

高氧气调包装肉类研究进展

秦卫东^{1,2*}, 贺菊萍², 王卫东^{1,2}, 高兆建²

(1. 江苏省食品资源开发与质量安全重点建设实验室, 徐州 221111;
2. 徐州工程学院食品工程学院, 徐州 221111)

摘要: 肉类高氧气调包装通常是用含有 70%~80%的氧和 20%~30%的二氧化碳的混合气体对新鲜肉类进行包装的技术, 其中的氧气可使肉类呈现稳定的红色, 二氧化碳主要是抑制细菌的生长而延长贮藏期限。本文对近年来该技术在新鲜肉类中应用的研究情况进行了总结, 从高氧包装对肉类颜色的影响、高氧环境下的微生物生长、高氧对肉类的脂类氧化和蛋白质氧化的影响以及提高高氧气调包装肉类品质的措施等方面进行了评述。肉类的颜色稳定性与肌肉类型有关, 随 O₂ 浓度的增加而增大, 随 CO₂ 浓度的增加而降低。另外, 肉类颜色稳定性受肉类氧化特别是脂类氧化的影响。高氧气调包装肉类中的微生物受到 CO₂ 的抑制作用表现出比生长速率降低及生长的迟滞期延长。高氧气调包装会引起脂类和肌红蛋白的氧化以及蛋白质的交联, 导致肉的嫩度和多汁性下降。高氧气调包装会导致肉类煮制时出现过早熟褐现象。添加某些防腐剂和抗氧化剂可以有效改善高氧气调包装肉类质量, 延长肉类贮藏期限。

关键词: 高氧气调包装; 肉类; 颜色; 氧化

Development on researches of high oxygen modified atmosphere of meats

QIN Wei-Dong^{1,2*}, HE Ju-Ping², WANG Wei-Dong^{1,2}, GAO Zhao-Jan²

(1. Jiangsu Key Laboratory on Foods Resource Development and Quality Safety, Xuzhou 221111, China;
2. Food Engineering College of Xuzhou Institute of Technology, Xuzhou 221111, China)

ABSTRACT: High oxygen modified atmosphere is a new packaging technique, which usually contain 70%~80% oxygen and 20%~30 carbon dioxide. The oxygen can promote the stabilization of meats red color and carbon dioxide will prolong the shelf life of meats by inhibiting the microorganism growth. In this paper, researches on applications of high oxygen modified atmosphere in meats were summarized, including effects of high oxygen modified atmosphere on meats color, microbial growth under high oxygen modified atmosphere, effects of high oxygen modified atmosphere on lipid and protein oxidation in meats as well as the ways for enhancing the qualities of meats in high oxygen modified atmosphere. The stability of meat color was correlated to types of muscle, increased by increasing the oxygen concentration and decreased by increasing the carbon dioxide concentration. The stability of meat color was also influenced by oxidation of meats, especially lipid oxidation. The microorganism in meats under high oxygen modified atmosphere packaged (MAP) were inhibited by CO₂ and showed a reduction of maximum specific growth rate and extension of log phase. High

基金项目: 江苏省高校自然科学研究重大项目(13KJA550002)、江苏省苏北科技发展计划项目(BC2013416)

Fund: Supported by the Significant Project of Natural Science research in College and University of Jiangsu Province (13KJA550002) and North Jiangsu Science and Technology Projects of Jiangsu Province (BC2013416)

*通讯作者: 秦卫东, 教授, 主要研究方向为畜禽科学与技术。E-mail: wdqin@xzit.edu.cn

*Corresponding author: QIN Wei-Dong, Professor, Jiangsu Key Laboratory on Foods Resource Development and Quality Safety, Food Engineering College of Xuzhou Institute of Technology, Xuzhou 221111, China. E-mail: wdqin@xzit.edu.cn

oxygen MAP will induce oxidation of lipid and hemoglobin as well as protein cross-linking in meats, which can lead to decreasing tenderness and juiciness. High oxygen MAP will lead to premature browning phenomenon when the meats under high oxygen MAP were cooked. Addition of some preservatives and antioxidants was an effective method to improve the qualities and to extend the shelf life of meats in high oxygen MAP.

