DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20251014002
引用格式: 邓婕, 张晓梅, 高丽娟, 等. 不同气调包装对贮藏期冷鲜牛肉新鲜度及微生物群落的影响[J]. 食品安全质量检测学报, 2026, 17(4): 53–60.
DENG J, ZHANG XM, GAO LJ, *et al*. Effects of different modified atmosphere packaging on freshness and microbial community of chilled beef during storage [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2026, 17(4): 53–60. (in Chinese with English abstract).

不同气调包装对贮藏期冷鲜牛肉新鲜度及微生物群落的影响

邓　婕[1#], 张晓梅[1#], 高丽娟[1], 闫立婷[2], 祁玉霞[2], 李蚺童[3], 左　嘉[1], 刘　悦[1], 马巧云[1], 白　羽[1], 王秋水[1*]

[1. 北京市科学技术研究院分析测试研究所(北京市理化分析测试中心), 北京　100089;
2. 北京雁栖月盛斋清真食品有限公司, 北京　101407; 3. 北京农学院, 北京　102206]

摘　要: 目的　探究不同气调包装对于贮藏期冷鲜牛肉新鲜度和微生物群落结构变化的影响。**方法**　本研究设置 4 种处理组, 气调组 1 (LAR) (20% O_2, 10% N_2 和 70% CO_2+吸水垫)、气调组 2 (ARAB) (20% O_2, 10%N_2 和 70% CO_2+自制抑菌吸水垫)、气调组 3 (MAR) (45% O_2, 10% N_2 和 45% CO_2+吸水垫)和气调组 4 (HAR) (60% O_2, 20% N_2 和 20% CO_2+吸水垫)。4 种不同气调包装冷鲜牛肉在 4 ℃下保存 10 d, 定期对贮藏期内的生鲜牛肉测定感官、pH、挥发性盐基氮(total volatile basic nitrogen, TVB-N)、硫代巴比妥酸反应物(thiobarbituric acid reactive substances, TBARs)、滴水损失率和菌落总数, 同时分析微生物群落结构的变化。**结果**　在 10 d 的贮藏期内, 所有气调包装处理组的肉样保持在一级鲜度, TBARs 未超过标准限值, 在贮藏的第 10 d 感官均出现了产生异味等不可接受的情况。菌落总数在 0~6 d 呈现不同程度的增长之后趋于平稳, TVB-N 在贮藏的 6 d 内未超过限值(15 mg/100 g)。滴水损失率所有组别在贮藏期内都有所增加, MAR 组变化率最小。在贮藏开始时, 所有气调包装处理组的优势菌门均为厚壁菌门(Firmicutes)、放线菌门(Actinobacteriota)、变形菌门(Proteobacteria)和拟杆菌门(Bacteroidota), 随着贮藏时间的增加, 优势菌门也随之发生了变化。高氧气含量处理组 HAR 的优势菌门为厚壁菌门和变形菌门, 而其他组别均为厚壁菌门。在属水平上, HAR 处理组的优势菌属为明串珠菌属(*Leuconostoc*)、乳杆菌属(*Lactobacillus*)、乳球菌属(*Lactococcus*)、沙雷氏菌属(*Serratia*)和假单胞菌属(*Pseudomonas*), 其他处理组的优势菌属为明串珠菌属、乳杆菌属、乳球菌属。**结论**　在本研究中不同气调包装对于冷鲜牛肉在贮藏期的新鲜度和微生物群落均有一定的影响。值得注意的是 LAR、ARAB 和 MAR 组的优势菌属均为乳酸菌, 而氧气含量达到 60%的 HAR 组的优势菌属为假单胞菌属、沙雷氏菌属等菌属。

关键词: 气调包装; 冷鲜牛肉; 新鲜度; 高通量测序; 微生物群落

收稿日期: 2025-10-14
基金项目: 北京市科学技术研究院“北科学者”项目(25CE-BS-01)
#邓婕和张晓梅为共同第一作者

第一作者: 邓婕(1987—), 女, 主要研究方向为微生物多样性分析。E-mail: dengjie_sun@163.com
张晓梅(1985—), 女, 主要研究方向为分析化学。E-mail: 395706031@qq.com
***通信作者:** 王秋水(1991—), 女, 副研究员, 主要研究方向为微生物多样性分析。E-mail: wangqius9182901@hotmail.com

Effects of different modified atmosphere packaging on freshness and microbial community of chilled beef during storage

DENG Jie[1#], ZHANG Xiao-Mei[1#], GAO Li-Juan[1], YAN Li-Ting[2], QI Yu-Xia[2], LI Ran-Tong[3], ZUO Jia[1], LIU Yue[1], MA Qiao-Yun[1], BAI Yu[1], WANG Qiu-Shui[1*]

(1. *Institute of Analysis and Testing*, *Beijing Academy of Science and Technology*, *Beijing Center for Physical and Chemical Analysis*, *Beijing* 100089, *China*; 2. *Beijing Yanqi Yueshengzhai Islamic Food Co*., *Ltd*., *Beijing* 101407, *China*; 3. *Beijing University of Agriculture*, *Beijing* 102206, *China*)

