DOI:10.12161/j.issn.1005-6521.2026.17.008

咖啡果皮碳量子点的制备、表征及其在冷鲜猪肉保鲜中的应用

李春阳,高琴,朱薪,王雪峰*,谷大海*
(云南农业大学 食品科学技术学院,云南 昆明 650000)

摘　要:为实现咖啡果皮资源化利用并研发新型保鲜材料,该研究以咖啡果皮为原料制备碳量子点(carbon quantum dots,CQDs),运用X-射线衍射、荧光光谱等表征手段,分析其理化结构特征,并验证不同浓度(0%、1.5%、3.0%、4.5%)咖啡果皮CQDs保鲜涂抹液的效果。结果表明,制得的咖啡果皮CQDs为无定形碳结构,荧光特性良好,表面带有羟基、羰基、氨基等活性基团,符合CQDs典型的结构特征;保鲜试验显示,贮藏时空白组冷鲜猪肉品质劣变明显,pH值、挥发性盐基氮(total volatile basic nitrogen,TVB-N)含量、菌落总数在第8天分别升至7.34、30.500 mg/100 g、6.933 lg(CFU/ g),而经4.5%保鲜涂抹液处理的冷鲜猪肉效果最佳,相较于空白组,其pH值、TVB-N含量、菌落总数依次下降13.90%、26.88%、5.77%。

关键词:咖啡果皮;碳量子点;结构特性;保鲜涂抹液;冷鲜猪肉

Preparation, Characterization, and Application of Coffee Peel Carbon Quantum Dots for Preservation of Chilled Fresh Pork

LI Chunyang, GAO Qin, ZHU Xin, WANG Xuefeng*, GU Dahai*
(College of Food Science and Technology, Yunnan Agricultural University, Kunming 650000, Yunnan, China)

Abstract: To realize the resource utilization of coffee peel and develop novel preservation materials, carbon quantum dots (CQDs) were synthesized using coffee peel as the raw material. The physicochemical and structural characteristics of the prepared CQDs were analyzed by X-ray diffraction, fluorescence spectroscopy, and other characterization techniques. Meanwhile, the preservation effects of coffee peel CQDs fresh-keeping coating liquids with different mass fractions (0%, 1.5%, 3.0%, and 4.5%) were evaluated. The results revealed that the as-prepared coffee peel CQDs possessed an amorphous carbon structure and favorable fluorescence properties. Active groups including hydroxyl, carbonyl, and amino groups were detected on the material surface, which is consistent with the typical structural characteristics of CQDs. The preservation test showed that the quality of chilled fresh pork in the blank group deteriorated significantly during storage. On day 8, the pH value, TVB-N content, and total bacterial count of the blank group increased to 7.34, 30.500 mg/100g, and 6.933 lg (CFU/g), respectively. In contrast, the chilled fresh pork treated with 4.5% fresh-keeping coating liquid exhibited the best preservation effect, with its pH value, TVB-N content, and total bacterial count decreased by 13.90%, 26.88%, and 5.77%, respectively, compared with the blank group.

Key words: coffee peel; carbon quantum dots; structural characteristics; fresh-keeping smearing liquid; chilled fresh pork

引文格式:
李春阳,高琴,朱薪,等.咖啡果皮碳量子点的制备、表征及其在冷鲜猪肉保鲜中的应用[J].食品研究与开发,2026,47(17):63-69.
LI Chunyang, GAO Qin, ZHU Xin, et al. Preparation, Characterization, and Application of Coffee Peel Carbon Quantum Dots for Preservation of Chilled Fresh Pork[J]. Food Research and Development,2026,47(17):63-69.

基金项目:云南省重大科技专项(202502AE090041);云南省科技人才与平台计划(202305AF150132);云南省兴滇英才支持计划青年项目(XDYC-QNRC-2023-0420)
作者简介:李春阳(2003—),男(汉),硕士研究生,研究方向:食品工程。
*通信作者:王雪峰(1986—)男(汉),教授,博士,研究方向:食品科学;谷大海(1980—),男(汉),副教授,硕士,研究方向:食品科学。

咖啡果皮作为咖啡鲜果加工的主要副产物，产量较高，每 100 kg 鲜果可产生约 39 kg 果皮，其营养成分包含 21%~32% 碳水化合物、10.69%~11.02% 蛋白质、2.0%~7.0% 脂肪及 7.35%~11.75% 矿物质[1-2]。但我国咖啡产业每年产生约 30 000 t 果皮废弃物，多数仅作饲料或直接丢弃，既对生态环境造成了影响，也导致了宝贵资源的无端损耗[3]。

壳聚糖（chitosan，CS）是自然界储量第二的生物高分子，来源广泛[4]。近年来，天然成膜高分子成为保鲜材料研究热点，其中纤维素与壳聚糖因安全、无残留备受关注[5-6]。相较于传统防腐剂，壳聚糖具有良好的抗氧化与抗菌性能，可有效满足食品保鲜的市场需求[7]。