KEY WORDS: high oxygen modified atmosphere; meats; color; oxidation

1 引言

食品包装是为了避免产品的变质,并为消费者提供便利,生鲜肉类更需要包装。气调包装是食品常用的包装方式。气调包装是指在将食品密封于包装材料之前,去除或更换环绕产品的气体。气调包装可以是真空包装(vacuum packaging, VP),即在食品封入包装材料前除去大部分气体;或者是置换气体包装(modified atmosphere packaging, MAP),即食品包装密封之前通过真空除去空气再以气体混合物取代。

由于真空包装缺乏氧气,用于鲜肉包装时,会导致肉类中还原性肌红蛋白(脱氧肌红蛋白)比例的增加,这将使新鲜肉类从红色转变为粉红色,从而影响新鲜肉类的外观。具有高于周围环境 O₂ 和 CO₂ 水平的高氧包装系统引起了人们的广泛关注。高氧气调包装通常含有 70%~80% 的氧和 20%~30% 的二氧化碳,对于红肉而言,其中的氧气可使肉类呈现稳定的红色,二氧化碳主要是抑制细菌的生长而延长贮藏期限^[1]。近年来,有关高氧气调包装在肉类中的研究和应用成为肉类科学中的热点问题之一,并在许多方面取得重要进展。

本文的目的是对国外肉类高氧气调包装的状况和结果进行总结和评述,以期为该技术在国内的推广与应用提供参考。

2 高氧气调包装对肉类颜色的影响

颜色是消费者选择新鲜肉类时考察的重要感官指标。高氧环境稳定红色的原因是可以促使氧与肌红蛋白的结合并向较深处氧渗透,增大了新鲜肉类中氧合肌红蛋白的浓度,有利于保持生肉的红色。许多研究结果都证实了这一点。Lindah^[2]证实,在高氧气调贮藏(80% O₂ + 20% CO₂)下将牛肉背最长肌(*longissimus dorsi*)成熟 5~10 d,与真空条件下相对颜色几乎没有影响。John 等^[3]确认,80%氧气包装的牛里脊肉排在 14 d 和 21 d 贮藏期间保持了令人满意的颜色。Martinez 等^[4]报道了 80%O₂ 与 20%CO₂ 组合增强了新鲜猪肉香肠的红色。Sekar 等^[5]发现高氧(80%O₂)气调包装的水牛肉贮藏 21 d 后仍具有令人满意的颜色。Esmer^[6]等人报道了牛的胸大肌和胸小肌(*pectoralis major and minor*) 在 70% O₂+30% CO₂ 和 50% O₂+30% CO₂+20% N₂ 混

合气体的气调包装下贮藏 14 d, a* 值保持在可接受的水平。

高氧对肉类红色的增强作用除因肉类的种类变化外,还与多种因素有关。

(1) 气体的组成对肉类的红色产生影响

Kennedy, Buckley 和 Kerry^[7]报道高氧包装的羊肉, a* 值按下列顺序减小: 80% O₂:20% CO₂ > 60% O₂:20% CO₂:20% N₂ > 60% O₂:40% CO₂。其中, TBARS (thiobarbituric acid reactive substances) 值的增加与 a* 值减少相关,表明脂类氧化与肌红蛋白转变成高铁肌红蛋白以一定的方式相关。Resconi 等^[8]比较了 50%、60% 和 80% O₂ 浓度对牛背最长肌红色的稳定效果,结果发现 50% O₂ 浓度下牛肉显示最低的颜色稳定性。Grobbel 等^[9]证实,80% O₂:20% CO₂ 中的牛排比其他包装处理的褪色快。

以上结果可以得出结论:肉类的颜色稳定性随 O₂ 浓度的增加而增大,随 CO₂ 浓度的增加而降低。但是, Jakobsen 和 Bertelsen^[10]认为,20% O₂ 包装的牛肉不能像 80% O₂ 那样保持良好的颜色,但氧浓度从 55% 增加到 80%,未发现颜色稳定性的增加。

(2) 肌肉的类型也影响肉的颜色

John 等^[11]发现高氧环境下牛颈肩肉和腰肉的颜色明显不同($P < 0.05$); Seyfert 等^[12]也报道了 5 种不同的牛肌肉在 20% 或 80% O₂ 下的颜色稳定性顺序为:腰最长肌(*Longissimus lumborum*)、半腱肌(*semintendinosus*)、表层半膜肌(*superficial semimembranosus*)、腰大肌(*psaos major*)和深层半膜肌(*deep semimembranosus*)。Kim 等^[13]证实,80% O₂ 和 20% CO₂ 包装的牛肉贮藏 9 d 后,内收肌(*adductor*)褪色最快,半膜肌(*semimembranosus*)次之,腰最长肌(*longissimus lumborum*)褪色最慢。这也许是由于不同肌肉类型中肌红蛋白的含量不同的原因。

