

DOI: 10.16210/j.cnki.1007-7561.2024.04.013

李晓澄, 吕亚萍, 叶展. 石墨烯吸附材料结构性质解析及其在菜籽油脱色中的应用[J]. 粮油食品科技, 2024, 32(4): 105-111.

LI X C, LV Y P, YE Z. Structural and performance analysis of graphene adsorption materials and their application in rapeseed oil decolorization[J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2024, 32(4): 105-111.

石墨烯吸附材料结构性质解析及其在菜籽油脱色中的应用

李晓澄¹, 吕亚萍², 叶展²✉

(1. 南京航空航天大学 材料科学与技术学院, 江苏 南京 210016;

2. 江南大学 食品学院, 江苏 无锡 214122)

摘要: 为了克服活性白土在油脂工业脱色中的操作温度高、残油率大、废白土处理困难等缺点, 开发超强吸附材料石墨烯作为新型吸附剂用于油脂脱色。采用扫描电子显微镜、傅立叶红外光谱仪和显微共聚焦拉曼光谱仪等仪器对石墨烯纳米片(GNP)和氧化石墨烯(GO)的结构与表面性质分析进行了表征。在明确石墨烯材料结构特征的基础上, 将其用于菜籽油的脱色, 并探讨了石墨烯种类、添加量, 反应压力、温度以及反应时间等因素对石墨烯在油脂体系脱色效果的影响。结果表明: 与 GO 相比, GNP 对菜籽油脱色效果更佳, 并且在低温(45 °C)条件下对油脂中叶绿素表现出独特吸附性能。单因素结果表明, 在 GNP 添加量 2.0% (wt)、温度 45 °C、吸附时间 5 min 的优化条件下, GNP 可以脱除油中 80.6% 的叶绿素。GNP 作吸附剂用于油脂脱色具有反应温度低、吸附时间短的优势, 在油脂低温适度加工中具有潜在应用前景。

关键词: 石墨烯; 结构性质; 菜籽油; 叶绿素; 低温脱色

中图分类号: TS201.7 文献标识码: A 文章编号: 1007-7561(2024)04-0105-07

网络首发时间: 2024-07-02 10:48:30

网络首发地址: <https://link.cnki.net/urlid/11.3863.TS.20240701.1940.017>

Structural and Performance Analysis of Graphene Adsorption Materials and Their Application in Rapeseed Oil Decolorization

LI Xiao-cheng¹, LV Ya-ping², YE Zhan²✉

(1. College of Materials Science and Technology, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing, Jiangsu 210016, China; 2. School of Food Science and Technology, Jiangnan University, Wuxi, Jiangsu 214122, China)

Abstract: To overcome the shortcomings of activated bleaching clay in the decolorization of edible oil industry, such as high operating temperature, large residual oil ratio, and difficulty in the disposal of waste bleaching clay, this work developed the super-strong adsorbent material, graphene, as a new type of

收稿日期: 2023-12-17

基金项目: 山东省重点研发计划项目(2023TZXD010、2021CXGC010808); 中央高校基本科研专项项目(JUSRP123045)

Supported by: Key Research and Development Program of Shandong Province (No. 2023TZXD010、2021CXGC010808); the Fundamental Research Funds for the Central Universities (No. JUSRP123045)

作者简介: 李晓澄, 女, 2004 年出生, 在读本科生, 研究方向为材料科学与工程。E-mail: yuma.cx@nuaa.edu.cn

通信作者: 叶展, 男, 1989 年出生, 博士, 副研究员, 研究方向为食品脂质加工与营养基础。E-mail: yezhan@jiangnan.edu.cn

adsorbent for the decolorization of rapeseed oil. Graphene nanoplatelets (GNP) and graphene oxide (GO) were characterized by scanning electron microscope. Fourier infrared spectrometer and Raman spectrometer, etc After clarifying the structural characteristics of graphene, they were used for the decolorization of rapeseed oil, and the effects of graphene species, addition amount, pressure, temperature, and reaction time on the decolorization of rapeseed oil were investigated. The results showed that GNP was more effective in rapeseed oil decolorization compared with GO and exhibited unique adsorption properties for chlorophyll in oil at low temperature (45 °C). The one-factor results showed that GNP could remove 80.6% of chlorophyll in oil under the optimized conditions of GNP addition of 2.0%, temperature of 45 °C and adsorption time of 5 min. GNP as adsorbent for oil decolorization has the advantages of low reaction temperature and short adsorption time, which could have the potential application prospects in low temperature moderate processing of oils and fats.

