李筠涵, 鲁嫚嫚, 王豪缘, 等. 辛烯基琥珀酸-脱乙酰魔芋葡甘露聚糖酯的制备工艺优化及结构表征 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(15): 289−297. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025080051

LI Junhan, LU Manman, WANG Haoyuan, et al. Preparation Optimization and Structural Characterization of Octenylsuccinated Deacetylated Konjac Glucomannan[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(15): 289−297. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025080051

· 工艺技术 ·

辛烯基琥珀酸-脱乙酰魔芋葡甘露聚糖酯的制备工艺优化及结构表征

李筠涵, 鲁嫚嫚, 王豪缘, 曾志龙, 李怡佳, 刘　雄*
（西南大学食品科学学院, 重庆 400715）

摘　要: 以脱乙酰魔芋葡甘露聚糖凝胶颗粒（deacetylated konjac glucomannan gel，DK-G）为原料，辛烯基琥珀酸酐（octenyl succinic anhydride，OSA）为酯化剂，制备高吸油性辛烯基琥珀酸脱乙酰魔芋葡甘露聚糖酯材料（deacetylated konjac glucomannan octenyl succinate gel，DK-OS）。采用 Box-Behnken 试验设计研究反应温度、pH、DK-G 浓度、OSA 与 DK-G 质量比（m_{OSA}/m_{DK-G}）4 个因素对 DK-OS 取代度和吸油率的影响，优化工艺条件，随后在最佳条件下制备高吸油率和取代度的 DK-OS，并对该材料进行红外光谱、结晶结构、疏水性及微观形貌表征。结果表明，4 个因素对 DK-OS 吸油率的影响大小顺序为 m_{OSA}/m_{DK-G}>pH>反应温度>DK-G 浓度，对取代度的影响大小顺序为 m_{OSA}/m_{DK-G}>DK-G 浓度>pH>反应温度，酯化最佳工艺为：反应温度 39 ℃，pH8.5，DK-G 浓度 2%，m_{OSA}/m_{DK-G}=1.9，反应时间 4 h，在此条件下获得的 DK-OS 取代度为 0.0623±0.0002，吸油率为 53.88±0.02 g/g。红外光谱结果表明 DK-OS 在 1727 cm^{-1}（酯基）处峰强度增强，同时在 2926、2857、1566 cm^{-1} 处出现亚甲基拉伸振动峰和羧酸盐不对称伸缩振动峰；同时观察到 DK-OS 微观结构表面有孔洞形成且变粗糙，但酯化物晶型未受影响；酯化后其水接触角从 61.5°增加至 105.3°，表面疏水性明显增加。该研究可为高吸油性膳食纤维的制备提供技术参考。

关键词: 膳食纤维, 脱乙酰魔芋葡甘露聚糖, 辛烯基琥珀酸酐, 高吸油性, 响应面
中图分类号: TS201.1　　**文献标识码:** B　　**文章编号:** 1002−0306(2026)15−0289−09
DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2025080051　　本文网刊:

Preparation Optimization and Structural Characterization of Octenylsuccinated Deacetylated Konjac Glucomannan

LI Junhan, LU Manman, WANG Haoyuan, ZENG Zhilong, LI Yijia, LIU Xiong*
（College of Food Science and Engineering, Southwest University, Chongqing 400715, China）

Abstract: In this study, highly oil-absorbing deacetylated konjac glucomannan octenyl succinate gel (DK-OS) was prepared using deacetylated konjac glucomannan gel (DK-G) as the raw material and octenyl succinic anhydride (OSA) as the esterifying agent. The Box-Behnken experimental design was employed to investigate the effects of four factors (reaction temperature, pH, DK-G concentration, and OSA and DK-G mass ratios [m_{OSA}/m_{DK-G}]) on the degree of substitution (DS) and oil absorption capacity (OAC) of DK-OS. To optimize the process conditions, DK-OS with high OAC and DS was prepared under optimal conditions. The DK-OS was further characterized via infrared spectroscopy, crystalline structure analysis, hydrophobicity assessment, and microscopic morphology. The influence of the four factors on the OAC of DK-OS followed the order of m_{OSA}/m_{DK-G}>pH>reaction temperature>DK-G concentration, whereas the order of influence on DS was m_{OSA}/m_{DK-G}>DK-G concentration>pH>reaction temperature. The optimal conditions for the esterification process were 39 °C, pH8.5, 2% DK-G concentration, m_{OSA}/m_{DK-G}=1.9, and 4 h reaction time. Under these conditions, the resulting DK-

收稿日期: 2025−08−11
基金项目: 西南大学研究生科研创新项目（SWUS24151）。
作者简介: 李筠涵（2000−）, 女, 硕士研究生, 研究方向: 食品化学与营养学, E-mail: 15123191629@163.com。
*** 通信作者:** 刘雄（1970−）, 男, 博士, 教授, 研究方向: 食品化学与营养学, E-mail: liuxiong848@hotmail.com。

OS exhibited a DS of 0.0623±0.0002 and an OAC of 53.88±0.02 g/g. Infrared spectroscopy revealed that the peak intensity of DK-OS at 1727 cm^{-1} (associated with the ester group) was enhanced after esterification. Additionally, methylene stretching vibration peaks and carboxylate asymmetric stretching vibration peaks were observed at 2926, 2857, and 1566 cm^{-1}, respectively. Notably, the pores that developed on the microstructural surface of DK-OS exhibited increased roughness, whereas the crystal form of the esterified product remained unchanged. The hydrophobic angle increased significantly from 61.5° to 105.3°, thereby reflecting a marked enhancement in surface hydrophobicity. This study provides a technical reference for the development of high-oil-absorption dietary fibers.

Key words: dietary fiber; deacetylated konjac glucomannan; octenyl succinic anhydride; highly oil-absorbent; response surface methodology

油脂摄入量超标会直接或间接地导致肥胖等多种慢性疾病发生，现代社会高油高糖的不良饮食模式已成为威胁人类健康的重要风险[1]。适量摄入膳食纤维是减少膳食油脂吸收、改善肥胖症状的有效饮食策略[2−3]。研究表明，膳食纤维能量低、饱腹感强[4]，能通过短期调节食欲避免机体摄入额外能量[5]，同时其结构中含有活性基团，可对油脂等进行螯合吸附，从而有效抑制人体对其吸收并将其排出体外，从而达到降脂减肥目的[6]。但其调节食欲、增强饱腹感的效果短暂[7]，且大量摄入会影响其他营养素如蛋白质、矿物质等吸收。同时膳食纤维普遍含有大量亲水基团，在肠道中优先吸收水分，可能影响其对油脂的吸附能力，降低减肥效果[8]。张颖等[9]研究发现，对膳食纤维进行化学改性能够改善其理化性质和生理功能，从而提高其对油脂的吸附能力。

魔芋葡甘露聚糖（konjac glucomannan，KGM）作为一种优质的水溶性膳食纤维，具有极高的黏度和水化能力，可通过增加食糜的黏度和体积而占据胃空间来延迟胃排空，产生更强的饱腹感[9]，同时具有降血脂等生理功能，相比其他膳食纤维降脂减肥效果更好[10]。此外，KGM 分子链中含有大量羟基，有利于对其进行酯化、氧化、接枝等化学改性处理[11]。但其同时含大量乙酰基，导致其吸水性极强，吸水溶胀后体系黏度过高而不利于化学反应[12]。现有研究表明脱乙酰化处理（deacetylated konjac glucomannan，DKGM）不仅能降低 KGM 黏度，同时还可能使其暴露更多羟基，为化学反应提供更多反应活性位点[13]，从而易通过改性制备高吸油性材料。因此，对 DKGM 进行化学改性开发高吸油性膳食纤维材料，对突破传统膳食纤维在人体进食后降脂减肥的局限、提升降脂效果具有重要意义。

