohydrate Polymers, 2009, 77(1): 72−79.
[28] ARACHCHIGE M P M. 高静水压辅助果胶酶改性甘薯果胶及其对铅离子吸附能力的影响机制[D]. 北京: 中国农业科学院, 2020. [ARACHCHIGE M P M. Modification of sweet potato pectin under high hydrostatic pressure assisted pectinase and its effect on the Pb^{2+} adsorption capacity[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2020.]
[29] ZHU Yiwei, WANG Haoyu, ZHANG Ting, et al. Characterization, antioxidant activity and *in vitro* digestion of hawthorn pectin prepared by gradient ethanol precipitation[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 267: 131278.
[30] 高华奇, 王立芹, 孙翠, 等. 采后跃变型果实软化与果胶降解的研究进展[J]. 果树学报, 2022, 39(10): 1922−1934. [GAO Huaqi, WANG Liqin, SUN Cui, et al. Research progress on postharvest fruit softening and pectin degradation in climacteric fruits[J]. Journal of Fruit Science, 2022, 39(10): 1922−1934.]
[31] 闵芳芳, 聂少平, 万宇俊, 等. 青钱柳多糖在体外消化模型中的消化与吸收[J]. 食品科学, 2013, 34(21): 24−29. [MIN Fangfang, NIE Shaoping, WAN Yujun, et al. *In vitro* digestion and absorption of polysaccharide from *Cyclocarya paliurus* leaves[J]. Food Science, 2013, 34(21): 24−29.]
[32] FERREIRA-LAZARTE A, MORENO F J, CUEVA C, et al. Behaviour of *Citrus* pectin during its gastrointestinal digestion and fermentation in a dynamic simulator (simgi®)[J]. Carbohydrate Polymers, 2019, 207: 382−390.
[33] 王培, 张丽芬, 陈复生. 果胶多糖在体外模拟消化体系中结构特性的变化研究[J]. 河南工业大学学报(自然科学版), 2018, 39(3): 20−25. [WANG Pei, ZHANG Lifen, CHEN Fusheng. Study on the change of structural characteristics of pectin polysaccharide in simulated *in vitro* digestion[J]. Journal of Henan University of Technology (Natural Science Edition), 2018, 39(3): 20−25.]
[34] LI Hongyu, LI Zheng, WANG Pengwang, et al. Evaluation of *Citrus* pectin extraction methods: Synergistic enhancement of pectin's antioxidant capacity and gel properties through combined use of organic acids, ultrasonication, and microwaves[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 266: 131164.
[35] CHENG Zhong, CHEN Dong, LU Bo, et al. A novel acid-stable endo-polygalacturonase from *Penicillium oxalicum* CZ1028: Purification, characterization, and application in the beverage industry[J]. Journal of Microbiology and Biotechnology, 2016, 26(6): 989−998.
[36] GUO Yuxi, CHEN Xuefeng, GONG Pin, et al. Advances in the *in vitro* digestion and fermentation of polysaccharides[J]. International Journal of Food Science & Technology, 2021, 56(10): 4970−4982.
[37] YU Wenchen, WANG Junwen, XIONG Yi, et al. *In vivo* absorption, *in vitro* simulated digestion, and fecal fermentation properties of *Imperata cylindrica* polysaccharides and their effects on gut microbiota[J]. Food Chemistry, 2024, 461: 140773.
[38] ZHANG Yao, WANG Liping, QIU Zihan, et al. Comprehensive evaluation of *Flammulina velutipes* residues polysaccharide based on *in vitro* digestion and human fecal fermentation[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 281: 136487.
[39] WU Dingtao, HE Yuan, YUAN Qin, et al. Effects of molecular weight and degree of branching on microbial fermentation characteristics of okra pectic-polysaccharide and its selective impact on gut microbial composition[J]. Food Hydrocolloids, 2022, 132: 107897.
[40] YU Yahui, WU Luobang, LIU Xiaozhen, et al. *In vitro* simulated digestion and fermentation characteristics of pectic polysaccharides from fresh passion fruit (*Passiflora edulis* f. *flavicarpa* L.) peel[J]. Food Chemistry, 2024, 452: 139606.
[41] FU Chujing, YE Kai, MA Sai, et al. Simulated gastrointestinal digestion and gut microbiota fermentation of polysaccharides from *Agaricus bisporus*[J]. Food Chemistry, 2023, 418: 135849.
[42] WU Ziyang, QIN Dan, LI Hehe, et al. Physicochemical and functional properties of *Lycium ruthenicum* pectin by different extraction methods[J]. Frontiers in Nutrition, 2022, 9: 946606.
[43] CARNACHAN S M, BOOTTEN T J, MISHRA S, et al. Effects of simulated digestion *in vitro* on cell wall polysaccharides from kiwifruit (*Actinidia* spp.)[J]. Food Chemistry, 2012, 133(1): 132−139.
[44] MA Gaoxing, XU Qian, DU Hengjun, et al. Characterization of polysaccharide from *Pleurotus eryngii* during simulated gastrointestinal digestion and fermentation[J]. Food Chemistry, 2022, 370: 131303.
[45] DU Yizheng, CHEN Yuying, LIU Ting, et al. The instability of pectin-based emulsions in the upper digestive tract investigated based on the molecular structure and interfacial properties of pectin[J]. Carbohydrate Polymers, 2025, 348: 122852.
[46] LI Jun, YANG Zailei, DING Tao, et al. The role of surface functional groups of pectin and pectin-based materials on the adsorption of heavy metal ions and dyes[J]. Carbohydrate Polymers, 2022, 276: 118789.
[47] WANG Risi, LI Ya, SHUAI Xixiang, et al. Pectin/activated carbon-based porous microsphere for Pb^{2+} adsorption: Characterization and adsorption behaviour[J]. Polymers, 2021, 13(15): 2453.
[48] CELUS M, KYOMUGASHO C, SALVIA-TRUJILLO L, et al. Interactions between *Citrus* pectin and Zn^{2+} or Ca^{2+} and associated *in vitro* Zn^{2+} bioaccessibility as affected by degree of methylesterification and blockiness[J]. Food Hydrocolloids, 2018, 79: 319−330.
[49] KOKSHAROV S A, ALEEVA S V, LEPILOVA O V. Description of adsorption interactions of lead ions with functional groups of pectin-containing substances[J]. Journal of Molecular Liquids, 2019, 283: 606−616.