Key words: structural and performance; graphene; rapeseed oil; chlorophyll; low-temperature decolorization

脱色是改善菜籽毛油色泽的主要工段，菜籽毛油中的色素主要由叶绿素和类胡萝卜素组成，其存在会影响油品的外观、色泽和透明度^[1]。此外，叶绿素是一种光敏剂，可促进单线态氧的形成，引发脂肪酸的自由基反应，进而造成脂质氧化，降低油脂的稳定性^[2]。目前，吸附脱色是油脂工业生产应用最广泛的脱色方法，吸附剂是决定油脂脱色效果的关键因素。工业上应用最多的吸附剂是活性白土，目前活性白土脱色的弊端日益突显^[3]，即残油率高、废白土处理率低^[4]等。随着材料科学的发展，新型高效的吸附材料，如石墨烯、金属有机骨架、纳米二氧化硅等新材料被开发应用于水体吸附净化领域，取得了突破性成果。但是，新型材料在油脂脱色领域的应用不足，故本实验选取超强吸附材料——石墨烯作为吸附剂，探索其在菜籽油脱色中的应用研究。石墨是碳原子按照 sp^2 杂化方式构成的单层蜂窝状晶格结构的二维纳米材料，是不同维度的碳材料的基本结构单元^[5]。石墨烯具有超高的理论比表面积、高能接触位点、独特的有机化合物吸附能力，在污染物吸附领域有良好的应用前景^[6]。故本研究选取氧化石墨烯 (Graphene oxide, GO) 和石墨烯纳米片 (Graphene nanoplatelets, GNP) 作为吸附材料，通过扫描电子显微镜、拉曼光谱和 X 衍射光电子能谱等仪器对两种石墨烯进行结构表征，在此基础上，探究石墨烯吸附剂对菜籽中和油中色素的吸附性能，并通过单因素优化实验，明确石墨烯材料对菜籽油中色素吸附效果和吸附工艺条件，为菜籽油脱色另辟蹊径，促进未来菜

籽油工业绿色高效发展。

1 材料与方法

1.1 试剂与仪器

主要材料和试剂：菜籽中和油：重庆红蜻蜓油脂有限责任公司；氧化石墨烯粉体、石墨烯纳米片粉体：四川垦业科技发展有限公司。

主要仪器设备：紫外可见分光光度计：美国通用电气医疗集团；傅立叶红外光谱仪：美国 Nicolet 公司；显微共聚焦拉曼光谱仪：法国 HORIBA Jobin Yvon S.A.S. 公司；X 射线衍射仪：德国布鲁克 AXS 有限公司；扫描电子显微镜：美国 FEI；透射电子显微镜 JEM-2100F：日本电子株式会社；X 射线光电子能谱仪：美国 ThermoFisher, ESCALAB Xi+；X 射线能谱仪：德国 Bruker 公司。

1.2 实验方法

1.2.1 菜籽油吸附脱色实验与色素的测定方法

称取一定质量菜籽中和油于圆底烧瓶中，置于一定温度的恒温磁力搅拌器中，然后加入一定质量的石墨烯吸附剂，混合搅拌一定时间后，快速水浴冷却至室温，真空抽滤得到石墨烯脱色菜籽油。

胡萝卜素浓度的测定参照 Tian 等^[6]，即测定含有 0.1 g 菜籽油的环己烷溶液在 454 nm 处的吸光度值，代入标准曲线计算。菜籽油综合色泽采用分光光度计法表征^[7]。叶绿素的测定方法参照 AOCS Official Method Cc 13d-55。紫外可见分光光度计就绪后，将 2.2.1 所得脱色油注入 10 mm 的石英比色皿中，以四氯化碳做参比，记录

620~720 nm 波长内吸光度值,按照式(1)计算油脂中叶绿素含量。

$$C = \frac{A_{\max} - 0.5(A_{630} + A_{710})}{EL} \quad \text{式(1)}$$

式中, C 为叶绿素浓度, mg/kg; A_{\max} 、 A_{630} 和 A_{710} 分别为测试部分吸光度的最大值、波长在 630 处和 710 处的吸光度值, L 为比色槽长度, E 为常数。

1.2.2 石墨烯材料的结构表征

1.2.2.1 扫描电子显微镜 (SEM) 与透射电子显微镜 (TEM) 分析 取少量的石墨烯样品用导电胶固定, 测试前对其表面进行喷金处理, 然后用扫描电镜观察石墨烯的微观形貌。将石墨烯样品均匀地分散在水或乙醇中, 在铜网上滴入少量极稀的石墨烯溶液, 干燥后用透射电镜进行形貌观察。