ABSTRACT: Objective To explore the effects of different modified atmosphere packaging on the freshness and microbial community structure changes of chilled beef during storage. **Methods** This study established 4 treatment groups: Modified atmosphere packaging group 1 (LAR) (20% O_2, 10% N_2, 70% CO_2+absorbent pad), modified atmosphere packaging group 2 (ARAB) (20% O_2, 10% N_2, 70% CO_2+self-made antibacterial absorbent pad), modified atmosphere packaging group 3 (MAR) (45% O_2, 10% N_2, 45% CO_2+absorbent pad), and modified atmosphere packaging group 4 (HAR) (60% O_2, 20% N_2, 20% CO_2+absorbent pad). The 4 kinds of different types of chilled beef in modified atmosphere packaging were stored at 4 ℃ for 10 days. The sensory properties, pH, total volatile basic nitrogen (TVB-N), thiobarbituric acid reactive substances (TBARs), drip loss rate and total viable count of the chilled beef during the storage period were regularly measured, and the changes in the microbial community structure were analyzed simultaneously. **Results** During the 10 d storage period, all the samples treated with modified atmosphere packaging remained at the first grade of freshness, and the TBARs did not exceed the standard limit. On the 10th day of storage, all the samples showed unacceptable conditions such as unpleasant odors. The total number of colonies increased to varying degrees from 0 to 6 days and then tended to stabilize. TVB-N did not exceed the limit (15 mg/100 g) within the 6-day storage period. The drip loss rate increased in all groups during the storage period, with the MAR group showing the smallest rate of change. At the beginning of storage, the dominant phyla in all modified atmosphere packaging treatment groups were Firmicutes, Actinobacteriota, Proteobacteria and Bacteroidota. As the storage time increased, the dominant phyla also changed. In the high oxygen content treatment group HAR, the dominant phyla were Firmicutes and Proteobacteria, while in the other groups, they were all Firmicutes. At the genus level, the dominant genera in the HAR treatment group were *Leuconostoc*, *Lactobacillus*, *Lactococcus*, *Serratia* and *Pseudomonas*, while in the other treatment groups, the dominant genera were *Leuconostoc*, *Lactobacillus* and *Lactococcus*. **Conclusion** In this study, different modified atmosphere packaging has certain effects on the freshness and microbial community of chilled beef during storage. It is worth noting that the dominant bacterial genera in the LAR, ARAB and MAR groups are all lactic acid bacteria, while in the HAR group with an oxygen content of 60%, the dominant bacterial genera are *Pseudomonas*, *Serratia* and other genera.

KEY WORDS: modified atmosphere packaging; chilled beef; freshness; high-throughput sequencing; microbial community

0 引 言

近年来，随着社会经济发展及人们生活水平提高，我国对于牛肉的消费呈现了明显增长的趋势。目前，我国牛肉消费主要包括冷冻肉、冷鲜肉和热鲜肉[1]。冷鲜牛肉因其低脂肪、高蛋白成为世界上最受欢迎的肉类之一，其富含矿物质、脂肪酸和维生素等大量营养素[2–3]。然而在贮藏过程中牛肉容易受到脂质氧化和微生物增值等因素的影响，引起腐败变质和品质等方面的下降[3]。食品腐败会造成资源浪费还会对食品安全带来威胁。因此，研究不同食品的腐败微生物对控制其腐败变质具有重要意义[4]。

冷鲜牛肉的保存方式通常采用冷藏、普通包装、真空包装以及气调包装等方式[2–3]。气调包装是通过调整贮藏环境中的气体组成和比例可以有效地抑制微生物的增长和脂肪氧化等问题，同时也可以维持食品原有色泽和营养成分，从而延长食品的货架期，因此，被广泛的应用于肉类保鲜[3,5]。用于冷鲜牛肉的气调包装中常用气体主要为氧气(O_2)、二氧化碳(CO_2)和氮气(N_2)等[5]，O_2 可以维持肉的

鲜红色泽, 抑制厌氧微生物的繁殖, CO_2 可以有效地抑制微生物繁殖, 减缓肉类氧化和酶活性, N_2 属于惰性气体, 防止包装内压力下降, 同时能抑制肉品氧化酸败[1]。

高通量测序技术能够在微生物群落的研究上实现大规模平行测序, 与传统微生物培养方法相比其可检测出更多种类的微生物在样品中的丰度变化, 此外该技术还具有高灵敏度、价格低、测序效率高等优点, 因此被广泛应用于微生物群落多样性的研究[6–7]。不同气体成分对细菌群落的组成具有重要影响, 借助高通量测序技术来探究不同类型气调包装中肉类所发生的微生物群落演替正成为当下的热点研究方向[7]。

目前, 大多数研究主要集中于包装方式、抑菌剂及贮藏温度对于冷鲜牛肉中微生物群落结构及货架期的影响, 结果表明不同的气调包装方式结合抑菌剂或低温贮藏可以有效的延长货架期[8–9], 但对于气调包装低温贮藏冷鲜牛肉中理化品质和微生物群落结构的影响变化研究相对较少。因此, 本研究以冷鲜牛肉为研究对象, 针对不同气调包装冷鲜牛肉的感官、pH、丙二醛等品质指标分析, 同时利用高通量测序技术对其微生物群落结构的变化进行分析, 进而揭示不同气调包装对于冷鲜牛肉贮存品质及微生物群落的影响, 以期为冷鲜牛肉货架期延长提供理论依据。

1　材料与方法

1.1　材料与试剂

冷鲜牛肉(北京某企业提供); 吸水垫(安徽福桥塑业有限公司); 菌落总数测试片、9 mL 生理盐水、225 mL 生理盐水(北京陆桥技术股份有限公司); 邻苯二甲酸氢钾标准溶液(pH=4.00)、磷酸盐标准溶液(pH=6.88)、氯化钾、甲基红、溴甲酚绿、乙二胺四乙酸二钠(分析纯, 国药集团化学试剂有限公司); 氧化镁、硼酸、1,1,3,3-四乙氧基丙烷(分析纯, 上海麦克林生化科技有限公司); 硫酸标准滴定溶液(0.1 mol/L, 北京北方伟业计量技术研究院); 三氯乙酸(分析纯, 北京百灵威科技有限公司); 硫代巴比妥酸(分析纯, 山东科源生化有限公司)

1.2　仪器设备

LRH-250 生化培养箱(上海一恒科学仪器有限公司); HG-80 高压灭菌器(日本 Wada Stainless kogyo 公司); SQP 型电子天平(精度 0.1 mg)、PY-ASI 复合电极(德国赛多利斯科学仪器有限公司); BHC-1600IIA/B3 型生物安全柜(AIRTECH 苏州安泰空气技术有限公司); PHSJ- 4A pH 计(上海仪电科学仪器股份有限公司); KD-310 自动凯氏定氮仪(嘉盛香港科技有限公司); SHA-2A 冷冻水浴振荡器(常州市天竟实验仪器厂); DZKW-S-6 电热恒温水浴锅(北京市永光明医疗仪器有限公司); UV-1900 紫外可见分光光度计[岛津企业管理(中国)有限公司]; NanoPhotometer®分光光度计(德国 Implen GmbH 公司); Qubit®2.0 荧光计(美国 Thermo Fisher Scientific 公司)。