研究表明，辛烯基琥珀酸酐（octenyl succinic anhydride，OSA）改性可显著增加淀粉、纤维素亲油性，从而提高其吸油率，且吸油能力和抗消化性随取代度增大而增强[8,14−15]。但目前制备的辛烯基琥珀酸膳食纤维酯吸油率和取代度均较低[14,16]，原因可能在于其吸油形式较单一，仅依靠化学吸附；同时，缺乏对影响 OSA 酯化及吸油的条件进行优化，限制了取代度和吸油率的提升。以 DKGM 作为酯化原料，可避免 KGM 高黏度对酯化反应的不利影响，同时提供更多反应活性位点以制备高取代度的产物；并且脱乙酰后 KGM 分子间的相互作用增强，形成交联网络，能有效提高油脂吸附能力。因此，本文先对 KGM 进行脱乙酰化加热形成脱乙酰魔芋葡甘露聚糖凝胶颗粒（deacetylated konjac glucomannan octenyl succinate gel，DK-G），然后以 OSA 为酯化剂进行酯化改性制备高吸油性辛烯基琥珀酸脱乙酰魔芋葡甘露聚糖酯凝胶颗粒（deacetylated konjac glucomannan octenyl succinate gel，DK-OS），以吸油率（oil absorption capacity，OAC）和取代度（degree of substitution，DS）为指标，通过单因素实验和响应面法优化酯化工艺，并采用红外光谱、X 射线衍射、扫描电子显微镜、水接触角对 DK-OS 进行结构表征，探究其吸油机制，为其在吸油降脂等领域的应用提供参考。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

花魔芋精粉　纯度 95%，湖北十堰花仙子魔芋制品有限公司；2-辛烯基琥珀酸酐　上海源叶生物科技有限公司；食用大豆油　中粮福临门食品营销有限公司；碳酸钠、氢氧化钠等试剂均为分析纯　重庆跃翔化工有限公司。

LGJ-10 真空冷冻干燥机　北京松源华兴科技发展有限公司；HCJ-4E 磁力搅拌水浴锅　常州朗越仪器制造有限公司；Phenom Pro10102 型扫描电镜　荷兰 Phenom World 公司；Spectrum Two 傅里叶变换红外光谱仪　美国 PE 公司；AXTG16G 型离心机　盐城市安信实验仪器有限公司；Bruker D8Advance X 射线衍射仪　德国布鲁克分析仪器公司；SDC-500 光学接触角测量仪　东莞市晟鼎精密仪器有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1 DK-G 的制备　准确称取 20 g KGM 缓慢倒入装有 950 mL 蒸馏水的烧杯中，于磁力搅拌条件下（400 r/min）在 30 ℃ 水浴中溶胀 1 h，然后加入 0.6 g 碳酸钠（用 50 mL 蒸馏水稀释）搅拌混合均匀后 8000 r/min 离心 2 min 以脱除气泡，将其转移至 100 ℃ 加热 1 h 形成热不可逆凝胶，最后冷却至室温后置于−40 ℃ 预冻 12 h，经真空冷冻干燥 48 h 后过 40 目筛得到 DK-G。参考 LI 等[17]的方法测定 DK-G 的脱乙酰度。经测定，DK-G 脱乙酰度为 47%。

1.2.2　DK-OS 的制备　参照宋雅婷[18]的方法并稍作修改。在磁力搅拌条件下(350 r/min)，于烧杯中缓慢加入 DK-G 配制成一定浓度的溶液，待温度稳定后用 0.5 mol/L NaOH 溶液调节至指定 pH。在 30 min内分 3 批加入 OSA 溶液(用无水乙醇稀释三倍，v/v)，并用 0.5 mol/L NaOH 溶液维持 pH 在一定范围内(指定 pH±0.05)。反应一定时间后用 0.1 mol/L HCl溶液调节 pH 至 6.5 左右以结束反应。将反应液转移至 3 倍体积的无水乙醇中沉淀 2 h，400 目滤布过滤后用无水乙醇重复洗涤 3 次后于通风橱挥发过夜，经真空冷冻干燥 12 h 后过 40 目筛得到 DK-OS。

1.2.3　单因素实验　参考王雅楠等[19]酯化燕麦淀粉的工艺并稍作修改。以吸油率和取代度为指标，实验方法同 1.2.2。以反应温度 40 ℃、pH8.5、时间 4 h、DK-G 浓度 1%、$m_{OSA}/m_{DK\text{-}G}$=1 为固定条件。改变温度(20、30、40、50、60 ℃)、pH(7.5、8、8.5、9、9.5)、时间(1、2、4、6、8 h)、DK-G 浓度(0.5%、1%、1.5%、2%、2.5%)、$m_{OSA}/m_{DK\text{-}G}$(0.5、1、1.5、2、2.5)，测定 DK-OS 吸油率和取代度的变化。

1.2.4　响应面试验优化　在单因素实验基础上，固定反应体系时间为 4 h，选取反应温度(A)、反应体系 pH(B)、DK-G 浓度(C)及 $m_{OSA}/m_{DK\text{-}G}$ 比例(D)4 个因素探究其对 DK-OS 吸油率和取代度的影响。采用 Box-Behnken 试验设计原理设计响应面，其因素与水平见表 1。

表 1　Box-Behnken 试验因素水平

Table 1　Factors and levels of Box-Behnken design

水平	因素			
	A温度(℃)	B pH	C DK-G浓度(%)	D $m_{OSA}/m_{DK\text{-}G}$
1	30	8	1.5	1.5
0	40	8.5	2	2
−1	50	9	2.5	2.5

1.2.5　取代度的测定　参照梁叶星等[20]的方法并作适量修改。准确称取 0.2000 g 的 DK-OS 样品于 100 mL 试管中，加入 1 mL 无水乙醇润湿，再加入 50 mL 蒸馏水和 400 μL 0.5 mol/L NaOH 溶液，置于 60 ℃ 磁力搅拌水浴锅磁力搅拌 2 h 后加入 2 滴酚酞指示剂，用 0.01 mol/L 盐酸溶液趁热滴定至粉红色刚好消失，记录消耗的盐酸体积数 V_1。同时用 DK-G 做空白实验，记录消耗的盐酸体积数 V_0，根据公式(1)(2)计算取代度。

$$A = \frac{c \times (v_0 - v_1)}{m} \qquad 式（1）$$

$$DS = \frac{162.4 \times A}{1000 - 210 \times A} \qquad 式（2）$$

式中：A 为每克样品消耗 0.01 mol/L 盐酸标准溶液的物质的量，mmol/g；v 为样品消耗盐酸标准溶液的滴定体积，mL；c 为盐酸标准溶液的浓度，mol/L；m 为样品质量，g；162.4 为葡萄糖残基的摩尔质量，g/mol；210 为辛烯基琥珀酸酐的摩尔质量，g/mol。

1.2.6　吸油率的测定　参照胡建雪[16]的方法并作适量修改。准确加入 15 mL 蒸馏水和 15 mL 大豆油于 50 mL 离心管中，充分混合均匀形成油水混合物以模拟油糜状态。加入 0.2000 g 样品(M)混合均匀后在 37 ℃ 水浴锅 160 r/min 振荡 30 min，静置 10 min 后除去上层未吸附的油脂，用石油醚萃取黏附在管壁的 DK-OS 和油水混合物 3 次后，将混合物转移至质量为 M_0 的铝盒置于通风橱挥发，待石油醚挥发完全后置于 105 ℃ 烘箱烘干至恒重，称重记为 M_1，根据公式(3)计算吸油率 Q。

$$Q = \frac{M_1 - M_0 - M}{M} \qquad 式（3）$$

1.2.7　样品吸油后状态观察　将 1.2.1 制备的 DK-G 以及按 1.2.4 确定的最佳工艺条件制备的 DK-OS，均采用 1.2.6 中的方法进行吸油处理。将吸油后的样品经 3000 r/min 离心 10 min 后，对其状态进行拍照观察。