1.2.2.2 X 射线衍射仪 (XRD) 与拉曼光谱 (Raman) 分析 用 D2 PHASER 型 X 射线多晶衍射仪表征石墨烯材料晶体结构, 以 Cu K α 射线为衍射源, 波长设定为 0.154 1 nm, 以 $2^\circ(2\theta)/\text{min}$ 的速度进行扫描, 扫描范围为 $10^\circ\sim 70^\circ$ 。拉曼光谱分析即取少量干燥的粉末样品置于石英载玻片上压实, 使用 Ar⁺ 激光, 在激发波长 514 nm 处测试, 连续扫描 20 s 累积获得光谱。

1.2.2.3 傅里叶变换红外光谱 (FTIR) 和 X 射线光电子能谱 (XPS) 分析 将少量干燥的石墨烯样品与溴化钾混匀, 置于玛瑙研钵中进行研磨, 压片后放入红外光谱仪中进行测试。X 射线光电子能谱采用 Al K α 射线 (1 486.6 eV) 为激发源测定, 以 284.80 eV 对 C1s 结合能校正。

1.3 数据处理

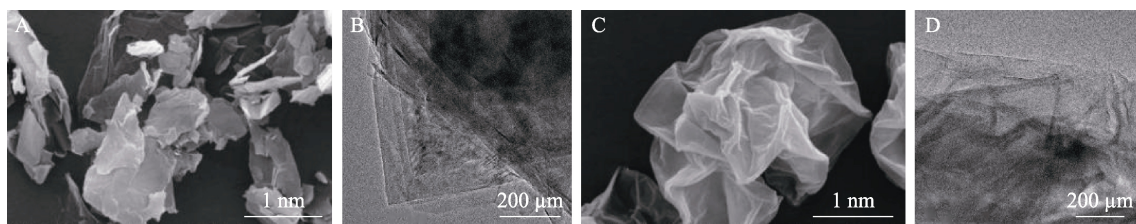
所有实验重复 3 次, 结果以“平均值 \pm 标准差”表示, 采用 Excel 和 SPSS19.0 软件进行数据整理和分析, 采用 Origin 8.0 进行图形绘制。

2 结果与分析

2.1 石墨烯吸附剂结构与表面性质分析

2.1.1 石墨烯吸附剂的表面形貌

采用扫描电子显微镜 (SEM) 和透射电子显微镜 (TEM) 对两种石墨烯吸附剂的表面形貌进行了表征, 如图 1 所示。由图 1A 和图 1B 可知 GNP 呈不规则的片块状结构, 表面相对平整并有一些典型的折痕, 无孔, 空间上层层堆叠。而 GO 呈现成团的纱状, 呈高度的褶皱结构 (图 1C, 图 1D), 这些褶皱可以帮助石墨烯维持自身的稳定, 提供高能吸附位点^[8]。



注: 扫描电子显微镜图 (A, C) 和透射电子显微镜图 (B, D)。

Note: SEM (A, C) and TEM (B, D) images.