1.3　试验方法

1.3.1　样品处理

将鲜牛肉切片, 采用不同气调方式对鲜牛肉进行包装, 每个包装分装 250 g 鲜牛肉, 不同气调方式见表 1。将包装好的鲜牛肉放置在 4 ℃冰箱, 每组 4 个样品, 分别在第 0、2、4、6、8、10 d 对不同气调方式的鲜牛肉进行菌落总数、微生物群落分析、pH、挥发性盐基氮(total volatile basic nitrogen, TVB-N)、丙二醛(malondialdehyde, MDA)、滴水损失率的检测以及感官评价。

表 1　冷鲜牛肉不同气调方式
Table 1　Different conditioning methods for chilled beef

组别	包装方式
气调组 1 (LAR)	20% O_2, 10% N_2 和 70% CO_2+吸水垫
气调组 2 (ARAB)	20% O_2, 10% N_2 和 70% CO_2+自制抑菌吸水垫
气调组 3 (MAR)	45% O_2, 10% N_2 和 45% CO_2+吸水垫
气调组 4 (HAR)	60% O_2, 20% N_2 和 20% CO_2+吸水垫

1.3.2　感官评价

本研究参照何金岭[10]方法并稍作修改, 选取 5 名专业人员对冷鲜牛肉进行感官评价, 计算均值进行感官分析。具体评价标准见表 2。

表 2　冷鲜牛肉感官评价
Table 2　Sensory evaluation of chilled beef

指标	1~2 分	3~4 分	5~6 分	7~8 分	9~10 分
色泽	灰褐	暗红	紫红	浅红	均匀红色
气味	腐败臭味	有异味	稍有异味	无异味	鲜肉味
黏度	非常黏手	黏手	稍黏	顺滑	无黏度
汁液量	很多水	较多水	少量水	稍有水	无

1.3.3　pH 测定

参照何金岭[10]方法, 进行 pH 测定。

1.3.4　挥发性盐基氮测定

参照徐静等[11]方法, 进行挥发性盐基氮测定。

1.3.5　丙二醛测定

参照赵文颖等[12]方法, 进行丙二醛的测定。

1.3.6　滴水损失率测定

参照司马胜雪等[13]方法, 并稍做修改。将每份牛肉样品在拆封前及拆封后分别及时称重并记录质量。注意拆封样品并取出牛肉时, 确保其渗出的汁液尽数留在包装盒内部而不随牛肉被带出。样品的滴水损失率按如下公式(1)进行计算。

$$W/\% = \frac{W_3 - W_2}{W_1 - W_2} \times 100\% \quad (1)$$

式中: W 为滴水损失率, %; W_1 为未拆封样品总重量, g;

W_2 为第 0 d 样品拆封后吸水垫+包装盒重量, g; W_3 为第 2 d 起样品拆封后吸水垫+包装盒重量, g。

1.3.7 菌落总数的测定

参照何金岭[10]方法, 稍作修改。应用 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》中纸片法进行测定。

1.3.8 微生物群落分析

将所有牛肉样品置于干冰上, 运送至北京诺禾致源科技股份有限公司进行核酸提取和测序工作。核酸提取后, 使用 1%琼脂糖凝胶评估提取 DNA 的质量, 使用 NanoPhotometer® 分光光度计检测 DNA 纯度(OD260/OD280 和 OD260/OD230)。使用 Qubit®2.0 荧光计中的 QubitA®dsDNA 检测试剂盒测量 DNA 浓度。核酸提取后, 构建宏基因组文库, 然后按照 Illumina NovaSeq6000 平台的测序要求进行测序。

1.4 数据处理

所有试验均进行 4 次重复, 采用 Microsoft Excel 2010 整理汇总数据, 采用 GraphPad Prism 9 进行处理绘图和单因素方差分析。

2 结果与分析

2.1 不同气调包装对感官评价的影响

由图 1 可知, 随着贮藏时间的增加, 所有组别的 4 种感官指标的评价分数均呈现不断下降的趋势。其中, 4 个组别的色泽、气味、黏度和汁液量指标在第 0 d 和第 2 d 的贮藏时间内均无较大差异, 而当贮藏天数到达第 4 d 时, 各组别之间感官指标的评价分数均有所下降, 但仍保持良好的感官品质。当贮藏天数到达第 10 d 时, 所有组别均表现出色泽暗淡, 产生异味等感官不可接受问题。其中在贮藏期的第 2~10 d 间, O_2 含量较高的 MAR 和 HAR 组其感官指标包括色泽、气味、黏度和汁液量均优于低 O_2 含量 LAR 和 ARAB 组。MAR (45% O_2、10% N_2、45% CO_2)在 10 d 的贮藏期内, 感官评价的总平均分最高, 这与褚益可等[14]研究表明 45% O_2、30% CO_2、25% N_2 的包装下牛肉保鲜效果最佳, 结果较为一致。张翔等[15]的研究也证实了这一点。由此可知, MAR 组相对较高的 O_2 比例有助于维持肉品的色泽, 使其能相对较长时间的保持鲜艳, 而 45%的 CO_2 能有效抑制微生物的生长繁殖, 从而延缓异味的产生和感官品质的恶化。

2.2 不同气调包装对 pH 的影响

pH 是评价肉类新鲜度的指标之一, 是保持肉类中微生物生态平衡的重要因素之一[10]。低 pH 可以有助于维持牛肉的新鲜度[15]。

由图 2 可知, 随着贮藏时间的增加, 所有组别肉样的 pH 均呈现了不同程度的波动。其中, LAR 和 MAR 在 0~2 d pH 呈现明显的上升趋势, 而后下降。ARAB 和 HAR 在贮藏的 10 d 内 pH 呈现了下降的趋势, 其中 HAR 的 pH 波动最小。pH 的升高, 可能是由于微生物在贮藏过程中不断的生长繁殖后进行分解, 以及牛肉中本身带有的内源酶对蛋白质进行分解产生了氨、胺类及其他碱性物质导致鲜牛肉 pH 呈现上升的趋势[16]。pH 的下降可能与气调包装中 CO_2 有关, 在储存的 10 d 内形成了碳酸, 降低了 pH[17–18]。依据肉制品新鲜度等级评价: 一级鲜度的肉制品 pH=5.8~6.2, 二级鲜度的肉制品 pH=6.3~6.6, 腐败肉的 pH 在 6.7 以上[17]。由此可知, 所有组别的牛肉在 10 d 的贮藏期内均属于一级鲜度。