食品运输过程中的腐败变质和食源性疾病传播问题的防控技术研发已成为食品工业的研究热点之一[8]。碳量子点（carbon quantum dots，CQDs）是一种新型零维碳纳米材料，具备与传统量子点相似的发光性能和小尺寸特性，在生物医疗、传感器、光电器件及发光二极管等领域受到广泛关注[9]。CQDs 表面富含羟基、羧基、氨基等多种活性官能团，不仅能够直接抑制细菌的生长繁殖，还可通过构建纳米复合材料进一步提升其杀菌效果[10]。CQDs 实现抑菌作用主要依赖于阳离子特性与活性氧（reactive oxygen species，ROS）介导这两大关键机制[11]。CQDs 表面的含氮基团在特定环境下发生质子化并携带稳定的正电荷，可与表面带负电的细菌通过强烈静电相互作用紧密结合，进而破坏细菌细胞膜的完整性并造成膜结构分解，最终达到抑菌目的[12-13]。近年来，国内 CQDs 在食品抗菌领域的研究不断深入。Fan 等[14]将 CQDs/壳聚糖涂膜用于鲜切黄瓜保鲜；李涵等[15]制备的黄鳝骨基 CQDs 荧光与抑菌性能优异，可用于淡水鱼加工；杜雪蓉等[16]证实食品基 CQDs 抑菌及抗氧化性突出，能延长肉制品货架期；杨娜等[17]发现火龙果皮基 CQDs/壳聚糖涂抹液可有效保鲜鲜切蘑菇；马玉林等[18]制备的 CQDs/聚乙烯醇（polyvinyl alcohol，PVA）复合水凝胶可作为多功能抗菌材料。研究表明，CQDs 可通过破坏细胞膜、诱导 ROS 氧化应激实现抗菌并降低耐药性[19]。食品原料富含碳源与活性基团，可高效制备并修饰 CQDs，提升量子产率[20]。由此可见，咖啡果皮与壳聚糖等天然生物质原料，在绿色、高效制备保鲜型 CQDs 上具有显著优势。

当前有关咖啡果皮 CQDs 在食品保鲜领域的应用研究较少，与天然高分子材料构建的协同保鲜体系也缺乏系统探究。同时，该材料在冷鲜猪肉中的应用效果、品质影响及食用安全性尚未得到充分验证。该研究以咖啡果皮 CQDs 与壳聚糖为基材制备复合保鲜涂抹液并用于冷鲜猪肉保鲜，重点探讨其对冷鲜猪肉品质的调控效果与保鲜机理，以期解决咖啡果皮资源浪费的问题，也为冷鲜猪肉绿色保鲜技术提供理论基础。

1 材料与方法

1.1 主要材料与试剂

冷鲜猪肉：市售；咖啡果皮粉：佐园咖啡庄园；壳聚糖（分析纯）、无水碳酸钾（纯度 99%）：天津市华盛化学试剂有限公司；乙二胺（纯度 99%）：上海麦克林生化科技股份有限公司；硼酸（分析纯）：天津市大茂化学试剂合作企业；盐酸、无水乙醇（均为分析纯）：广东光华科技股份有限公司；阿拉伯胶、甘油（均为分析纯）：天津市科密欧化学试剂有限公司；甲基红指示剂、溴甲酚绿指示剂（均为分析纯）：天津市风船化学试剂科技有限公司。

1.2 主要仪器与设备

SX2-4-10 型马弗炉：上海跃进医疗器械有限公司；SR-MS-6D 型磁力搅拌器：常州苏瑞仪器有限公司；H2-16KR 型台式高速冷冻离心机：湖南可成仪器设备有限公司；F97Pro17031 型荧光分光光度计：上海棱光技术有限公司；PHS-3C 型 pH 计：上海仪电科学仪器股份有限公司；Bruker Tensor27 型傅里叶变换红外光谱仪、D8 Discover 型 X-射线衍射仪：德国 Bruker 公司；DHP-9082B 型电热恒温培养箱：上海一恒科学仪器有限公司；GFK-5-25 型高压釜：郑州欧雷仪器设备有限公司；FD-1A-50 型冷冻干燥机：上海比朗仪器制造有限公司。

1.3 试验方法

1.3.1 咖啡果皮 CQDs 的制备工艺

将 10 g 咖啡果皮粉加入 80 mL 纯水搅拌 2 h，加入 6 mL 乙二胺放入高压釜中 180 ℃加热 6 h。将制备好的液体通过 0.22 μm 的滤纸过滤，放入 3 500 Da 的透析袋中透析 24 h，每 8 h 更换一次透析液。将透析好的样品收集起来用冷冻干燥机干燥 4 d 得到粉末状咖啡果皮 CQDs。

1.3.2 碳量子点的表征

1.3.2.1 X-射线衍射分析

参照张洁[21]的方法并稍作修改，把咖啡果皮 CQDs 粉末均匀铺展在样品盘内并压实成型，利用 X-射线衍射仪测定其表面晶型结构，设定扫描范围为 4°~80°，扫描速率 5°/min，步长 0.02°以完成测试。

1.3.2.2 荧光光谱的测定

在发射起始波长为 480 nm、发射终止波长为 560 nm、扫描速度为 1 000 nm/min、扫描间隔为 1 nm、激发带宽和发射带宽均为 10 nm、电压为 650 V 的条件下，分别测量激发波长为 521、522、523、524、525、526、527、528、529、539、531 nm 下咖啡果皮碳量子点的荧光光谱。