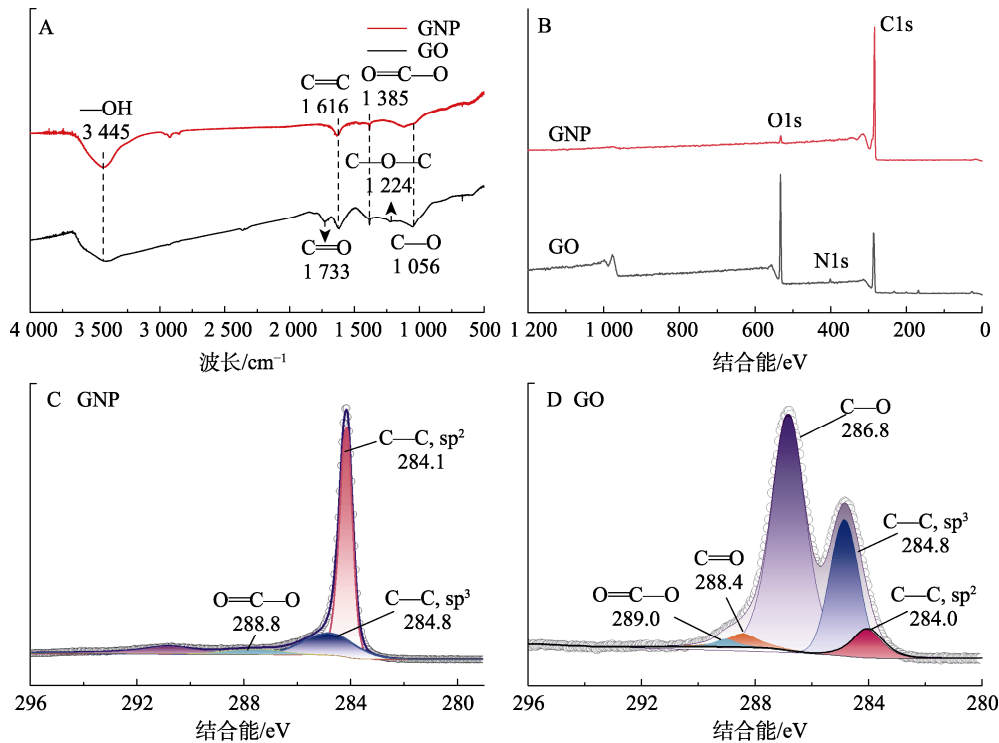
图 1 石墨烯纳米片 (GNP) 和氧化石墨烯 (GO) 的表面形貌

Fig.1 Surface morphology of GNP and GO

2.1.2 石墨烯吸附剂表面官能团分析

采用 FTIR 和 XPS 对两种石墨烯的表面官能团进行分析, 结果如图 2 所示。由图 2 A 可知, 羟基 (—OH) 在 $3\ 445\ \text{cm}^{-1}$ 处出现强烈的伸缩振动, C=C 骨架的振动峰在 $1\ 616\ \text{cm}^{-1}$ 处, 除此之外, GO 的 FTIR 图中还出现了羰基 (C=O)、羧基 (O=C—O)、环氧基 (C—O—C) 和烷氧基 (C—O) 的吸收峰, 分别对应于图 2A 中 $1\ 733$ 、

$1\ 385$ 、 $1\ 224$ 和 $1\ 056\ \text{cm}^{-1}$ 处^[9]。可知, GO 表面富含极性官能团, 具有较强的亲水性。由图 2B 的 XPS 结果可知, GO 主要由 62.9% 的 C、35.1% O 和 2% N 三种元素共同组成。通过对其进行 C1s 分峰拟合, 可知在 289.0、288.4、286.8、284.8 和 284.0 eV 结合能出现的峰分别对应为 O=C—O、C=O、C—O 和 C—C (sp^3 杂化) 和 C—C (sp^2 杂化) 的峰^[10]。 sp^3 杂化碳原子的原子百分比



注：傅立叶红外光谱图 (A)、X 射线光电子能谱全谱图 (B) 和 C1s 分谱图 (C, D)。

Note: FTIR (A), XPS (B) and C1s spectrogram (C, D).

图 2 石墨烯纳米片 (GNP) 与氧化石墨烯 (GO) 的表面官能团分析

Fig.2 The surface functional group analysis of GNP and GO

(27.8%) 高于 sp^2 杂化的碳原子 (6.5%)，说明 GO 的缺陷结构较多，与图 1 的结果吻合。GNP 的 FTIR 图中还出现了 O=C—O 和 C—O 官能团的伸缩振动，分别对应于图 2A 中 1385 和 1056 cm^{-1} 处的吸收峰。故与 GO 相比，GNP 表面极性官能团较少，疏水性强于 GO。根据图 2B 的 XPS 结果，GNP 主要由 96.3% 的 C 和 3.7% 的 O 两种元素构成。对 GNP 进行 C1s 分峰拟，发现在 288.8、284.1 和 284.8 eV 结合能出现的峰分别对应为 O=C—O、C—C (sp^2 杂化)、C—C (sp^3 杂化) 的峰。 sp^3 杂化碳原子的原子百分比 (10.5%) 显著低于 sp^2 杂化的碳原子 (74.7%)，表明 GNP 的缺陷结构较少，芳香性较强^[11]。

2.1.3 石墨烯吸附剂表面缺陷程度、晶体类型和层间结构分析

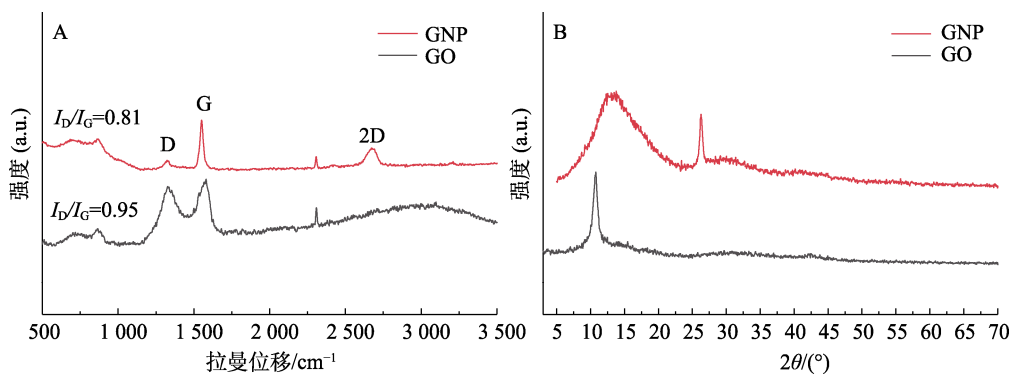
采用 Raman 光谱来表征 GNP 和 GO 的表面缺陷程度，如图 3A 所示。在 1320 cm^{-1} 和 1552 cm^{-1} 附近出现的两个特征振动峰分别是石墨烯的 D 峰和 G 峰，它们分别来源石墨烯 sp^3 杂化碳原子和 sp^2 杂化碳原子的伸缩振动。GNP 的 D 峰和 G 峰的强度比 I_D/I_G 值为 0.81，小于 GO 的 I_D/I_G 值