1.2.8　红外光谱(FTIR)分析　取适量样品粉末添加至样品室晶体表面，并使用螺旋杆压紧样品进行测定，扫描背景为空气，光谱扫描范围设置为 4000~600 cm^{-1}，分辨率为 32 cm^{-1}，扫描次数为 16。测定 OSA 时，直接将 OSA 液体滴加在样品室晶体表面，无需螺旋杆接触加压，其余测试条件保持一致。

1.2.9　扫描电子显微镜(SEM)表征　将样品固定于导电胶上，喷金处理后在 10 kV 电压条件下用扫描电子显微镜分别放大 300 和 1000 倍对样品颗粒进行形态分析。

1.2.10　X-射线衍射(XRD)分析　取适量干燥样品进行测定，实验条件为：实验靶材为铜靶材；扫描速度为 10°/min，衍射角范围为 5°~60°(2θ)。

1.2.11　接触角测定　用红外压片机将样品压制成厚度约为 1 mm 且表面完整光滑的薄片，采用高精度注射器将 2 μL 超纯水滴在薄片表面，使用接触角测量仪迅速拍照记录样品的接触角数值。

1.3　数据处理

以上实验均重复 3 次，所有数据采用 SPSS 27 软件进行方差分析，所得结果均以平均值±标准偏差表示，P<0.05 表示显著，P<0.01 表示极显著，采用 Origin 2025 软件作图，响应面分析通过 Design-Expert 13.0 软件进行。

2　结果与分析

2.1　单因素实验结果分析

2.1.1　温度对 DK-OS 取代度和吸油率的影响　如图 1 所示，温度对 DK-OS 取代度影响显著(P<0.05)，当温度低于 40 ℃ 时，取代度随着反应温度升高从 0.0312 增加到 0.0358，可能是因为反应温度的升高提高了 OSA 与 DK-G 的有效碰撞几率；而当温度高于 40 ℃ 时，取代度随温度升高从 0.0358 降低至

0.0135, 原因是高温会加快 OSA 水解速度从而降低反应效率[21−22]。在 60 ℃ 时, OSA 取代度只有 0.0135, 过高的温度可能会导致生成的 DK-OS 酯键水解从而降低取代度。DK-OS 吸油率变化趋势与取代度一致, 在 40 ℃ 达到最大(36.37 g/g), 因此选择体系温度 40 ℃ 为中心点进行下一步试验。

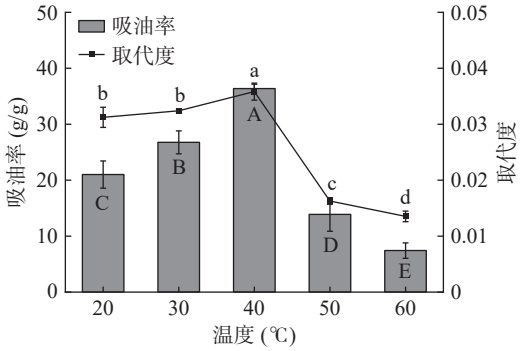


图 1 温度对 DK-OS 吸油率和取代度的影响

Fig.1 Effect of temperature on the OAC and DS of DK-OS

注: 不同大写字母表示吸油率在 $P<0.05$ 水平差异显著; 不同小写字母表示取代度在 $P<0.05$ 水平差异显著, 图 2~图 5 同。

2.1.2 pH 对 DK-OS 取代度和吸油率的影响 如图 2 所示, 随着 pH 的增加, DK-OS 取代度先增大后减小, 吸油率的变化趋势与取代度一致, 均在 pH 为 8.5 时达到最大, 分别为 0.0365、35.93 g/g。原因可能是取代度越大, 接上的疏水基团越多, 从而在油水混合体系更疏水亲油, 因此 DK-OS 取代度越大, 吸油率越高。OSA 的酯化反应是可逆亲核取代反应[21], 当 pH 小于 8.5 时, 此时溶液碱性极弱, DK-G 羟基的去质子化程度不够, 生成的烷氧基负离子少, 亲核性弱, 难以有效进攻 OSA 的酸酐基团, 从而降低反应速率和取代度; 而当 pH 大于 8.5 时, OSA 发生水解反应, 反应物减少不利于酯化反应正向进行, 同时 pH 过高可能导致生成的 DK-OS 水解[23], 导致取代度降低。因此选择体系 pH8.5 为中心点进行下一步试验。

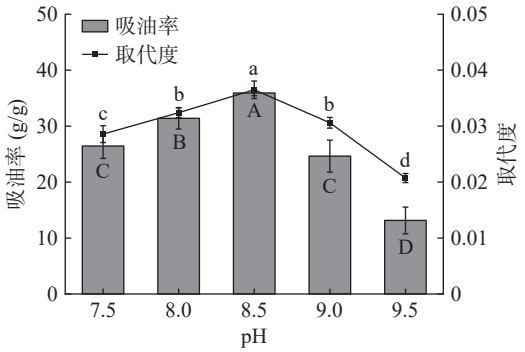


图 2 pH 对 DK-OS 吸油率和取代度的影响

Fig.2 Effect of pH on the OAC and DS of DK-OS

2.1.3 时间对 DK-OS 取代度和吸油率的影响 由图 3 可知, 在反应初始 2 h 内, DK-OS 取代度随时间延长而明显增加, 反应到 4 h 时达到最大(0.0397), 继续延长反应时间, 取代度略有下降, 该现象与石剑等[24] 的研究一致。原因可能是酯化过程中酯化和水解反应同时发生, 在反应初始阶段, 反应物 OSA 浓度高、产物 DK-OS 浓度低, 酯化反应占主导地位; 随着反应时间延长, OSA 逐渐被耗尽, 产物 DK-OS 浓度增大, 副反应水解反应占主导, DK-OS 逐渐水解, 且水解生成的 OSA 与碱反应, 最终酯化反应和水解反应趋向平衡[25], 取代度变化不明显。DK-OS 吸油率变化趋势与取代度一致, 在 4 h 时达到最大为 33.15 g/g, 因此确定反应时间为 4 h。

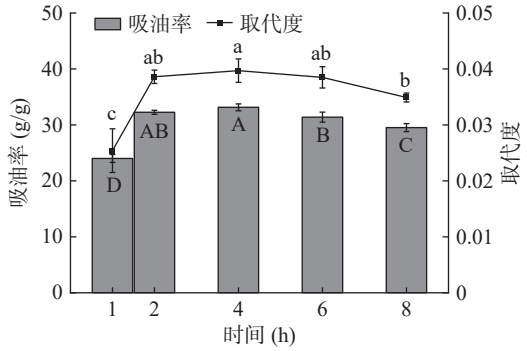


图 3 时间对 DK-OS 吸油率和取代度的影响

Fig.3 Effect of time on the OAC and DS of DK-OS

2.1.4 DK-G 浓度对 DK-OS 取代度和吸油率的影响 由图 4 可知, 取代度随 DK-G 浓度增大而先增大后略微减小, 在 2% 时达到最大(0.0392), 这可能是因为在低浓度条件下增加 DK-G 浓度可以增加 DK-G 和 OSA 的碰撞几率, 有利于酯化反应正向进行。当继续提高 DK-G 浓度时, 体系黏度上升不易搅拌, OSA 不能均匀分散在反应体系中, 不利于 OSA 与 DK-G 上的羟基接触, 反应不均匀导致取代度略有下降[21]。吸油率变化趋势与取代度一致, 当浓度为 2% 吸油率最大, 为 39.37 g/g, 故选择 DK-G 浓度 2% 为中心点进行下一步试验。