1.3.2.3 傅里叶变换红外光谱扫描

根据林伟琦[22]的方法并稍作修改，测试条件为扫

描次数 32 次，光谱分辨率 4 cm^{-1}；分束器选用溴化钾基片镀锗款，光源采用高强度风冷红外光源，借助 OMNIC 系统实现数据采集，温度保持在 25 ℃。

1.3.3 碳量子点在冷鲜猪肉保鲜中的应用

1.3.3.1 保鲜涂抹液的制备

参照 Fan 等[14]的方法并稍作修改，准确称取 1.0 g 壳聚糖分别加入 0、0.015、0.030、0.045 g 咖啡果皮碳量子点粉末，加入 99 mL 纯水、1 mL 乙酸溶液，使用搅拌器搅拌 2 h 后分别制得质量分数为 0%、1.5%、3.0%、4.5% 的以壳聚糖为基质的咖啡果皮 CQDs 保鲜涂抹液。

1.3.3.2 冷鲜猪肉的预处理

将市场采购的新鲜冷鲜猪肉剔除筋膜和多余的脂肪后，分成 80 g 左右的均匀小块备用。

1.3.3.3 样品处理

将处理好的猪肉用镊子夹住完全浸没在质量分数为 0%（空白组，CD/A）、1.5%（CD/B）、3.0%（CD/C）、4.5%（CD/D）的保鲜涂抹液中，浸泡时间统一为 5 min；取出后等猪肉上的保鲜涂抹液不向下滴落时，将猪肉平铺放入洁净的培养皿中，每个培养皿中放入 5 个相同的样品，放入 4 ℃的冰箱中保存；试验周期为 8 d，每天拍照观察并测定 pH 值、挥发性盐基氮含量和菌落总数。

1.3.3.4 冷鲜猪肉 pH 值的测定

参照张洁[21]的方法并进行调整，使用 pH 计测定 pH 值。准确称取剁碎后的冷鲜猪肉样品 10 g 放入烧杯中，加入 100 mL 蒸馏水，在恒温下浸提 30 min，每 5 min 搅拌 1 次。在测定前首先对设备进行校准，然后对冷鲜猪肉浸出液进行测定，待数值稳定之后，对显示的数值进行读取。

1.3.3.5 冷鲜猪肉挥发性盐基氮含量的测定

根据 GB/T 5009.228—2016《食品安全国家标准 食品中挥发性盐基氮的测定》中第三法微量扩散法测定不同浓度保鲜涂抹液处理过的冷鲜猪肉的挥发性盐基氮（total volatile basic nitrogen，TVB-N）含量，按下式计算。

$$X = \frac{(V_1 - V_2) \times c \times 14}{m \times (V/V_0)} \times 100$$

式中：X 为挥发性盐基氮含量，mg/100 g；V_1 为样液消耗盐酸标准滴定溶液的体积，mL；V_2 为试剂空白消耗盐酸标准滴定溶液的体积，mL；V 为取样液体积，mL；V_0 为样品稀释液总体积，mL；c 为盐酸标准滴定溶液的实际浓度，mol/L；m 为样品质量，g。

1.3.3.6 冷鲜猪肉菌落总数的测定

参照 GB 4789.2—2022《食品安全国家标准 食品微生物学检验 菌落总数测定》中的方法对不同浓度保鲜涂抹液处理过的冷鲜猪肉的菌落总数进行测定。

1.4 数据统计分析

试验均重复 3 次，利用 WPS 进行数据整理，结果以平均值±标准差表示；采用 SPSS 26.0 进行单因素方差分析，$P<0.05$ 为差异显著，以相对标准差评价方法精密度与重复性；使用 GraphPad Prism 8 和 Origin 2024 完成数据作图与分析。

2 结果与分析

2.1 咖啡果皮 CQDs 的晶体结构

X-射线衍射（X-ray diffraction，XRD）是基于晶体衍射原理的材料结构表征技术，可通过衍射信号分析样品的晶体结构、晶面间距及原子排列规律[23-25]。从碳量子点固有结构特性来看，CQDs 碳骨架排列无序，呈现典型的无定形碳结构[26]，且碳量子点普遍为由石墨相或无定形碳碎片构成的准球形荧光纳米颗粒[27]。咖啡果皮基碳量子点的 XRD 图谱如图 1 所示。