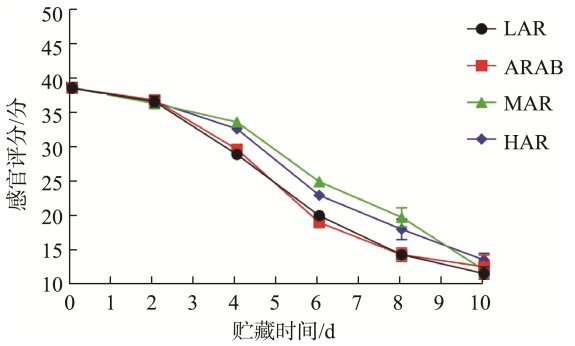


图 1 气调包装对冷鲜牛肉感官品质评价的影响

Fig.1 Effects of modified atmosphere packaging on the sensory quality evaluation of chilled beef

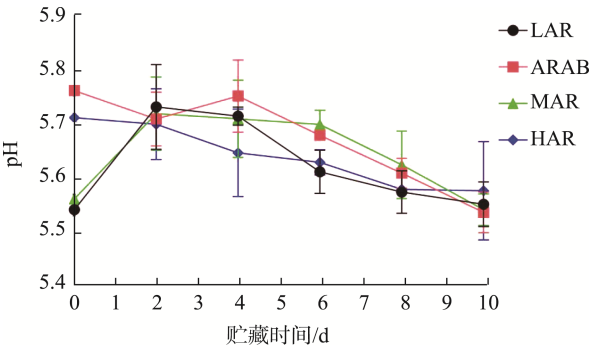


图 2 气调包装对冷鲜牛肉 pH 的影响

Fig.2 Effects of modified atmosphere packaging on the pH of chilled beef

2.3 不同气调包装对挥发性盐基氮的影响

TVB-N 是在储存过程中微生物及内源性酶作用下分解蛋白质产生氨、胺和其他挥发性碱性含氮物质的统称, 也是反映肉类新鲜度的重要指标之一[19–21]。

由图 3 可知, 所有组别在贮藏的 10 d 内, TVB-N 均呈现上升趋势。在贮藏的后期所有组别的 TVB-N 含量明显差异。在贮藏的 6 d 内所有组别的 TVB-N 均符合 GB 2707—2016《食品安全国家标准 鲜(冻)畜、禽产品》中的限量要求(≤15 mg/100 g) 在之后的贮藏期内所有组别均超过了国家标准。HAR 在所有组别中波动较小, 在贮

藏的 4 d 之后 TVB-N 低于其他组别，这可能与此处理组中高 O_2 含量(60%)有关，有研究表明在含中高 O_2 的气调包装中，TVB-N 的含量和上升趋势与 O_2 含量呈负相关[22]。此外，此处理组中 N_2 的含量也高于其他 3 个处理组，N_2 作为惰性气体，能预防食品油脂的酸败等不良反应，降低了 TVB-N 含量[23]。

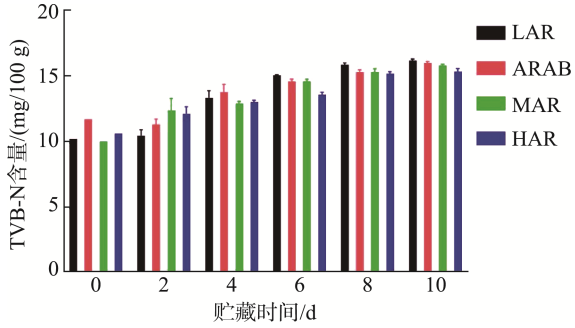


图 3　气调包装对冷鲜牛肉 TVB-N 的影响

Fig.3　Effects of modified atmosphere packaging on the TVB-N content of chilled beef

2.4　不同气调包装对硫代巴比妥酸反应物的影响

生鲜肉在运输贮藏过程中易发生脂质氧化，MDA 作为脂质氧化次级产物中含量最高的醛类分子，不仅与人体诸多代谢性、神经系统疾病等病理有关，还会通过引发生鲜肉中蛋白氧化进而引起色泽劣变，是影响肉类和肉制品品质以及消费者可接受性的主要因素[24–25]。在较高温度下，生成粉红色硫代巴比妥酸反应物(thiobarbituric acid reactive substances, TBARs)。TBARs 值越大表明积累的次级产物越多，脂质氧化程度越深[26]。目前主要以测定 TBARs 值来评价脂肪氧化程度，肉类产品中 TBARs 值超过 1.0 mg/kg 会对肉类产品的风味产生影响[27]。

由图 4 可知，随着贮藏时间的增长，TBARs 值也随之增长。在 10 d 的贮藏期内，所有组别 TBARs 值均未超过 1.0 mg/kg，说明各个组别的气调包装中不同比例的 CO_2 和 N_2 可以抑制冷鲜肉中细菌的活性，减缓牛肉的氧化速度[28]。其中，在贮藏期的第 8 d 时，MAR 和 HAR 组的 TBARs 值最低为 0.27 mg/kg，LAR 和 ARAB 组的 TBARs 值最高为 0.32 mg/kg。贮藏至第 10 d 时，LAR、ARAB、MAR 和 HAR 的 TBARs 值分别为 0.41、0.58、0.63、0.49 mg/kg，由此可知，不同气调方式中 O_2 含量对 TBARs 的影响不是很显著，有研究表明 O_2 含量在 50%~80%之间变化对 4 ℃贮藏的猪肉、牛排的氧化影响不大[28]。

2.5　不同气调包装对滴水损失率的影响

滴水损失是反映肉类保水性的重要品质指标，该指标与肉类的口感密切相关。由于滴水损失使肉品失水，导致肉品的口感变差。因此，滴水损失率是影响肉品质量的关键评价指标之一[29]。

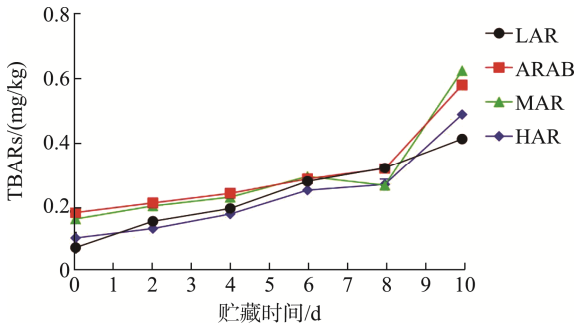


图 4　气调包装对冷鲜牛肉 TBARs 值的影响

Fig.4　Effects of modified atmosphere packaging on the TBARs content of chilled beef