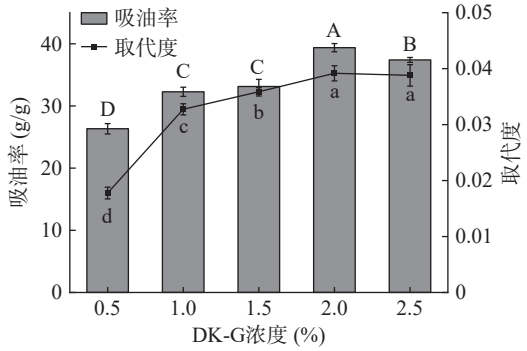


图 4 DK-G 浓度对 DK-OS 吸油率和取代度的影响

Fig.4 Effect of DK-G concentration on the OAC and DS of DK-OS

2.1.5 m_{OSA}/m_{DK-G} 对 DK-OS 取代度和吸油率的影响 由图 5 可知, 酯化剂 OSA 添加比例对 DK-OS 取代度影响显著($P<0.05$), 当 OSA 与 DK-G 质量比(m_{OSA}/m_{DK-G})从 0.5 增至 2 时, 取代度显著上升并达

到最大值(P<0.05)；继续将该比例提高至 2.5，取代度则略有下降(P>0.05)。这一现象可从反应机理角度解释：OSA 的酯化反应具有可逆性，在 OSA 浓度较高时，反应正向进行趋势增强，且 DK-G 与 OSA 的碰撞速率加快，取代度增加。但当 OSA 用量增加到一定程度后，DK-G 分子表面的羟基可能被 OSA 充分占据，导致空间位阻效应增强[25]；同时，由于 OSA 不溶于水，过量的 OSA 易以油滴形式悬浮于体系表面，难以均匀分散，从而导致酯化不均匀。此外，大量 OSA 的加入会使反应体系需要更多碱液维持 pH 稳定，这可能使 OSA 更容易与 OH-发生水解反应生成副产物羧酸氢钠和无法与 DK-G 发生酯化的辛烯基琥珀二酸钠[24]，降低了 OSA 与 DK-G 的反应概率，从而进一步导致取代度下降。当 $m_{OSA}/m_{DK\text{-}G}$ 为 2 时，取代度和吸油率均达到最大，分别为 0.0614、45.05 g/g，故选择 $m_{OSA}/m_{DK\text{-}G}$ 为 2 为中心点进行下一步试验。

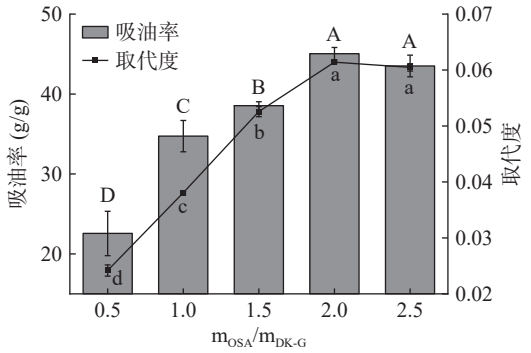


图 5　$m_{OSA}/m_{DK\text{-}G}$ 比例对 DK-OS 吸油率和取代度的影响

Fig.5　Effect of $m_{OSA}/m_{DK\text{-}G}$ ratios on the OAC and DS of DK-OS

2.2　响应面试验结果分析

2.2.1　模型的建立与显著性分析　响应面设计具体试验方案见表 2。对表 2 试验数据进行多元线性回归分析，得到吸油率、取代度与反应温度(A)、pH(B)、DK-G 浓度(C)和 $m_{OSA}/m_{DK\text{-}G}$(D)之间的二次多元回归方程为：Y_1(吸油率)=53.71−1.05A+1.87B+1.02C−3.42D+1.89AB−2.94AC+3.78AD−3.15BC+4.06BD+1.86CD−12.14A^2−8.32B^2−16.08C^2−9.25D^2；Y_2(取代度)=0.0620−0.0014A+0.0016B+0.0024C−0.0048D+0.0025AB−0.0039AC+0.0051AD−0.0029BC+0.0056BD+0.0033CD−0.0108A^2−0.0071B^2−0.0179C^2−0.0087D^2。

通过软件对上述结果进行方差分析，结果见表 3 和表 4，结果显示方程 Y_1(吸油率)、Y_2(取代度)模型的 F 值分别为 109.45、36.03，且模型的拟合程度均极为显著(P<0.01)，能够比较准确反映每个因素与响应值的关系。两个方程的决定系数 R^2 分别为 0.9909、0.9730，表明模型的相关性较好；均满足预测 R^2 与调整 R^2 差值小于 0.2。

对影响吸油率的四个因素进行显著性检验，一次项 B、D，二次项 A^2、B^2、C^2、D^2，交互项 AC、AD、BC、BD 影响极显著(P<0.01)。四个因素对吸油率的影响程度为：D>B>A>C。对于取代度，一次项 C、

表 2　Box- Behnken 试验设计结果

Table 2　Design and results of Box-Behnken

试验号	A温度	B pH	C DK-G浓度	D $m_{OSA}/m_{DK\text{-}G}$	Y_1吸油率(g/g)	Y_2 DS
1	−1	−1	0	0	34.44±0.50	0.0453±0.0006
2	1	−1	0	0	27.72±0.99	0.0365±0.0010
3	−1	1	0	0	34.44±0.97	0.0464±0.0010
4	1	1	0	0	35.28±0.25	0.0474±0.0011
5	0	0	−1	−1	31.08±0.09	0.0401±0.0009
6	0	0	1	−1	30.52±0.17	0.0393±0.0005
7	0	0	−1	1	21.96±0.11	0.0245±0.0017
8	0	0	1	1	28.84±0.15	0.0369±0.0007
9	−1	0	0	−1	40.04±1.00	0.0527±0.0008
10	1	0	0	−1	30.8±0.66	0.0396±0.0012
11	−1	0	0	1	24.92±0.09	0.0328±0.0010
12	1	0	0	1	30.8±0.02	0.0403±0.0022
13	0	−1	−1	0	22.68±1.13	0.0286±0.0012
14	0	1	−1	0	31.64±0.07	0.0343±0.0011
15	0	−1	1	0	31.92±0.03	0.0433±0.0003
16	0	1	1	0	28.28±0.08	0.0372±0.0005
17	−1	0	−1	0	24.36±0.01	0.0313±0.0004
18	1	0	−1	0	28.56±0.07	0.0376±0.0002
19	−1	0	1	0	30.24±0.02	0.0388±0.0003
20	1	0	1	0	22.68±0.02	0.0296±0.0007
21	0	−1	0	−1	42.56±0.05	0.0560±0.0044
22	0	1	0	−1	39.2±0.04	0.0488±0.0001
23	0	−1	0	1	26.88±0.04	0.0344±0.0010
24	0	1	0	1	39.76±0.04	0.0498±0.0013
25	0	0	0	0	54.12±0.16	0.0626±0.0011
26	0	0	0	0	54.03±0.18	0.0605±0.0008
27	0	0	0	0	52.43±0.09	0.0610±0.0007
28	0	0	0	0	53.95±0.07	0.0615±0.0004
29	0	0	0	0	54.02±0.06	0.0642±0.0010

表 3　回归方程的方差分析(吸油率)

Table 3　Variance analysis of regression equation (OAC)