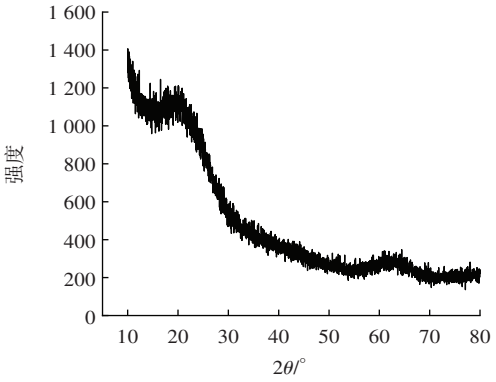


图 1 咖啡果皮 CQDs 的 XRD 光谱图

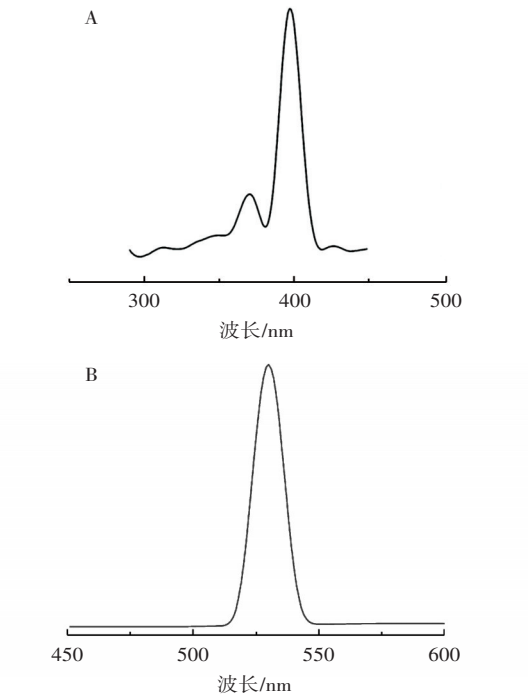
Fig.1 XRD pattern of coffee peel CQDs

由图 1 可知，样品在 20.8°处出现明显的宽化弥散衍射峰，未观察到尖锐的结晶特征峰，说明所制备的咖啡果皮 CQDs 碳骨架排列无序，呈现典型的无定形碳结构。该结果与多数生物质基碳量子点的研究结论相一致，进一步印证了碳量子点通常由石墨相或无定形碳碎片构成的准球形荧光纳米颗粒这一普遍特征，也表明本试验通过咖啡果皮合成的 CQDs 具有与文献报道相符的典型结构特征。

2.2 荧光光谱分析

碳量子点凭借独特的电子结构展现出良好的荧光特性，通过荧光光谱测试可获得样品的最佳激发波长与发射波长，从而直观反映其荧光发光特征[28]。咖啡果皮碳量子点的激发和发射荧光光谱如图 2 所示。

由图 2A 可知，咖啡果皮基碳量子点的激发光谱在波长增加过程中出现明显的信号峰值，其中最大激发峰位于 397 nm，即为该材料的最优激发波长。在 397 nm 激发条件下测试得到的发射光谱（图 2B）显示，咖啡果皮 CQDs 在 530 nm 处呈现出强而稳定的荧光发射信号，峰形宽缓且无杂峰干扰。整体荧光光谱结果表明，本试验制备的咖啡果皮碳量子点荧光响应显



A. 激发荧光光谱；B. 发射荧光光谱。

图 2　咖啡果皮 CQDs 的荧光光谱

Fig.2　Fluorescence spectra of coffee peel CQDs

著、发光性能优异，这一特征与目前生物质源碳量子点的典型荧光规律相一致，进一步证明样品具有良好的光学品质与应用潜力。

较宽的发射峰以及随激发波长变化而发生红移的发射波长，是碳量子点典型的光学特征，这一现象与其表面含氧、含氮官能团引起的激发依赖性密切相关。荧光光谱中激发峰与发射峰的位置和强度可有效反映样品表面官能团的种类、数量及结合状态。不同激发波长下咖啡果皮碳量子点（CQDs）的荧光光谱如图 3 所示。

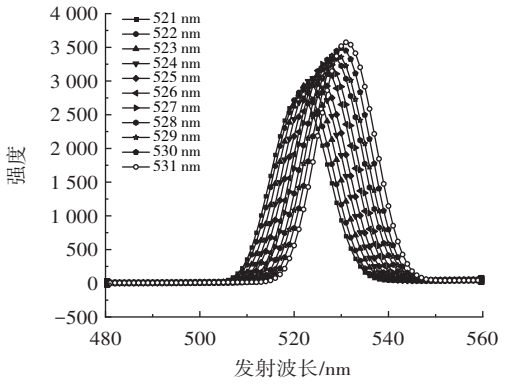


图 3　咖啡果皮 CQDs 在不同激发波长下的荧光光谱

Fig.3　Fluorescence spectra of coffee peel CQDs at different excitation wavelengths

由图 3 可知，咖啡果皮 CQDs 的发射波长随激发波长的增加呈现明显的红移规律，该结果直接证明样品表面存在丰富的含氧与含氮官能团。含氧、含氮官能团作为表面缺陷位点，是碳量子点产生荧光效应的重要结构基础，也进一步说明本试验制备的咖啡果皮碳量子点具有典型的荧光材料结构特征。

2.3　傅里叶变换红外光谱分析

红外光谱法拥有检测耗时短、特异性高、无损伤样品等特点，不仅可在几秒乃至几十秒内采集到高水准的光谱数据，还能一次性完成物质多组分的定量与定性分析[25]，傅里叶变换红外光谱对咖啡果皮 CQDs 表面官能团的分析如图 4 所示。