(0.95)，这与图 2 中两种石墨烯中 sp^3 杂化碳原子和 sp^2 杂化碳原子的原子百分比差异结果相吻合。由此可知，GNP 的表面缺陷密度低于 GO，褶皱更少，符合图 1 的表征结果。此外，GNP 的 G 峰和 2D 峰强度比为 1.1，GO 无明显的 2D 峰，说明两种石墨烯都是多层结构^[12]。采用 XRD 技术分析两种石墨烯的晶体类型和层间结构。由其衍射峰的 2θ 值可以计算出石墨烯层间距的变化，结果如图 3B 所示，GNP 在 13° 出现弥散的衍射峰，可能是在制备时晶型被破坏导致的。 26° 左右出现强衍射峰，峰位与石墨的特征衍射峰 (26.5°) 几乎重合，属于 (002) 晶面，说明 GO 片层之间间距小，形成堆叠现象。GO 在 10.6° 左右出现强衍射峰，属于 (001) 晶面， 26° 左右无石墨的特征衍射峰，表明材料氧化完全，片层间的含氧官能团和褶皱结构使得 GO 片层距离被拉开，呈现图 1 中高度的褶皱结构^[13]。

2.2 石墨烯吸附剂用于食用油脱色单因素实验分析

2.2.1 石墨烯吸附剂类型对菜籽油脱色的影响

采用本体态和氧化态两种不同形态的石墨烯作为吸附剂，以菜籽油中叶绿素和胡萝卜素的含



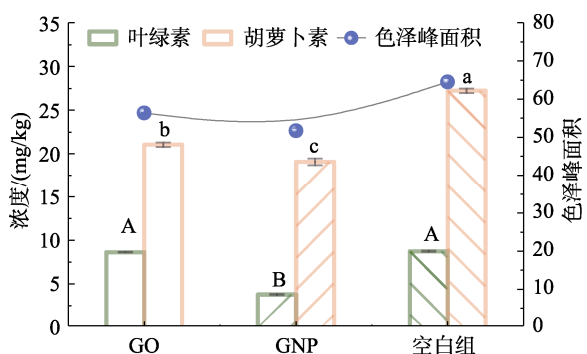
注：Raman 光谱 (A) 与 X 射线衍射 (B) 结果。

Note: Raman spectra (A) and XRD patterns (B) of GNP and GO.

图 3 石墨烯纳米片 (GNP) 与氧化石墨烯 (GO) 表面缺陷程度、晶体类型和层间结构分析

Fig.3 Analysis of GNP and GO surface defect extent, crystal type and interlayer structure

量以及光谱扫描法测得的色泽面积来评价石墨烯的综合脱色效果, 如图 4 所示。菜籽中和油经过两种石墨烯脱色后, 其色泽峰面积显著降低, GNP 脱色菜籽油的色泽峰面积显著低于空白组和 GO 脱色组。此外, GNP 可以降低菜籽油中 56.9% 的叶绿素和 30.0% 的胡萝卜素, GO 可脱除油中 1.4% 的叶绿素和 22.7% 的胡萝卜素。故 GNP 对叶绿素的脱除效果显著高于胡萝卜素, GO 对胡萝卜素的脱除能力高于叶绿素。GO 的脱色效果整体上低于 GNP, 这种现象可能归因于 GO 中富含大量的含氧官能团, 疏水性差, 但油脂中的色素大多为脂溶性色素, 故 GO 对色素的吸附能力低于 GNP。因此, 后续实验以本体态的 GNP 为吸附剂,



注：反应条件：105 °C，石墨烯吸附剂添加量 1 wt.%，-0.1 MPa，30 min，1 200 r/min。不同大小写字母代表各组之间存在显著性差异 ($P < 0.05$)。

Note: Reaction conditions: 105 °C, graphene loading 1 wt.%, -0.1 MPa, 30 min, 1 200 r/min. Different uppercase and lowercase letters represent significant differences between groups ($P < 0.05$).