由图 5 可知，随着贮藏时间的增长，滴水损失率也随之增长。所有组别滴水损失增加的速率基本相同。在贮藏期间，MAR 组滴水损失率变化最小，由第 0 d 的 0%增加至 10 d 的 6.68%，这与王洪江等[17]的研究结果一致。在贮藏的 0~4 d，LAR 和 ARAB 组的滴水损失率高于 MAR 和 HAR 组，这可能是由于 LAR 和 ARAB 两组气调包装中高 CO_2 所致，高 CO_2 会导致更高的滴水损失和肌肉的严重收缩[23]。在贮藏第 6 d 时，HAR 的滴水损失率最高为 8.50%，这可能与气调包装中 O_2 含量最高导致，有研究表明 O_2 含量在 30%~45%之间能有效的控制汁水流失[14]。

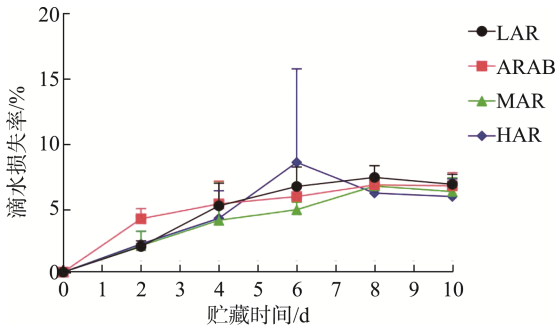


图 5　气调包装对冷鲜牛肉滴水损失率的影响

Fig.5　Effects of modified atmosphere packaging on the drip loss rate of chilled beef

2.6　不同气调包装对菌落总数的影响

肉品在贮藏期间，其内部的细菌增值可引起肉品的变质。菌落总数常被作为判别食品被污染程度的标志之一。同时，也可以应用这一方法观察细菌在食品中繁殖的动态，以便对被检样品进行卫生学评价提供依据。食品中菌落总数越多，说明食品质量越差，货架期越短，病原菌污染的可能性越大[3,16]。

由图 6 可知，在贮藏期的 0~6 d，随着贮藏时间的增加所有组别菌落总数均呈现不同程度的增长。第 8~10 d，所有组别菌落总数呈现平稳状态。在贮藏期结束时 HAR 组的菌落总数为 7.96 lg(CFU/g)，高于其余各组，这可能与该

组气调包装中高 O_2 含量有关，有研究表明一定的 O_2 含量可以抑制部分微生物的生长，但是过高的 O_2 含量不仅不会抑制乳酸菌等兼性厌氧菌的生长，还会为好氧菌提供良好的生长环境，使其迅速生长导致肉品的腐败[30]。在整个贮藏期内，LAR 和 ARAB 组的菌落总数变化低于其他两组，呈现了较为平稳的变化，这可能与该组中较高的 CO_2 含量有关，CO_2 含量超过 20%时就能起到明显的抑菌效果并且 CO_2 含量越高其抑菌效果越好[30]，因此这两个组别对于微生物的生长抑制效果优于其他两组。

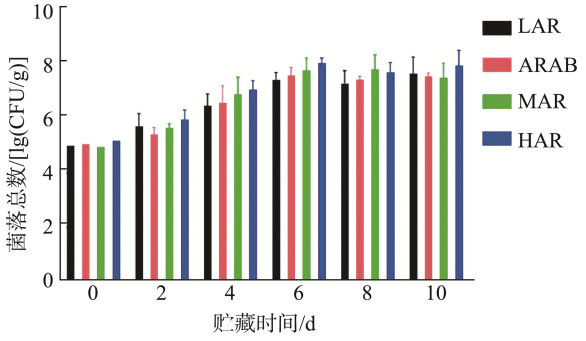


图 6 气调包装对冷鲜牛肉菌落总数的影响

Fig.6 Effects of modified atmosphere packaging on the total viable count of chilled beef

2.7 不同气调包装对微生物群落的影响

通过测序能够对每个样本在门、纲、目、科、属等多个分类水平上的微生物群落组成进行详细的分析[31]。本研究重点在门和属两个分类水平上，对生鲜牛肉在贮藏期间的微生物群落组成的变化进行分析。

生鲜牛肉在贮藏过程中细菌群落在门水平上的变化见图 7。由图 7 可知，在贮藏的第 0 d，所有组别的优势菌门均为厚壁菌门(Firmicutes)、放线菌门(Actinobacteriota)、变形菌门(Proteobacteria)和拟杆菌门(Bacteroidota)。有研究表明，厚壁菌门、放线菌门、变形菌门和拟杆菌门是肉类和肉制品中的优势菌门，常存在于鸡肉、牛肉、羊肉和猪肉中[32]，尤其是厚壁菌门和变形菌门是肉和肉制品中数量最多的菌群[7,33]。随着贮藏时间的增加，所有组别中的细菌群落结构均发生了变化，其中 LAR、ARAB 和 MAR 在贮藏期结束时的优势菌门为厚壁菌门，而 HAR 的优势菌门则为厚壁菌门和变形菌门。有可能是由于 HAR 气调包装中 CO_2 含量最低导致的这一差异。一般来说，CO_2 的浓度越高越可以抑制革兰氏阴性菌的生长，LAR、ARAB 和 MAR 这 3 组中 CO_2 含量较高抑制了革兰氏阴性的变形菌门，使得厚壁菌门成为了优势菌群[33]。