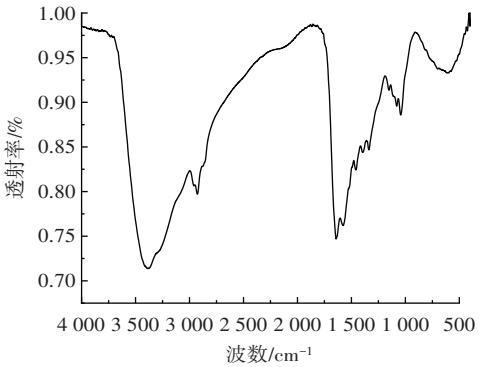


图 4　咖啡果皮 CQDs 傅里叶变换红外光谱

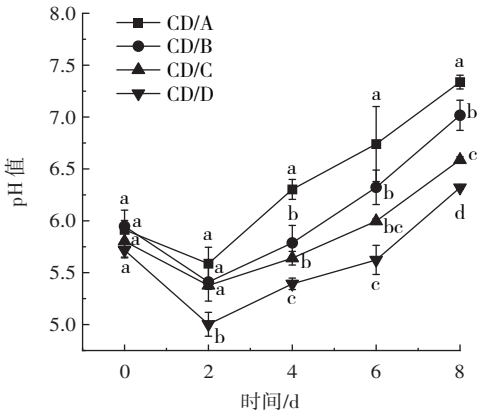
Fig.4　Fourier transform infrared spectrum of coffee peel CQDs

由图 4 可知，在 3 224 cm^{-1} 处出现的特征吸收峰归属于—OH 的伸缩振动，1 579 cm^{-1} 处的吸收峰对应—C═O 的伸缩振动，而 1 504 cm^{-1} 处的吸收峰则由 N—H 的伸缩振动产生。上述结果表明，咖啡果皮 CQDs 表面含有羟基、羰基和氨基等极性官能团。这些官能团可通过氢键结合、静电相互作用等方式与冷鲜猪肉中的腐败微生物或底物发生有效结合，从而为进一步阐明咖啡果皮碳量子点的保鲜作用机制提供了重要的结构依据。

2.4　pH 值

冷鲜猪肉的酸碱度可通过 pH 值体现，该指标与肉质色泽、嫩度、持水性、风味特性及保质期密切相关，常作为评估肉类新鲜度的重要参数。宰后猪胴体会经历 pH 值的 V 型波动：pH 值下降主要是肌糖原在无氧条件下酵解生成乳酸所致，而随着贮藏时间不断延长，猪肉内源酶与微生物代谢活动会逐步生成碱性含氮物质，进而使 pH 值出现回升趋势[29]。一般情况下，pH5.18~6.12 为一级鲜度，pH6.13~6.16 为二级鲜度，pH6.17 以上为变质肉。冷鲜猪肉 pH 值的变化如图 5 所示。

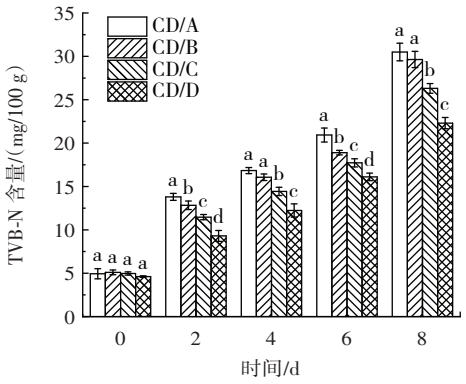
由图 5 可知，4 组样品初始 pH 值均处于 5.72~5.95 之间，符合一级鲜度标准（pH5.18~6.12），表明试验用冷鲜猪肉初始品质均一；贮藏期间各组 pH 值均



不同小写字母表示组间差异显著(P<0.05)。

图5 冷鲜猪肉pH值的变化

Fig.5 Changes in the pH value of chilled fresh pork



不同小写字母表示组间差异显著(P<0.05)。

图6 冷鲜猪肉TVB-N含量的变化

Fig.6 Changes in TVB-N content of chilled fresh pork

呈现先下降后持续上升的趋势,第2天为pH值最低点,其中CD/A降幅较小,可能与初期冷鲜肉在成熟的过程中排酸有关;而其余3组,除排酸外可能还与加入的保鲜涂抹液中的乙酸残留有关,使得pH值大幅度降低,之后随腐败进程逐步升高,这一规律与猪肉僵直解僵、微生物代谢产碱的腐败过程一致。CD/A一级鲜度仅维持至第2天,第4天pH值升至6.30,率先进入变质范围,保鲜效果最差;低浓度CD/B可将一级鲜度延长至第4天(pH值为5.79),第6天pH值升至6.32,进入变质阶段,体现出初步抑菌作用;中浓度CD/C一级鲜度维持至第4天(pH值为5.64),较对照组延长2 d;高浓度CD/D一级鲜度可稳定维持至第6天(pH值为5.62),第8天pH值升至6.32才进入变质阶段,较对照组延长4 d,保鲜效果最优。

结果表明,保鲜涂抹液浓度越高,对冷鲜猪肉的保鲜作用越明显,CD/D整体效果最佳。CQDs的抑菌作用存在明显浓度效应,可通过抑制腐败菌生长、降低蛋白质降解和碱性物质生成,减缓贮藏过程中pH值升高,从而保持肉品新鲜度。本研究中高浓度CD/D通过增强抑菌效果,有效延长了猪肉一级鲜度的保持时间,可为CQDs类保鲜涂抹液在猪肉保鲜中的合理应用提供参考。