图 4 石墨烯纳米片 (GNP) 和氧化石墨烯 (GO) 对菜籽油脱色的影响

Fig.4 Effect of GNP and GO on the decolorization of rapeseed oil

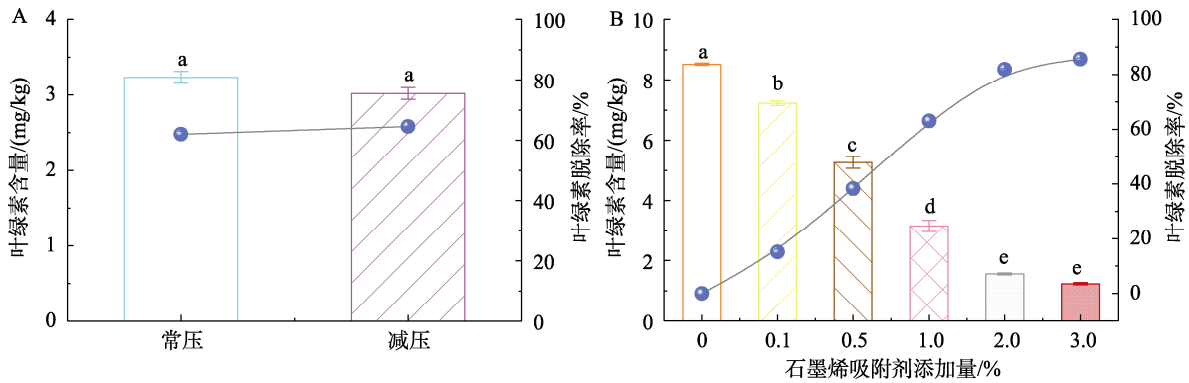
以菜籽油中叶绿素的含量为脱色指标, 探究不同反应因素对 GNP 脱色效果的影响。

2.2.2 压力和吸附剂添加量对石墨烯纳米片脱色效果的影响

为了减少油脂氧化, 提高油脂的脱色效率, 工业上油脂脱色一般在负压条件下进行, 压力对 GNP 脱色效果的影响如图 5 所示。在相同条件下, 常压和负压 (-0.1 MPa) 脱色对油脂中叶绿素含量的影响无显著性差异。故本实验选择在常压条件进行。在 105 °C, 反应时间 30 min, 1 200 r/min 的条件下, GNP 添加量对菜籽油中叶绿素浓度的影响结果如图 5B 所示。随着 GNP 添加量由 0 wt% 增加至 2 wt%, 菜籽油体系中叶绿素含量由 (8.5 ± 0.04) mg/kg 降至 (1.5 ± 0.03) mg/kg, 脱除率高达 82.0%, 这是由于吸附剂量的增加可显著增加色素在 GNP 的吸附位点, 进而增加叶绿素的吸附效率。当 GNP 添加量高于 2 wt% 时, 叶绿素的含量略有上升, 但是差异不显著。故选取 GNP 添加量 2 wt% 进行后续研究。

2.2.3 反应温度对石墨烯纳米片脱色效果的影响

本实验研究了温度对 GNP 脱色效果的影响, 结果如图 6 所示。随着反应温度由 35 °C 升至 45 °C, GNP 对菜籽油中叶绿素的脱除率提升了 2.3%, 继续提高反应温度至 85 °C, 油中叶绿素的含量无显著性变化, 当温度从 85 °C 提升至 105 °C 时, 叶绿素的脱除率提升了 2.5%, 当温度由 105 °C 升至 125 °C 后叶绿素含量趋于稳定。可知, GNP 对油脂中叶绿素的吸附效率受温度影响

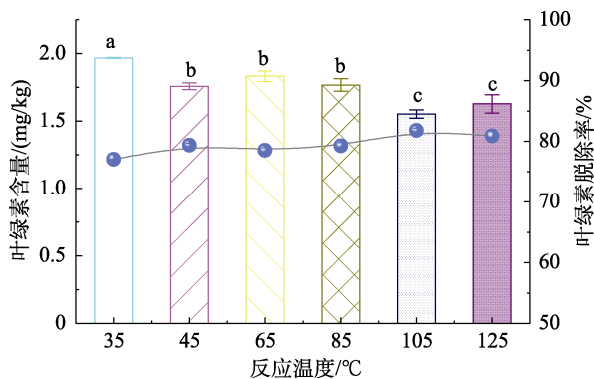


注：反应条件：105 °C，30 min，1 200 r/min。不同字母代表数据存在显著性差异 ($P < 0.05$)，下同。

Note: Reaction conditions: 105 °C, 30 min, 1 200 r/min. Different letters represent significant differences in data ($P < 0.05$), same as below.