生鲜牛肉在贮藏过程中细菌群落在属水平上的变化见图 8。由图 8 可知，在贮藏的第 0 d，所有组别中肉食杆菌属(*Carnodacterium*)占比最高为优势菌属。在贮藏期结束时，所有组别的细菌群落也随之发生了变化。所有组别的肉食杆菌属的丰度减少，LAR、ARAB 和 MAR 组明串珠菌属(*Leuconostoc*)、乳杆菌属(*Lactobacillus*)和乳球菌属(*Lactococcus*)的丰度随之增加，而 HAR 还增加了沙雷氏菌属(*Serratia*)和假单胞菌属(*Pseudomonas*)。有研究表明在气调包装中乳杆菌属、肉食杆菌属(*Carnodacterium*)和假单胞菌属在肉品中为优势菌属并且与肉品的腐败存在关联[34]。乳酸菌包括明串珠菌属、乳杆菌属和乳球菌属等多个菌属[35]，属于兼性厌氧菌，既可以在有氧的条件下生长又可以在无氧的条件下生长，并且 CO_2 对其抑制的效果并不显著，因此在贮藏期结束时乳酸菌在各个处理组中均表现为优势菌属[7]。沙雷氏菌属是在肉类中一种典型的嗜冷细菌，在冷藏条件下可产生氨味和硫化异味，被认为是常见的腐败菌[7,36]。假单胞菌属是一类需氧的革兰氏阴性菌，被认为是低温有氧或高氧包装冷却肉贮藏后期的优势腐败菌[4,7]。由此可知，HAR 由于 O_2 含量最高导致了与其他处理组在属水平上的不同，同时说明 CO_2 在一定程度上可以抑制假单胞菌属的增长[32]。

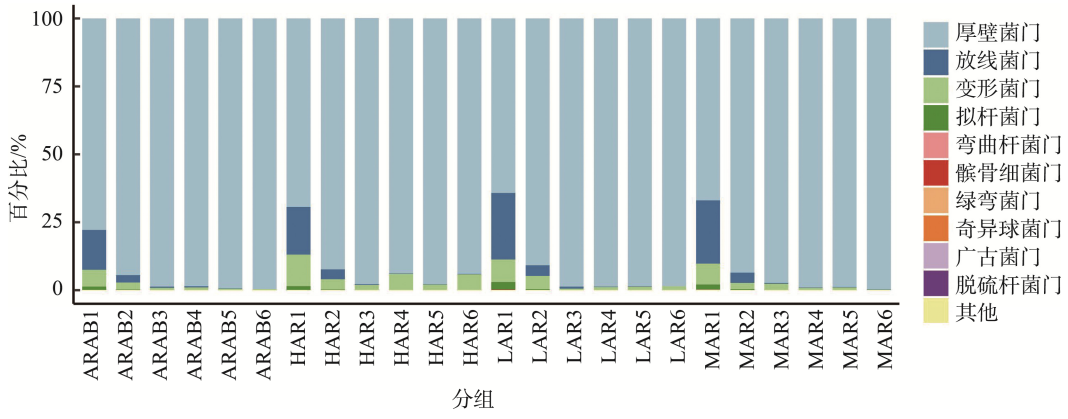


图 7 气调包装对冷鲜牛肉细菌门水平群落结构组成的影响

Fig.7 Effects of modified atmosphere packaging on the composition of bacterial community at the phylum level in chilled beef

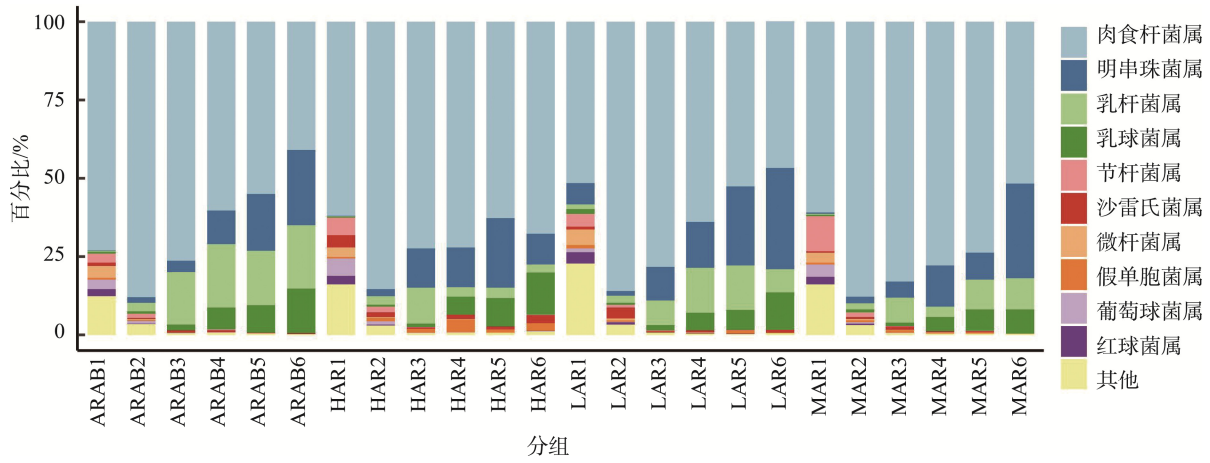


图 8　气调包装对冷鲜牛肉细菌属水平群落结构组成的影响

Fig.8　Effects of modified atmosphere packaging on the composition of bacterial community at the genus level in chilled beef

3　结　论

本研究探讨了不同气调包装对于冷藏期间生鲜牛肉的感官、理化特性和微生物群落结构变化的影响得到以下结论。

各处理组在 0~2 d 内感官品质无明显差异，在贮藏的 2~10 d，O_2 含量较高的 MAR 和 HAR 组其感官指标包括色泽、气味、黏度和汁液量均优于低 O_2 含量 LAR 和 ARAB 组。当贮藏达到第 10 d 时，各处理组感官评价均出现了产生异味等不可接受的情况。在 10 d 的贮藏期内各处理组理化特性也产生了一定的变化，所有气调包装处理组 pH 和 MDA 均未超过限值，这与气调包装中气体的成分有关，TVB-N 在贮藏的第 8 d 超过限值(TVB-N≤15 mg/100 g)。滴水损失率所有组别在贮藏期内都有所增加，MAR 组变化率最小。各处理组生鲜牛肉的菌落总数先呈现了不同程度的增长之后呈现平稳状态，在贮藏开始时，所有气调包装处理组的优势菌门均为厚壁菌门、放线菌门、变形菌门和拟杆菌门，随着贮藏时间的增加，优势菌门也随之发生了变化。高 O_2 含量处理组 HAR 的优势菌门为厚壁菌门和变形菌门，而其他组别均为厚壁菌门。在属水平上，HAR 处理组的优势菌属为明串珠菌属、乳杆菌属、乳球菌属、沙雷氏菌属和假单胞菌属，其他处理组的优势菌属为明串珠菌属、乳杆菌属和乳球菌属。沙雷氏菌属和假单胞菌属中的腐败菌是使生鲜牛肉产生腐败的主要原因[4,7,36]。本研究中不同气调包装对于冷鲜牛肉的新鲜度的影响并不显著，需待进一步的研究，但不同气调包装中冷鲜牛肉微生物群落的动态变化结果可以为其腐败菌的控制提供一定的理论参考，以期为气调包装冷鲜牛肉的储存和品质控制提供科学依据。

参考文献

[1] 闫小杰，白乌日力嘎，康连和，等. 冷鲜牛肉贮藏保鲜技术研究进展[J]. 食品工业, 2023(12): 196–201.
YAN XJ, BAI WRLG, KANG LH, *et al*. Research progress on storage and preservation technology of chilled beef [J]. The Food Industry, 2023(12): 196–201.