2.5 TVB-N含量

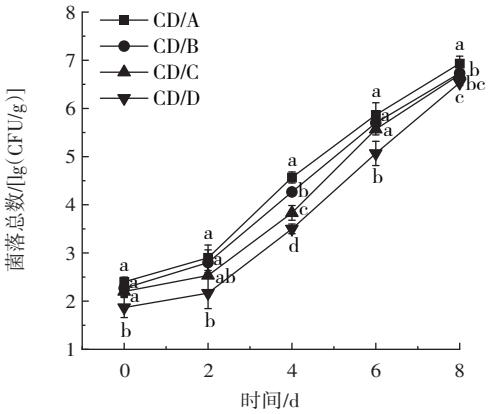
TVB-N含量是指动物性食品在微生物作用下,蛋白质分解产生的碱性含氮挥发性物质的总量。该指标直接反映了肉品中蛋白质分解产物的累积效应,是评判腐败程度的重要生化参数。TVB-N含量与肉腐败的程度成正比,是鉴定肉新鲜度的一个重要指标[30]。根据GB 2707—2016《食品安全国家标准 鲜(冻)畜、禽产品》中的规定,新鲜猪肉的TVB-N含量低于15 mg/100 g为合格。冷鲜猪肉TVB-N含量的变化如图6所示。

由图6可知,贮藏期间各组TVB-N含量均随时间升高,表明腐败进程持续推进。初始阶段(第0天),各组TVB-N含量为4.61~5.10 mg/100 g,组间无显著差异(P>0.05),初始状态一致。第2天,CD/A的TVB-N含量为13.80 mg/100 g(仍合格),CD/B、CD/C、CD/D分别为12.83、11.47、9.30 mg/100 g,较CD/A降低了6.99%、16.90%、32.61%,保鲜涂抹液显著抑制了TVB-N的生成,且浓度越高抑制效果越强。第4天,CD/A、CD/B的TVB-N含量分别升至16.83、16.07 mg/100 g,超出合格阈值;CD/C、CD/D的TVB-N含量仍维持在合格范围(14.43、12.23 mg/100 g),中、高浓度保鲜涂抹液可延长保质期。第6天,所有组均进入腐败阶段,CD/B、CD/C、CD/D的TVB-N含量较CD/A分别降低了9.71%、15.33%、23.09%,高浓度组抑腐优势持续。第8天,CD/A的TVB-N含量达到峰值(30.50 mg/100 g),CD/B、CD/C、CD/D的TVB-N含量分别为29.64、26.31、22.30 mg/100 g,较CD/A降低了2.82%、13.75%、26.88%,进一步证实涂抹保鲜涂抹液浓度与抑腐效果呈正相关。结果表明,该保鲜涂抹液可有效抑制冷鲜猪肉TVB-N生成,显著延缓腐败变质,且保鲜效果随浓度升高而增强,其中CD/D效果最优,可明显延长猪肉货架期并提升贮藏稳定性。

2.6 菌落总数

微生物增殖是引发冷鲜猪肉腐坏的主导因素,开展菌落总数(total viable count,TVC)检测,既能够评估样品的微生物污染状况与卫生等级,也可对食品新鲜度、保质期以及加工环节的卫生管控成效做出辅助判断,通过监测菌落总数在储存过程中的增长规律,能够推断食品在既定条件下的保质时长,为其储存与流通环节的方案制定提供依据[31]。根据GB/T 9959.2—2008《分割鲜、冻猪瘦肉》中的规定,经分割的冷藏鲜猪肉中的菌落总数低于1×10^6 CFU/g [6.0 lg(CFU/g)]为合格。冷鲜猪肉菌落总数的变化如图7所示。

由图7可知,贮藏期间各组TVC值均随时间升



不同小写字母表示组间差异显著(P<0.05)。

图 7 冷鲜猪肉菌落总数的变化

Fig.7 Changes in the total number of colonies of chilled fresh pork

高,初始第 0 天各组为 1.867~2.400 lg(CFU/g),CD/A 最高[2.400 lg(CFU/g)],其他组均更低且随浓度升高而降低;第 2 天 CD/A 的 TVC 值为 2.900 lg(CFU/g),CD/B、CD/C、CD/D 分别为 2.800、2.533、2.167 lg(CFU/g),较其分别降低 3.45%、12.66%、25.28%;第 6 天 CD/A 的 TVC 值达 5.867 lg(CFU/g)(接近合格上限),CD/B、CD/C、CD/D 的 TVC 值分别为 5.700、5.567、5.067 lg(CFU/g),均保持合格且抑菌效果随浓度提升而增强;第 8 天 CD/A 升至 6.933 lg(CFU/g),CD/B、CD/C、CD/D 的 TVC 值分别为 6.733、6.700、6.533 lg(CFU/g),均超出合格标准,CD/B、CD/C、CD/D 较 CD/A 分别降低 2.89%、3.36%、5.77%。结果表明,咖啡果皮 CQDs 保鲜涂抹液可显著抑制猪肉菌落总数增长,延缓腐败变质,且抑菌效果随浓度升高而增强,其中 CD/D 表现最优,能有效提升冷鲜猪肉贮藏稳定性。高浓度组抑菌更突出,推测是高剂量 CQDs 更易作用于微生物细胞,阻断其生长代谢。