方差来源	平方和	自由度	均方差	F值	P值	显著性
模型	2893.97	14	206.71	109.45	<0.0001	**
A-温度	13.23	1	13.23	7.00	0.0192	*
B-pH	41.81	1	41.81	22.14	0.0003	**
C-DK-G浓度	12.40	1	12.40	6.57	0.0226	*
D-$m_{OSA}/m_{DK\text{-}G}$	140.36	1	140.36	74.31	<0.0001	**
AB	14.29	1	14.29	7.57	0.0156	*
AC	34.57	1	34.57	18.31	0.0008	**
AD	57.15	1	57.15	30.26	<0.0001	**
BC	39.69	1	39.69	21.01	0.0004	**
BD	65.93	1	65.93	34.91	<0.0001	**
CD	13.84	1	13.84	7.33	0.0170	*
A^2	955.45	1	955.45	505.88	<0.0001	**
B^2	449.19	1	449.19	237.83	<0.0001	**
C^2	1676.49	1	1676.49	887.65	<0.0001	**
D^2	555.20	1	555.20	293.96	<0.0001	**
残差	26.44	14	1.89			
失拟项	24.38	10	2.44	4.73	0.0739	不显著
纯误差	2.06	4	0.5157			
总和	2920.41	28				

注：**代表极显著水平P<0.01，*代表显著水平P<0.05，表4同。

表 4 回归方程的方差分析(DS)

Table 4 Variance analysis of regression equation (DS)

方差来源	平方和	自由度	均方差	*F*值	*P*值	显著性
模型	0.0034	14	0.0002	36.03	<0.0001	**
A-温度	0.0000	1	0.0000	3.28	0.0916	
B-pH	0.0000	1	0.0000	4.84	0.0451	*
C-DK-G浓度	0.0001	1	0.0001	10.17	0.0066	**
D-m_{OSA}/m_{DK-G}	0.0003	1	0.0003	41.25	<0.0001	**
AB	0.0000	1	0.0000	3.56	0.0802	
AC	0.0001	1	0.0001	8.90	0.0099	**
AD	0.0001	1	0.0001	15.72	0.0014	**
BC	0.0000	1	0.0000	5.16	0.0394	*
BD	0.0001	1	0.0001	18.92	0.0007	**
CD	0.0000	1	0.0000	6.45	0.0235	*
A^2	0.0008	1	0.0008	112.90	<0.0001	**
B^2	0.0003	1	0.0003	48.80	<0.0001	**
C^2	0.0021	1	0.0021	309.28	<0.0001	**
D^2	0.0005	1	0.0005	73.18	<0.0001	**
残差	0.0001	14	0.0000			
失拟项	0.0001	10	0.0000	3.95	0.0989	不显著
纯误差	0.0000	4	0.0000			
总和	0.0035	28				

D, 二次项 A^2、B^2、C^2、D^2, 交互项 AC、AD、BD 影响极显著(P<0.01)。四个因素对 DS 的影响程度为: D>C>B>A。结果表明, 建立的响应面模型可以很好地解释响应值的变化规律, 为进一步优化 DK-OS 吸油率和取代度的酯化工艺奠定了基础。

2.2.2 响应面交互作用分析 图 6、图 7 揭示了各因素间的交互作用对响应值吸油率和取代度的影响规律。响应面斜率越陡峭, 表明两因素交互作用对响应值的影响越显著。从图 6B~6E 中可以观察到 AC、AD、BC、BD 的斜率较陡, 这说明温度和 DK-G 浓度、温度和 m_{OSA}/m_{DK-G}、pH 和 DK-G 浓度、pH 和 m_{OSA}/m_{DK-G} 的互作关系对吸油率的影响更为突出。各交互因素作用对吸油率影响程度的轻重顺序为: BD>AD>BC>AC>AB>CD, 与方差分析结果一致。由图 7 可以看出响应面均呈现向下开口的形状, 这说明当各因素的水平增加时, 取代度将逐步提高, 直至达到一个峰值, 之后取代度将逐渐降低。因素 AC、AD、BD 的斜率较陡, 这说明温度和 DK-G 浓度、温度和 m_{OSA}/m_{DK-G}、pH 和 m_{OSA}/m_{DK-G} 的互作关系对取代度的影响更为突出。各交互因素作用对取代度影响程度的轻重顺序为: BD>AD>AC>CD>BC>AB, 与方差分析结果一致。

2.2.3 结果优化及验证 采用 Design-Expert 13.0 软件进行工艺优化, 当温度 38.99 ℃、pH8.51, DK-G 浓度 2.02%、m_{OSA}/m_{DK-G} 1.88 时, 可得到最高的吸油率和取代度: 吸油率和取代度预测值分别为 54.09 g/g、0.0628。考虑到实际操作条件的可行性, 将最优条件参数调整为: 温度 39 ℃、pH8.5, DK-G 浓度 2%, m_{OSA}/m_{DK-G} 1.9, 在此条件下进行三次平行验证实验以确保实验的可重复性与数据的可靠性, 测得吸油率和取代度分别为 53.88±0.02 g/g、0.0623±0.0002, 与预测值的相对误差分别为 0.39% 和 0.80%, 表明实际结果与预测值非常接近, 充分证实了该模型的准确性与可靠性。

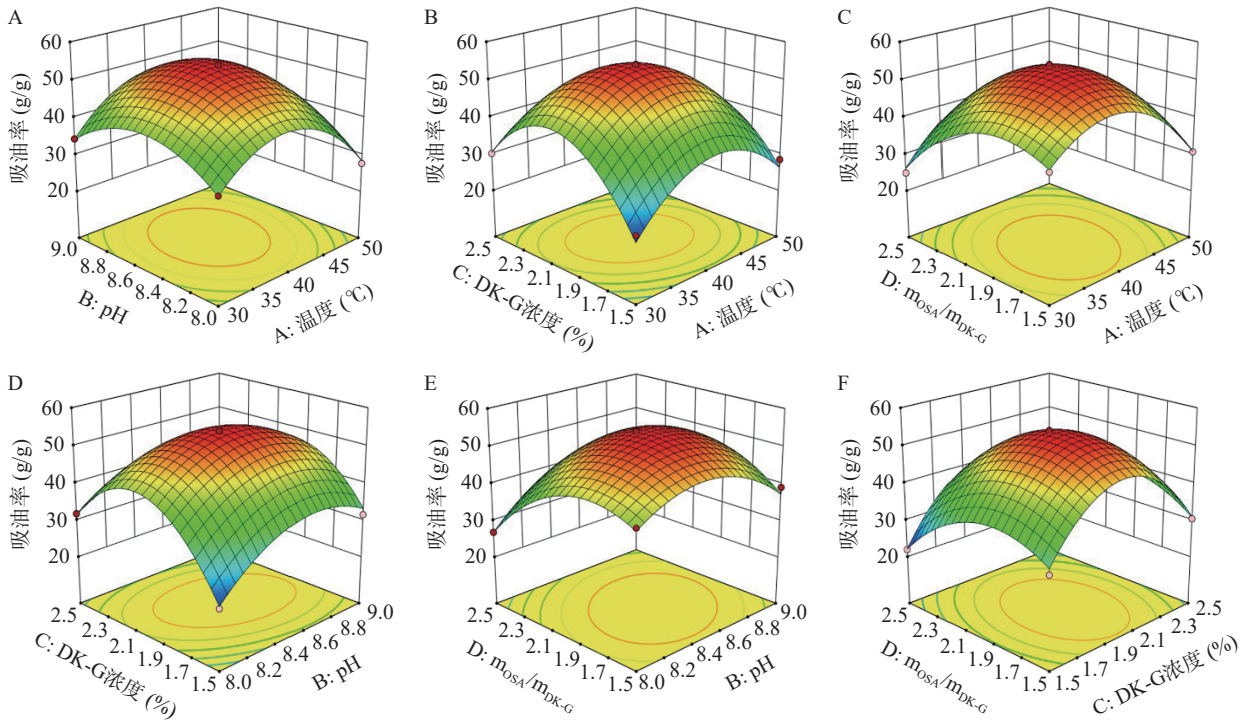


图 6 各因素交互作用对 DK-OS 吸油率的影响

Fig.6 Effects of the interactions of various factors on the OAC of DK-OS

注: A. pH 和温度; B. DK-G 浓度和温度; C. m_{OSA}/m_{DK-G} 和温度; D. DK-G 浓度和 pH、E. m_{OSA}/m_{DK-G} 和 pH、F m_{OSA}/m_{DK-G} 和 DK-G 浓度; 图 7 同。