[2] HUANG CW, TAKEDA S, CHEN YP, *et al*. Effectiveness of ozone treatment and packaging techniques in preserving Taiwanese domestic beef during refrigerated storage [J]. Foods (Basel, Switzerland), 2024, 13(21). DOI: 10.3390/foods13213471

[3] 侯超苹，王旭峰，王强，等. 不同气调包装对贮藏期内牛肉品质的影响研究[J]. 食品与发酵工业, 2025, 51(23): 260–266.
HOU CP, WANG XF, WANG Q, *et al*. Effect of modified atmosphere packaging on beef quality during storage [J]. Food and Fermentation Industries, 2025, 51(23): 260–266.

[4] 张莉，马云昊，王颖，等. 冷藏过程中气调包装烧鸡的理化特性及腐败菌分析[J]. 食品科学, 2023(15): 188–195.
ZHANG L, MA YH, WANG Y, *et al*. Physicochemical characteristics and spoilage bacteria of modified atmosphere packaged braised chicken during refrigeration [J]. Food Science, 2023(15): 188–195.

[5] CONTE-JUNIOR CA, MONTEIRO MLG, PATRÍCIA R, *et al*. The effect of different packaging systems on the shelf life of refrigerated ground beef [J]. Foods (Basel, Switzerland), 2020, 9(4): 495..

[6] 温蕾，马艳丽，柳尧波，等. 利用高通量测序分析冷鲜羊肉优势腐败菌群及相关抑菌剂效价评定 [J]. 食品研究与开发, 2025(4): 149–154.
WEN L, MA YL, LIU YB, *et al*. Analysis of dominant spoilage bacteria by high-throughput sequencing and evaluation of inhibitory effects of antimicrobial agents for chilled mutton [J]. Food Research and Development, 2025(4): 149–154.

[7] 孙恺阳. 基于初始微生物污染水平的冷却牛肉高氧包装降氧技术研发与应用[D]. 泰安：山东农业大学, 2023.
SUN KY. Research and application of the declined oxygen technology for high-oxygen packaged chilled beef based on initial microbial contamination levels [D]. Tai'an: Shandong Agricultural University, 2023.

[8] 宋相宇，李鸣，王虎虎，等. 高通量测序分析白切鸡菌群多样性[J]. 食品科学, 2020(17): 246–252.
SONG XY, LI M, WANG HH, *et al*. Analysis of bacterial community diversity of soft-boiled chicken by high-throughput sequencing [J]. Food Science, 2020(17): 246–252.

[9] YUAN A, HE Y, MA Y, *et al*. Antibacterial activity of angelica essential oil, its mechanism against pseudomonas fluorescens, and its application in the preservation of chilled fresh beef [J]. Food Bioscience, 2024, 60: 104273.

[10] 何金岭. 不同气调保鲜技术对冷鲜鸡肉贮藏品质的影响[J]. 食品安全导刊, 2024(6): 132–134, 138.

HE JL. Effects of different air conditioning preservation techniques on storage quality of chilled fresh chicken [J]. China Food Safety Magazine, 2024(6): 132–134, 138.

[11] 徐静, 丁珊珊, 陶宇婷, 等. 天然保鲜剂对牛肉贮藏期间水分和蛋白质结构变化的影响[J]. 食品工业科技, 2024, 45(17): 380–387.
XU J, DING SS, TAO YT, *et al*. Effects of natural preservatives on the moisture and protein structure changes of beef during storage [J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(17): 380–387.

[12] 赵文颖, 刘丹丹, 靳健乔, 等. 辐照灭菌处理对中式酱牛肉理化性能的影响[J]. 食品与机械, 2022(3): 133–138.
ZHAO WY, LIU DD, JIN JQ, *et al*. Effects of irradiation on physico-chemical property of Chinese soy-sauced beef [J]. Food & Machinery, 2022(3): 133–138.

[13] 司马胜雪, 郝贝贝, 武泽文, 等. 超声时间对延边黄牛肉品质的影响[J]. 食品与机械, 2024(7): 169–174.
SIMA SX, HAO BB, WU ZW, *et al*. Effects of ultrasonic treatment time on meat quality of Yanbian yellow cattle [J]. Food & Machinery, 2024(7): 169–174.

[14] 褚益可, 雷桥, 欧杰. 气调包装中气体浓度对牛肉保鲜的影响[J]. 食品与发酵工业, 2011(4): 226–232.
CHU YK, LEI Q, OU J. Effect of gas concentration in modified atmosphere packaging on fresh beef [J]. Food and Fermentation Industries, 2011(4): 226–232.

[15] 张翔, 吴周林, 熊双丽, 等. 气调包装协同淫羊藿黄酮对牦牛肉保鲜效果的影响[J]. 食品科技, 2025(4): 132–136.
ZHANG X, WU ZL, XIONG SL, *et al*. Influence of modified atmosphere packaging synergized with flavonoids extracted from *Epimedium sagittatum* on the preservation of yak meat [J]. Food Science and Technology, 2025(4): 132–136.

[16] 肖谨. 可溶性气体稳定预处理对冷鲜牛肉保鲜效果的研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2024.
XIAO J. Study on soluble gas stabilization pretreatment on the preservation effect of chilled beef [D]. Tai'an: Shandong Agricultural University, 2024.

[17] 王洪江, 范晓禹, 赵楚萍, 等. 不同包装形式对低温冷鲜牛肉贮藏品质影响的研究[J]. 包装与食品机械, 2023(1): 19–24, 38.
WANG HJ, FAN XY, ZHAO CP, *et al*. Effects of different packaging forms on preservation quality of chilled beef [J]. Packaging and Food Machinery, 2023(1): 19–24, 38.