3 结论

本研究选取咖啡果皮为原料制备碳量子点,对其理化特性进行了表征,并验证了其在冷鲜猪肉保鲜中的应用效果。结果显示,咖啡果皮 CQDs 为无定形无序碳结构,表面富含含氧、含氮官能团,表明该类官能团是其荧光特性的核心基础,符合 CQDs 典型的结构特征;冷藏过程中,CD/A 腐败变质现象显著,pH 值由 5.91 上升至 7.34,TVB-N 含量由 4.940 mg/100 g 升至 30.500 mg/100 g,菌落总数从 2.400 lg(CFU/g)增长至 6.933 lg(CFU/g)。经不同浓度咖啡果皮 CQDs 保鲜涂抹液处理后,CD/B、CD/C、CD/D 的 3 项指标增幅均显著降低,且保鲜效果与 CQDs 浓度呈正相关,其中 CD/D 保鲜效果最优。由此证实,高浓度咖啡果皮 CQDs 可有效延缓冷鲜猪肉腐败进程、延长货架期。本研究实现了咖啡加工副产物的高值化资源化利用,达成了农业废弃物利用与食品绿色保鲜的有机结合,为天然食品保鲜材料的研发与应用提供了有效的理论依据和实践支撑。未来可进一步深入探究其保鲜分子机制,优化 CQDs 规模化制备工艺,助力该保鲜技术的产业化推广与升级。

参考文献:

[1] DOS SANTOS É M, DE MACEDO L M, TUNDISI L L, et al. Coffee by-products in topical formulations: A review[J]. Trends in Food Science & Technology, 2021, 111: 280-291.

[2] PATIL S, PIMPLEY V, WARUDKAR K, et al. Valorisation of coffee pulp for development of innovative probiotic beverage using kefir: Physicochemical, antioxidant, sensory analysis and shelf life studies[J]. Waste and Biomass Valorization, 2022, 13(2): 905-916.

[3] 罗慧. 咖啡果皮果胶的提取制备、结构特征及其在酸奶与果酱中的应用[D]. 南昌: 南昌大学, 2024.
LUO Hui. Extraction and preparation of coffee pulp pectin, structural characterization and its application in yoghurt and Jams[D]. Nanchang: Nanchang University, 2024.

[4] THAKUR D, CHAUHAN A, JHILTA P, et al. Microbial chitinases and their relevance in various industries[J]. Folia Microbiologica, 2023, 68(1): 29-53.

[5] MANYATSHE A, SIBALI L L. A review on the recovery of cellulose, lignin, and hemicellulose biopolymers from the same source of lignocellulosic biomass-Methodology, characterization and applications[J]. Journal of Water Process Engineering, 2025, 70: 107037.

[6] PERELYGIN V V, ZHARIKOV M V, ZMITROVICH I V, et al. Chitin and its derivative chitosan: Distribution in nature, applications, and technology research (a review)[J]. International Journal of Medicinal Mushrooms, 2024, 26(10): 69-81.

[7] WANG J J, YUAN Y N, LIU Y, et al. Application of chitosan in fruit preservation: A review[J]. Food Chemistry: X, 2024, 23: 101589.

[8] SHAHBAZ U, BASHARAT S, JAVED U, et al. Chitosan: A multipurpose polymer in food industry[J]. Polymer Bulletin, 2023, 80(4): 3547-3569.

[9] RAJAKUMAR G, ZHANG X H, GOMATHI T, et al. Current use of carbon-based materials for biomedical applications—A prospective and review[J]. Processes, 2020, 8(3): 355.

[10] 刘晨艳, 闫凯, 马建中. 碳点及其纳米复合材料抗菌性能的研究进展[J]. 化工新型材料, 2022, 50(1): 56-61.
LIU Chenyan, YAN Kai, MA Jianzhong. Research progress on antibacterial property of carbon quantum dots and their nanocomposite[J]. New Chemical Materials, 2022, 50(1): 56-61.

[11] LAI L, HUANG X, SUN W L, et al. One-step synthesis of carbon quantum dots with antibacterial activity based on andrographolide[J]. Russian Journal of General Chemistry, 2022, 92(10): 2178-2185.

[12] VIBHUTE A, PATIL T, GAMBHIR R, et al. Fluorescent carbon quantum dots: Synthesis methods, functionalization and biomedical applications[J]. Applied Surface Science Advances, 2022, 11: 100311.

[13] DAS P, GANGULY S, MAITY P P, et al. Waste chimney oil to nanolights: A low cost chemosensor for tracer metal detection in practical field and its polymer composite for multidimensional activity[J]. Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology, 2018, 180: 56-67.

[14] FAN K, ZHANG M, FAN D C, et al. Effect of carbon dots with chitosan coating on microorganisms and storage quality of modified-atmosphere-packaged fresh-cut cucumber[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2019, 99(13): 6032-6041.

[15] 李涵, 潘扬, 张莹, 等 . 黄鳝骨基碳量子点的制备及抑菌性能研究[J]. 武汉轻工大学学报, 2024, 43(1): 1-8, 27.
LI Han, PAN Yang, ZHANG Ying, et al. Preparation and antibacterial properties of carbon quantum dots with *Monopterus albus* bones[J]. Journal of Wuhan Polytechnic University, 2024, 43(1): 1-8, 27.