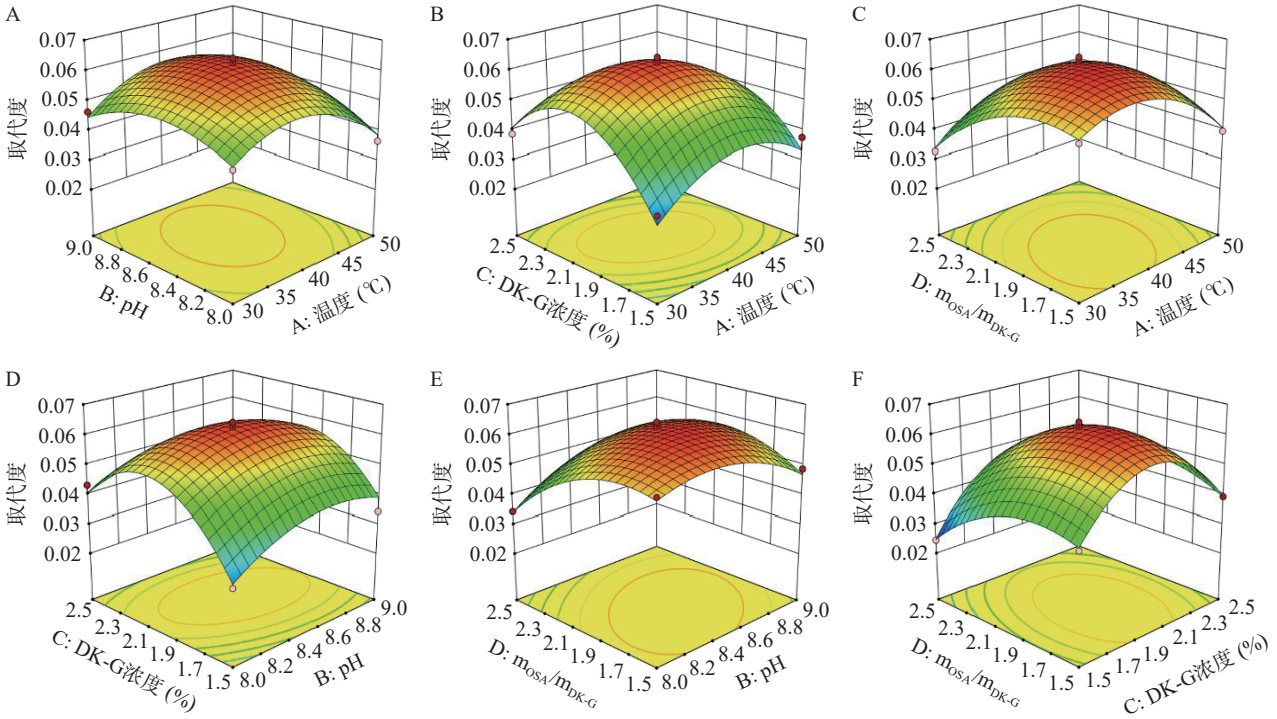


图 7　各因素交互作用对 DK-OS 取代度的影响

Fig.7　Effects of the interactions of various factors the DS of DK-OS

2.2.4　DK-OS 和 DK-G 吸油后状态观察　如图 8 所示，在油水混合体系下，DK-OS 吸油后油水未分层且为黏稠状，而 DK-G 吸油后只存在于水相中，且油水分层。3000 r/min 离心 10 min 后，DK-OS 稍有油脂析出，而 DK-G 混合体系油水分层现象更加明显。主要原因在于：首先，DK-OS 取代度高，分子表面含有的大量疏水基团可能通过范德华力等分子间相互作用力将油分子牢固吸附；其次，酯化可能导致 DK-OS 乳化性和黏度增加[25]，且其本身具有的凝胶网络结构使得 DK-OS 吸油后形成黏稠体系可将油脂物理包裹在内部[26]，形成稳定的复合体。因此，DK-OS 对油脂的吸附能力的提高是化学和物理作用的共同结果[16]。

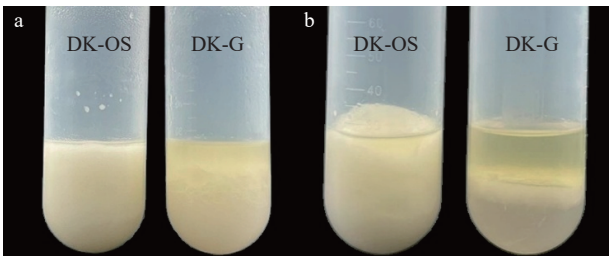


图 8　DK-OS 吸油后状态

Fig.8　State of DK-OS after the oil absorption

注：a 为离心前；b 为离心后。

2.3　DK-OS 结构表征分析

2.3.1　FT-IR 分析　图 9 为 OSA、DK-G 及 DK-OS 的 FTIR 光谱。OSA 中 1862 cm^{-1} 和 1778 cm^{-1} 处为酸酐羰基的对称拉伸振动和不对称振动峰，这是酸酐的特征结构；在 2857、2926 cm^{-1} 处对应-CH_2 拉伸振动峰[27]。DK-G 和 DK-OS 图谱中，3343 cm^{-1} 由 O-H 伸缩振动引起，DK-OS 相较 DK-G 在此处峰强度减弱、峰型降低，说明在酯化过程中 DK-G 分子上的羟基可能与 OSA 发生了反应[28]。1727 cm^{-1} 左右为羰基(C=O)伸缩振动峰，DK-G 由 KGM 脱乙酰化加热形成，分子残留部分乙酰基，因此，在 DK-G 的 FT-IR 光谱为乙酰基吸收峰[28]。而在 DK-OS 的 FT-IR 图谱上此段吸收峰明显增强，说明 DK-G 经 OSA 酯化成功且引入了酯羰基(C=O)基团。DK-OS 与 DK-G 的 FT-IR 光谱形状相似，这表明 OSA 酯化没有改变 DK-G 主要分子骨架。同时 DK-OS 在 2857、2926、1566 cm^{-1} 处均出现新的特征吸收峰，说明 DK-G 经 OSA 酯化后成功引入了-CH_2、RCOO-基团，其中 1566 cm^{-1} 为羧酸盐 RCOO-的不对称伸缩振动峰[29]。DK-OS 在 1778 cm^{-1} 和 1862 cm^{-1} 处均没有明显的环酸酐特征吸收峰，这说明 DK-OS 中无 OSA 残留[27]。