图 5 真空度 (A) 和石墨烯纳米片添加量 (B) 对菜籽油脱色效果的影响

Fig.5 Effect of vacuum value (A) and graphene loading (B) on the decolorization of rapeseed oil



注：反应条件：石墨烯纳米片添加量 2 wt%，30 min，1 200 r/min。

Note: Reaction condition: graphene nanoplatelets loading 2 wt%, 30 min, 1 200 r/min.

图 6 反应温度对石墨烯脱色效果的影响

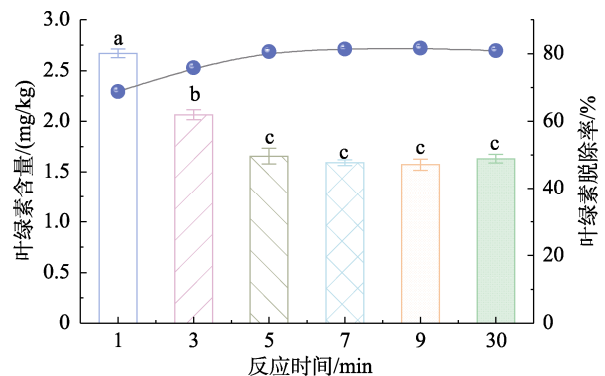
Fig.6 Effect of temperatures on the decolorization effect of graphene

幅度较小，可在低温 45 °C 实现 80% 的叶绿素脱除率，该温度显著低于活性炭、活性白土和凹凸棒土的脱色温度 (105~110 °C)^[14]。较低的脱色温度可以减少油脂氧化和油脂中热敏性物质的损失，同时可以节约能量消耗，降低生产成本。

2.2.4 吸附时间对石墨烯纳米片脱色效果的影响

在温度 45 °C，GNP 添加量 2 wt%，转速 1 200 r/min 的条件下，研究吸附时间对 GNP 脱色效果的影响，结果如图 7 所示。在脱色前 5 min，菜籽油中叶绿素含量从 8.6 mg/kg 降至 1.6 mg/kg，叶绿素脱除率由 68.7% 升至 80.6%；在 5 min 后 GNP 对叶绿素吸附率趋于平缓，叶绿素含量无显著变化。因此，GNP 对菜籽油中的叶绿素的吸附作用在 5 min 即可达到平衡，可知 GNP 在油脂体系对叶绿素有较高的吸附效率。在相同条件下，

将 GNP 脱除叶绿素的效果与传统吸附剂活性炭、活性白土和凹凸棒土的效果进行对比。结果发现，GNP 对菜籽油中叶绿素的脱除率 (80.6%) 显著高于凹凸棒土 (20.3%)、活性白土 (40.2%) 和活性炭 (73.0%) 对叶绿素的脱除率。并且，根据 Abdi^[15] 等的报道，计算 GNP 吸附叶绿素后的残油率为 $15.1\% \pm 2.3\%$ ，显著低于活性白土的一般残油率 20%~30%，由此体现出 GNP 用于菜籽油脱色的优越性。此外，根据 DAS^[16] 等和 Ramakrishna^[17] 等的报道，叶绿素 a 在乙醇体系中可以通过 π - π 堆石墨烯分子结合，并且可在甲醇溶剂中通过氢键、 π - π 堆积和疏水相互作用在化学还原石墨烯上发生超分子组装。因此，GNP 在菜籽油体系中表现出较强的叶绿素吸附能力理论上是可行的，具体吸附剂机理需要进一步研究。



注：反应条件：45 °C，石墨烯纳米片添加量 2 wt%，1 200 r/min。

Note: reaction condition: 45 °C, graphene nanoplatelets addition amount 2wt%, 1 200 r/min

图 7 反应时间对石墨烯纳米片脱色效果的影响

Fig.7 Effect of reaction time on the decolorization effect of graphene

4 结论

本实验创新性的将两种不同形态的石墨烯用于菜籽油的脱色, 并通过材料表征, 明确了两种石墨烯的结构特征。结果发现, 本体态的石墨烯纳米片 (GNP) 对菜籽油的脱色效果显著高于氧化石墨烯 (GO), 且 GNP 对菜籽油中的叶绿素的脱除率是对胡萝卜素脱除率的 2 倍。单因素实验结果发现, 在 GNP 添加量 2.0 wt%, 温度 45 °C, 转速 1 200 r/min 的优化条件下, GNP 在菜籽油体系中吸附 5 min, 可以吸附油中 80.6% 的叶绿素。与传统吸附剂相比, GNP 做吸附剂用于油脂脱色具有反应温度低、吸附时间短的优势, 为促进菜籽油的低温适度加工提供新思路。