[16] 杜雪蓉, 罗玉龙, 董玉珊, 等 . 食品源碳点在肉品保鲜中的应用研究进展[J]. 食品工业科技, 2025, 46(13): 421-430.
DU Xuerong, LUO Yulong, DONG Yushan, et al. Research progress on the application of food-derived carbon dots in meat preservation[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(13): 421-430.

[17] 杨娜, 魏齐敏, 杨卫灵, 等 . 碳量子点—壳聚糖涂膜对鲜切香菇的保鲜效果[J]. 食品与机械, 2023, 39(3): 136-141.
YANG Na, WEI Qimin, YANG Weiling, et al. Effects of carbon quantum dot-chitosan coating on preservation of fresh-cut shiitake mushroom[J]. Food & Machinery, 2023, 39(3): 136-141.

[18] 马玉林, 樊晓慧, 毛林韩, 等 . PVA-碳量子点复合荧光水凝胶的制备及性能研究[J]. 湖北大学学报(自然科学版), 2024, 46(1): 77-85.
MA Yulin, FAN Xiaohui, MAO Linhan, et al. Preparation and properties of PVA-carbon quantum dots composite fluorescent hydrogels[J]. Journal of Hubei University (Natural Science), 2024, 46(1): 77-85.

[19] TRAVLOU N A, GIANNAKOUDAKIS D A, ALGARRA M, et al. S- and N-doped carbon quantum dots: Surface chemistry dependent antibacterial activity[J]. Carbon, 2018, 135: 104-111.

[20] 韩天奇, 任大勇, 牛海月, 等 . 食品基碳量子点的制备、生物活性及其在食品包装中的应用研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2024, 15(7): 113-121.
HAN Tianqi, REN Dayong, NIU Haiyue, et al. Research progress on the preparation, biological activity and application in food packaging of food-based carbon quantum dots[J]. Journal of Food Safety & Quality, 2024, 15(7): 113-121.

[21] 张洁 . 碳量子点荧光探针的一步合成及分析应用[D]. 延安: 延安大学, 2022.
ZHANG Jie. One-step synthesis and analytical application of carbon quantum dot fluorescent probes[D]. Yan′an: Yan′an University, 2022.

[22] 林伟琦 . 基于傅里叶变换衰减全反射红外光谱鉴别山茶油掺假[J]. 食品安全质量检测学报, 2025, 16(2): 215-223.
LIN Weiqi. Identification of *Camellia* oil adulteration by attenuated total reflectance-Fourier transform infrared spectroscopy[J]. Journal of Food Safety & Quality, 2025, 16(2): 215-223.

[23] ZHAN J, PENG R J, WEI S X, et al. Ethanol-precipitation-assisted highly efficient synthesis of nitrogen-doped carbon quantum dots from chitosan[J]. ACS Omega, 2019, 4(27): 22574-22580.

[24] PATRA S, SINGH M, SUBUDHI S, et al. One-step green synthesis of in-situ functionalized carbon quantum dots from Tagetes *patula* flowers: Applications as a fluorescent probe for detecting Fe^{3+} ions and as an antifungal agent[J]. Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry, 2023, 442: 114779.

[25] GOSWAMI J, BARMAN H, HAZARIKA P, et al. Biomass-derived phosphorous-doped carbon quantum dots (P-CQD): An excellent biocompatible material for in-vitro cell imaging[J]. Inorganic Chemistry Communications, 2024, 162: 112276.

[26] LI H X, LIU Y D, GAO X, et al. Synthesis, characterization and antibacterial properties of chitosan/Ag_2S/CQDs hydrogel[J]. Chemical Papers, 2023, 77(1): 207-217.

[27] LIU Y, FENG S, ZHU Q F. The effect of CQDs′ particle size on its fluorescence behavior and Cu^{2+} detection[J]. Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy, 2025, 341: 126408.

[28] 鲁思宇, 刘悠嵘, 蔡佳, 等 . 含碳量子点的聚合物分散液晶薄膜的电光及荧光特性[J]. 液晶与显示, 2026, 41(2): 177-187.
LU Siyu, LIU Yourong, CAI Jia, et al. Electro-optical and fluorescent properties of polymer-dispersed liquid crystal films containing carbon quantum dots[J]. Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays, 2026, 41(2): 177-187.

[29] ZHENG K W, ZHANG J B, YANG F, et al. Properties and biological activity of chitosan-*Coix seed* starch films incorporated with nano zinc oxide and *Artemisia annua* essential oil for pork preservation[J]. LWT-Food Sdence and Technology, 2022, 164: 113665.

[30] HE K, HAN S Y, TANG X Y, et al. Determination of total volatile basic nitrogen (TVB-N) content in beef based on airflow and multipoint laser technique[J]. Food Analytical Methods, 2022, 15(11): 3104-3115.

[31] YANG R Q, ZHU K Y, ZHAO Y Y, et al. Rapid classification and quantitative prediction of aflatoxin B1 content and colony counts in nutmeg based on electronic nose[J]. Molecules, 2025, 30(12): 2538.

加工编辑:李文欣
收稿日期:2026-03-26