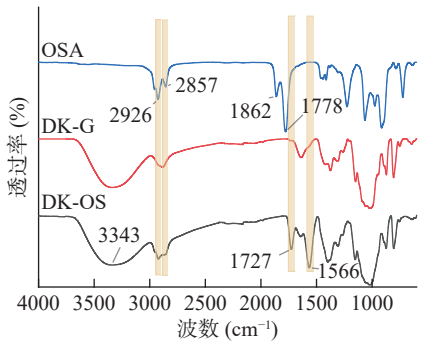


图 9　DK-G、DK-OS、OSA 的红外光谱

Fig.9　FTIR spectra of DK-G, DK-OS and OSA

2.3.2 SEM 分析 由图 10 可知，酯化前 DK-G 整体呈现疏松、大孔层状纤维结构，表面相对光滑且孔壁薄；酯化改性后 DK-OS 整体呈现团聚颗粒状，表面变粗糙、凹凸不平，且有微小孔洞形成，这种结构增大了 DK-OS 的表面积，有利于油脂的吸附与装载。这可能是因为 DK-G 酯化后引入了疏水辛烯基链，分子间疏水作用增强，导致 DK-OS 分子上的疏水基团通过疏水相互作用相互吸引，促使分子发生聚集[30]。同时，酯化反应发生在碱性溶液中，DK-G 可能发生不完全脱乙酰化，导致表面粗糙[28]。

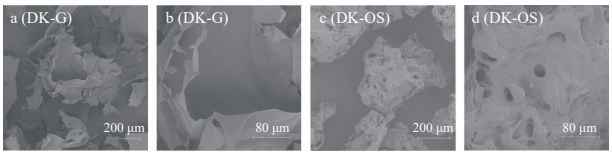


图 10 DK-G 和 DK-OS 的扫描电镜图
Fig.10 SEM images of DK-G and DK-OS
注：a、c 为放大 300×；b、d 为放大 1000×。

2.3.3 XRD 分析 由图 11 可知，DK-OS 与 DK-G 的 XRD 图谱相似，在 19.8°附近显示出扩散峰，表明二者均为无定形结构，对 DK-G 进行酯化不会改变其原有的晶型，该结果与 Meng 等[31] 的研究一致。但与 DK-G 相比，DK-OS 在 19.8°左右的衍射峰强度增加，这种增加可能归因于 DK-G 在酯化过程中再次脱乙酰化而发生的自卷曲和自聚集，促进体系中的分子开始转变为有序排列的晶体结构[32]。同时，引入的疏水基团产生的疏水相互作用可能使分子间的结合更加紧密，形成相对稳定的聚集态结构，导致特征峰强度增加[18]。

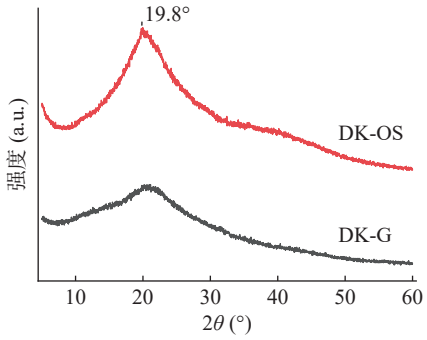


图 11 DK-G 和 DK-OS 的 XRD 图
Fig.11 XRD patterns of DK-G and DK-OS

2.3.4 接触角分析 接触角可用于反映固体表面化学组成、粗糙度、液体表面张力等特性，其大小受到多种因素的影响，其中固体表面的亲/疏水基团组成和粗糙度是最核心的影响因素。接触角<90°为亲水性，接触角为>90°为疏水性[33]。由图 12 可知，DK-G 的接触角为 61.5°，经 OSA 酯化改性后增加到 105.3°，表明 DK-G 发生了由亲水性转向疏水性的转变。原因是 DK-G 在被 OSA 酯化过程中部分羟基与 OSA 结合形成酯键，导致亲水的羟基数量减少，同时分子中引入大量疏水基团辛烯基侧链[27]，导致 DK-OS 表面疏水性提高，进一步证明改性成功。SEM 分析（图 10）也表明 DK-G 经 OSA 酯化改性后表面由光滑变得粗糙，在一定程度上可能也增加了 DK-OS 的疏水性。

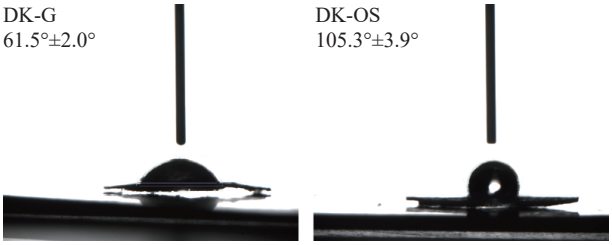


图 12 DK-G 和 DK-OS 的接触角
Fig.12 Contact angle of DK-G and DK-OS

3 结论

本研究以 OSA 为酯化剂对 DK-G 进行改性，并通过单因素和响应面法进行优化。单因素结果表明 DK-OS 的吸油率变化趋势与取代度一致，响应面结果显示各因素对吸油率的影响大小为：$m_{OSA}/m_{DK\text{-}G}$>pH>反应温度>DK-G 浓度，对取代度的影响大小为：$m_{OSA}/m_{DK\text{-}G}$>DK-G 浓度>pH>反应温度，获得的最佳工艺为：温度 39 ℃，pH8.5，DK-G 浓度 2%，$m_{OSA}/m_{DK\text{-}G}$=1.9，反应时间 4 h，此条件下制备的 DK-OS 取代度为 0.0623±0.0002，吸油率为 53.88±0.02 g/g。高取代度 DK-OS 增强了其对油脂的结合力，且自身的凝胶网络结构可能增加了其对油脂的包裹作用，从而获得了较高的油脂吸附能力。DK-G 经 OSA 酯化后形成酯键且引入大量辛烯基侧链，疏水性明显增加，从亲水性材料转变为双亲性材料。酯化发生在无定形区域，因此未改变其晶体结构，但 DK-OS 颗粒表面形成了孔洞且变得粗糙，这种特殊的表面结构增加了其吸油性。但其吸油能力是否受胃酸、肠道环境（如 pH、消化酶等）的影响尚不清楚，下一步将探究其在肠道的吸油降脂能力并验证其安全性，为其作为高吸油性膳食纤维的实际应用提供更可靠的依据。

© 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] LIU J T, YAO H Y, YU S C, et al. Joint association of metabolic health and obesity with ten-year risk of cardiovascular disease among Chinese adults[J]. Biomedical and Environmental Sciences, 2022, 35(1): 13−21.
[2] 袁永凯, 徐菲菲, 刘飞, 等. 增稠可溶膳食纤维在减肥/控重领域的研究进展[J]. 中国食品添加剂, 2022, 33(12): 32−40. [YUAN Y K, XU F F, LIU F, et al. Research progress of thickened soluble dietary fiber in weight loss/weight control[J]. China Food Additives, 2022, 33(12): 32−40.]
[3] DEEHAN E C, MOCANU V, MADSEN K L. Effects of dietary fibre on metabolic health and obesity[J]. Nature Reviews. Gastroenterology & Hepatology, 2024, 21(5): 301−318.
[4] AKHLAGHI M, GHOBADI S, ZARE M. Effect of nuts on energy intake, hunger, and fullness, a systematic review and meta-