参考文献:

- [1] YAO Y, XUAN P, XIONG W, et al. Chlorophylls, lutein and β -carotene play great but different roles in colour of rapeseed oil[J]. *Coloration Technology*, 2022, 138(6): 660-673.
- [2] LI X, YANG R, LV C, et al. Effect of chlorophyll on lipid oxidation of rapeseed oil[J]. *European Journal of Lipid Science and Technology*, 2018, 121(4): 1800078
- [3] ICYER N C, DURAK M Z. Ultrasound-assisted bleaching of canola oil: Improve the bleaching process by central composite design[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2018, 97: 640-647.
- [4] 王朝晖, 姚永佳, 詹亚名. 油脂精炼厂废白土不落地自动装车方式改进实践. *中国油脂*[J]. 2022, 47(9): 153-154.
WANG Z H, YAO Y J, ZHAN Y M. Improvement practice of non-landing automatic loading method of waste white soil in oil refinery. *Chinese Grease*[J]. 2022, 47(9): 153-154.
- [5] YANG K, WANG J, CHEN X, et al. Application of graphene-based materials in water purification: from the nanoscale to specific devices[J]. *Environmental Science: Nano*, 2018, 5(6): 1264-1297.
- [6] YAP P L, NINE M J, HASSAN K, et al. Graphene - based sorbents for multipollutants removal in water: A Review of Recent Progress[J]. *Advanced Functional Materials*, 2020, 31(9): 2007356.
- [7] TIAN R, LIU Y, CAO D, et al. Preparation of highly efficient p-doped porous camellia shell-based activated carbon and its adsorption of carotenoids in camellia oil[J]. *Frontiers Nutr*, 2022, 9: 1058025.
- [8] 付元元, 毕艳兰, 彭丹, 等. 分光光度法测定一级大豆油色泽的研究[J]. *河南工业大学学报(自然科学版)*, 2014, 35(4): 32-38.
- [9] FU Y Y, BI Y L, PENG D, et al. Color determination of first-grade bean oil by spectrophotometry[J]. *Journal of Henan University of Technology (Natural Science Edition)*, 2014, 35(4): 32-38.
- [10] FASOLINO A, LOS J H, KATSNELSON M I. Intrinsic ripples in graphene[J]. *Nat Mater*, 2007, 6(11): 858-61.
- [11] KORUCU H, MOHAMED A I, YARTAS A, et al. The detailed characterization of graphene oxide[J]. *Chemical Papers*, 2023, 77(10): 5787-5806.
- [12] AL-GAASHANI R, NAJJAR A, ZAKARIA Y, et al. XPS and structural studies of high quality graphene oxide and reduced graphene oxide prepared by different chemical oxidation methods[J]. *Ceramics International*, 2019, 45(11): 14439-14448.
- [13] 王骏. 石墨烯纳米片层的结构调控及其对有机污染物的吸附性能和作用机理[D]. 浙江大学, 2017.
WANG J. Adsorption properties and mechanisms of organic pollutants onto structure-controlled graphene nanosheets[D]. Zhejiang University, 2017.
- [14] 黄丹. 磁性石墨烯复合材料的制备及其对有机污染物的去除性能与机理[D]. 浙江大学, 2020.
HUANG D. Preparation of magnetic graphene composites for organic pollutants removal: properties and mechanisms[D]. Zhejiang University, 2020.
- [15] 张文龙, 黄成义, 赵晨伟, 等. 植物油中的色素及吸附脱色研究进展[J]. *中国油脂*, 2022, 47(6): 21-28.
ZHANG W L, HUANG C Y, ZHAO C W, et al. Progress on pigment and adsorption bleaching of vegetable oil[J]. *China Oil and Fats*, 2022, 47(6): 21-28.
- [16] ABDI M G M. Investigation of using egg shell powder for bleaching of soybean oil[J]. *LWT-Food Science & Technology*, 2021, 140(1): 110859.
- [17] DAS D, SARKAR MANNA J, MATRA M K. Electron donating chlorophyll-a on graphene: a way toward tuning fermi velocity in an extended molecular framework of graphene/chlorophyll-a nanohybrid[J]. *The Journal of Physical Chemistry C*, 2015, 119(13): 6939-6946.
- [18] RAMAKRISHNA T R B, MATHESH M, LIU Z, et al. Solvent effect on supramolecular self-assembly of chlorophylls a on chemically reduced graphene oxide[J]. *Langmuir*, 2020, 36(45): 13575-13582. 完

备注: 本文的彩色图表可从本刊官网 (<http://lyspkj.ijournal.cn>)、中国知网、万方、维普、超星等数据库下载获取。