[18] GURUNATHAN K, TAHSEEN A, MANYAM S. Effect of aerobic and modified atmosphere packaging on quality characteristics of chicken leg meat at refrigerated storage [J]. Poultry Science, 2022, 101(12): 102170.

[19] 司鑫月. 低温等离子体协同气调包装对调理牛肉品质的影响[D]. 通辽: 内蒙古民族大学, 2024.
SI XY. The Effects of low-temperature plasma assisted with modified atmosphere packaging on the quality of conditioned beef [D]. Tongliao: Inner Mongolia Minzu University, 2024.

[20] ZHANG X, PAN C, CHEN S, *et al*. Effects of modified atmosphere packaging with different gas ratios on the quality changes of golden pompano (*Trachinotus ovatus*) fillets during superchilling storage [J]. Foods (Basel, Switzerland), 2022, 11(13): 1943.

[21] 王艺, 刘泽超, 罗欣, 等. 高浓度 CO_2 包装结合冰温贮藏对生鲜牛肉成熟及展示期间品质和货架期的影响[J]. 食品科学, 2025(16): 337–344.
WANG Y, LIU ZC, LUO X, *et al*. Effects of high CO_2 packaging combined with superchilling on the quality and shelf-life of fresh beef during aging and display [J]. Food Science, 2025(16): 337–344.

[22] 王华安, 刘启超, 黄得草, 等. 中高氧气调包装对冷鲜鸭肉品质的影响[J]. 农产品加工, 2024(21): 36–40, 46.
WANG HAN, LIU QC, HUANG DC, *et al*. Effect of medium and high oxygen conditioning package on quality of chilled duck meat [J]. Agricultural Products Processing, 2024(21): 36–40, 46.

[23] 关郁芳, 夏洪兵, 苗小猛, 等. 不同包装材料和气体比例对冷鲜乌鸡肉品质的影响[J]. 保鲜与加工, 2025(1): 25–32, 41.
GUAN YF, XIA HB, MIAO XM, *et al*. Effects of different packaging materials and gas ratios on the meat quality of chilled and fresh black-bone chicken [J]. Storage and Process, 2025(1): 25–32, 41.

[24] 任雨晴. 基于碳量子点荧光探针的肉中丙二醛快速检测技术研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2024.
REN YQ. Research on rapid detection technology of malondialdehyde in meat based on carbon quantum dots fluorescent probe [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2024.

[25] 崔莹. 肉牛日粮中添加白藜芦醇对高氧气调包装牛肉抗氧化性能及食用品质影响的研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2023.
CUI Y. Effects of dietary resveratrol supplementation in cattle on the anti-oxidative capacity and mat quality of beef under high-oxygen modified atmosphere packaging [D]. Tai'an: Shandong Agricultural University, 2023.

[26] 谢东娜, 王道营, 闫征, 等. 加热方式对鸡肉制品不同部位脂质氧化的影响[J]. 食品科学技术学报, 2019(6): 29–36.
XIE DN, WANG DY, YAN Z, *et al*. Effect of heating methods on lipid oxidation in different parts of chicken products [J]. Journal of Food Science and Technology, 2019, 37(6): 29–36.

[27] 黄振彬, 朱雪俊. 不同气调包装方式对牦牛肉保鲜效果的影响[J]. 中国调味品, 2023(8): 164–167.
HUANG ZB, ZHU XJ. Effect of different modified atmosphere packaging methods on preservation effect of yak meat [J]. China Condiment, 2023, 48(8): 164–167.

[28] 马小菊. 生物保鲜剂结合气调包装对冷鲜滩羊肉贮藏品质的影响研究[D]. 银川: 宁夏大学, 2023.
MA XJ. Effects of biological preservative treatment combined with modifiedatmosphere packaging on storage quality of chilled tan mutton [D]. Yinchuan: Ningxia University, 2023.

[29] 刘纯友, 付春婷, 许金蓉, 等. 低温贮藏过程中水牛肉品质变化研究[J]. 食品工业科技, 2020(2): 273–278, 287.
LIU CY, FU CT, XU JR, *et al*. Quality changes of buffalo meat during low temperature storage [J]. Science and Technology of Food Industry, 2020(2): 273–278, 287.

[30] 邓琬麒, 黄楠岚, 周衡刚, 等. 不同包装方式对即食香肠的保鲜效果比较[J]. 食品研究与开发, 2022, (6): 10–17.
DENG WQ, HUANG NL, ZHOU HG, *et al*. Comparison of fresh-keeping effects of different packaging methods on ready-to-eat sausage [J]. Food Research and Development, 2022(6): 10–17.

[31] XU A, ZHANG S, HUAN C, *et al*. Storage quality improvement of duck breast meat: Role of ultrasound-assisted slightly acidic electrolyzed water [J]. Foods (Basel, Switzerland), 2025, 14(3): 534.

[32] SAI-UT S, INDRIANI S, SRISAKULTIEW N, *et al*. The role of CO_2 levels in high-oxygen modified atmosphere packaging on microbial communities of chilled goat meat during storage and their relationship with quality attributes [J]. Foods (Basel, Switzerland), 2025, 14(11): 1837.

[33] SHI Y, ZHAO B, HAO J, *et al*. Exploring the impact of cold and modified atmosphere packaging storage on prepared meat products: Temporal dynamics of the bacterial community and quality analysis [J]. Meat science, 2025, 225: 109824.

[34] WANG Q, CHEN Q, XU J, *et al*. Effects of modified atmosphere packaging with various CO_2 concentrations on the bacterial community and shelf-life of smoked chicken legs [J]. Foods (Basel, Switzerland), 2022, 11(4): 559..

[35] REUBEN RC, ROY PC, SARKAR SL, *et al*. Isolation, characterization, and assessment of lactic acid bacteria toward their selection as poultry probiotics [J]. BMC Microbiology, 2019, 19(1): 253.

[36] 杨茂杰. 卤牛肉贮藏品质变化及优势腐菌的生长动力学模型建立与应用[D]. 雅安:四川农业大学, 2024.
YANG MJ. Establishment and application of a growth kinetics model for the changes in storage quality of braised beef and dominant spoilage bacteria [D].Ya'an: Sichuan Agricultural University, 2024.

(责任编辑: 韩晓红 蔡世佳)