analysis of randomized clinical trials[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2020, 60(1): 84−93.
[5] XIA P K, LI B, YU Y D, et al. Dietary strategies for appetite regulation: satiety and obesity management[J]. Food & Function, 2025, 16(13): 5201−5218.
[6] 刘秉书, 吴淑华, 孙谕莹, 等. 挤压豌豆纤维粉制备的不可溶膳食纤维油脂吸附能力研究[J]. 食品研究与开发, 2020, 41(9): 50−55. [LIU B S, WU S H, SUN Y Y, et al. Study on the adsorption capacity of insoluble dietary fiber oil prepared from extruded pea fiber powder[J]. Food Research and Development, 2020, 41(9): 50−55.]
[7] DELARGY H J, O'SULLIVAN K R, FLETCHER R J, et al. Effects of amount and type of dietary fibre (soluble and insoluble) on short-term control of appetite[J]. International Journal of Food Sciences & Nutrition, 1997, 48(1): 67−77.
[8] YAN J A, HU J X, YANG R J, et al. Innovative nanofibrillated cellulose from rice straw as dietary fiber for enhanced health benefits prepared by a green and scale production method[J]. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 2018, 6(3): 3481−3492.
[9] 张颖, 王早兰, 王晓宇, 等. 膳食纤维改性方法研究进展[J/OL]. 食品与发酵工业, 2025: 1−15. https://doi.org/10.13995/j.cnki.11-1802/ts.043135. [ZHANG Y, WANG Z L, WANG X Y, et al. Research progress on modification methods of dietary fiber [J/OL]. Food and Fermentation Industries, 2025: 1−15. https://doi.org/10.13995/j.cnki.11-1802/ts.043135.]
[10] CHEN H L, NIE Q X, HU J L, et al. Hypoglycemic and hypolipidemic effects of glucomannan extracted from konjac on type 2 diabetic rats[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2019, 67(18): 5278−5288.
[11] 李娜, 罗学刚. 魔芋葡甘聚糖理化性质及化学改性现状[J]. 食品工业科技, 2005, 26(10): 187−190. [LI N, LUO X G. The physicochemical properties and chemical modification status of konjac glucomannan[J]. Science and Technology of Food Industry, 2005, 26(10): 187−190.]
[12] GUO L P, YOKOYAMA W, CHEN L, et al. Characterization and physicochemical properties analysis of konjac glucomannan: implications for structure-properties relationships[J]. Food Hydrocolloids, 2021, 120(11): 106818.
[13] YE S X, ZHU J S, SHAH B R, et al. Preparation and characterization of konjac glucomannan (KGM) and deacetylated KGM (Da-KGM) obtained by sonication[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2022, 102(10): 4333−4344.
[14] LI W H, YU Y, PENG J L, et al. Effects of the degree of substitution of OSA on the properties of starch microparticle-stabilized emulsions[J]. Carbohydrate Polymers, 2020, 255(29): 117546.
[15] JUNHEE NO, MALSHICK SHIN. Preparation and characteristics of octenyl succinic anhydride-modified partial waxy rice starches and encapsulated paprika pigment powder[J]. Food Chemistry, 2019, 295(26): 466−474.
[16] 胡建雪. 纳米纤维素纤维的制备及其在食品中的应用[D]. 无锡: 江南大学, 2015. [HU J X. Preparation and application of nanofibrillated cellulose in food[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2015.]
[17] LI Y, CAI M S, LIU H B, et al. Properties of whey protein isolation/konjac glucomannan composite gels: effects of deacetylation degrees[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2023, 238(15): 124138.
[18] 宋雅婷. 辛烯基琥珀酸酐酯化修饰柑橘纤维及其性能研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2023. [SONG Y T. Studies on esterification of citrus fiber modified with octenyl succinic anhydride and its properties[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2023.]
[19] 王雅楠, 高海军, 曹晶晶, 等. 辛烯基琥珀酸燕麦淀粉酯的制备工艺响应面优化及表征分析[J]. 粮食与饲料工业, 2024, 47(3): 22−29. [WANG Y N, GAO H J, CAO J J, et al. Response surface optimization and characterization analysis of octenyl succinic acid oat starch ester preparation process[J]. Cereal & Feed Industry, 2024, 47(3): 22−29.]
[20] 梁叶星, 熊家艳, 王永红, 等. 辛烯基琥珀酸魔芋葡甘聚糖酯的微波半干法制备工艺及性能[J]. 食品科学, 2013, 34(14): 163−168. [LIANG Y X, XIONG J Y, WANG Y H, et al. Synthesis and properties of octenylsuccinate konjac glucomannan ester by microwave-assisted semi-drying method[J]. Food Science, 2013, 34(14): 163−168.]
[21] 孙梦雯, 莫晓峰, 陈樱, 等. 辛烯基琥珀酸芋头淀粉酯的制备工艺优化及理化性质分析[J]. 食品工业科技, 2022, 43(20): 204−210. [SUN M W, MO X F, CHEN Y, et al. Preparation process optimization and physicochemical properties analysis of octenyl succinate taro starch ester[J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(20): 204−210.]
[22] 田俊青, 赵丹, 马小涵, 等. 辛烯基琥珀酸酐纤维素酯的合成及其结构表征[J]. 食品与发酵工业, 2017, 43(11): 65−74. [TIAN J Q, ZHAO D, MA X H, et al. Synthesis and structure characterization of octenyl succinic acid cellulose ester[J]. Food and Fermentation Industries, 2017, 43(11): 65−74.]
[23] 芒莱, 李亚娟, 范方宇. 辛烯基琥珀酸木薯淀粉酯的制备工艺优化及特性[J]. 食品研究与开发, 2024, 45(16): 90−96. [MANG L, LI Y J, FAN F Y. Optimization of preparation process and characteristics of octenyl succinic tapioca starch ester[J]. Food Research and Development, 2024, 45(16): 90−96.]
[24] 石剑, 江娴, 周洋, 等. 辛烯基琥珀酸多孔玉米淀粉酯的制备及其性能研究[J]. 中国粮油学报, 2022, 37(9): 155−162. [SHI J, JIANG X, ZHOU Y, et al. Preparation and characterization of octenyl succinic anhydride porous corn starch ester[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2022, 37(9): 155−162.]
[25] ZHONG G, MENG F B, LI Y L, et al. Structure and rheological characterization of konjac glucomannan octenyl succinate (KGOS)[J]. Food Hydrocolloids, 2018, 77(4): 386−396.
[26] ESTRADA-FERNÁNDEZ A G, DORANTES-BAUTISTA G, ROMÁN-GUERRERO A, et al. Modification of oxalis tuberosa starch with OSA, characterization and application in food-grade pickering emulsions[J]. Journal of Food Science and Technology, 2020, 58(8): 2896−2905.
[27] CHEN C, LI L Y, MENG F B, et al. Preparation, properties and emulsifying capacity of octenyl succinic anhydride modified peach gum polysaccharide[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2025, 310(27): 142952.
[28] MENG F B, LI Y C, LIU D Y, et al. The characteristics of konjac glucomannan octenyl succinate (KGOS) prepared with different substitution rates[J]. Carbohydrate Polymers, 2017, 181(47): 1078−1085.
[29] ZHAO L, TONG Q Y, WANG H N, et al. Emulsifying properties and structure characteristics of octenyl succinic anhydride-modified pullulans with different degree of substitution[J]. Carbohydrate Polymers, 2020, 250(24): 116844.
[30] YAN C, MCCLEMENTS D J, ZHU Y Q, et al. Fabrication of OSA starch/chitosan polysaccharide-based high internal phase emulsion via altering interfacial behaviors[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2019, 67(39): 10937−10946.
[31] MENG F B, ZHANG L J, WANG Y H, et al. Preparation and properties of konjac glucomannan octenyl succinate modified by microwave method[J]. Food Hydrocolloids, 2014, 38(5): 205−210.
[32] QIAO D L, LU J Y, SHI W J, et al. Deacetylation enhances the properties of konjac glucomannan/agar composites[J]. Carbohydrate Polymers, 2021, 276(26): 118776.
[33] RAI WIDARTA I W, RUKMINI A, SANTOSO U, et al. Optimization of oil-in-water emulsion capacity and stability of octenyl succinic anhydride-modified porang glucomannan (*Amorphophallus muelleri* Blume)[J]. Heliyon, 2022, 8(5): e09523.