(3) 肉类的形态对颜色的影响

完整的肌肉比较碎的肉类具有较好的颜色稳定性。Belcher^[14]指出,对于绞碎的牛肉,在高氧 MAP 中含氧合肌红蛋白的质量寿命限定在 10~12 d,而完整的肌肉为 12~16 d。O'Grady 等^[15]也发现,40%、60% O₂ 贮藏的绞碎半膜肌(*M. semimembranosus*) 7 d 后的氧合肌红蛋白量低于完整的半膜肌,但在 80% O₂ 贮藏下的颜色没有差别。这可能是由于肉类绞碎后更易受氧化,而脂类的氧化与颜色的稳定性相关。

(4) 包装气体与肉类的比例对颜色的影响

Kennedy 等^[6]证实贮藏于包装袋中顶隙气体与肉的比例为 2:1 羊排的表面红色(a^* 值)在整个 12 d 贮藏期间高于 1:1 的比例。但 Murphy 等^[16]发现顶隙气体与肉的比例在贮藏期间对牛排的 a^* 红色值没有影响。

3 高氧气调包装对微生物的影响

许多研究确认了高氧与高二氧化碳组合可以有效抑制微生物的生长。Ordóñez 等^[17]报道了用 80%O₂ 和 20%CO₂ 包装贮藏猪肉, 在 1 °C 条件下未发现细菌性腐败和高铁肌红蛋白的形成, 但会产生酸败现象。López-Caballero 等^[18]研究了不同的混合气体成分对从鳕鱼类中分离的腐败希瓦菌(*Shewanella putrefaciens*)的生长抑制作用, 结果发现 40%CO₂ 和 60%O₂ 混合气体对该菌有最大抑制效果。Jayasingh 等^[19]报道高氧气调包装(80%O₂, 20%CO₂)的碎牛肉贮藏 10 d 后, 好氧菌数量与对照样品没有显著差别。Ho 等^[20]发现用 80% O₂:20% CO₂ 的混合气体包装肉馅饼, 与真空包装和透气性聚氯乙烯包装相比, 延迟了微生物的生长。Geysen 等^[21,22]发现, 将高二氧化碳与高氧组合, 可以减小微生物的最大比生长速率(maximum specific growth rate)并延长其迟滞期。他们证实, 高氧不能阻止微生物的生长, 但可以降低微生物的比生长速率及延长微生物生长的迟滞期。Byrd 等^[23]确认, 100%的高氧可以显著降低鸡肉中弯曲杆菌(*Campylobacter jejuni*)的复苏率和减慢低温微生物和需氧菌的复苏速率, 贮藏 14 d 后, 空肠弯曲杆菌数量为 0.15 logCFU, 而对照组则为 1.36 logCFU。Esmer^[6]等用 5 种不同的气体组合包装绞碎的牛胸大肌和胸小肌(*pectoralis major and minor*), 结果显示 O₂/CO₂/N₂:50/30/20 的气体组合在贮藏 11 d 后, 可以限制所有微生物并完全抑制肠杆菌属(*Enterobacteriaceae*)的生长。

Kennedy 等^[7]发现贮藏 9 d 后, 60%O₂:40%CO₂ 的气体组合对羊肉中大肠杆菌和假单胞菌属(*Pseudomonas*)生长的抑制作用最有效。另外, 贮藏期间乳酸菌的数量增加, 而大肠杆菌和假单胞菌属(*Pseudomonas*)的数量减少, 它们的生长被抑制。他们认为, 这种抑制作用可能是由于乳酸菌增殖后产生的细菌素作用的缘故。与 70% O₂:20% CO₂:10% N₂ or 或 30% O₂:40% CO₂:30% N₂ 相比, 贮藏于 60% O₂:40% CO₂ 的新鲜香肠具有较低的细菌生长速率^[24]。

显然, 要抑制微生物的生长, 必须含有一定浓度的二氧化碳。通常, 低于 15%水平的 CO₂ 不能满意地抑制微生物的生长, 而高于 40%的水平由于 CO₂ 被肉类组织吸收将引起包装的崩溃^[1]。

4 高氧气调包装对肉类氧化的影响

在大于空气中氧含量的条件下包装肉类时, 常易发生氧化作用特别是脂类氧化, 这是肉类高氧 MAP 的一个问题。

(1) 肉类高氧气调包装的脂类氧化

许多研究者注意到了高氧环境下肉类中脂类的氧化问题。John 等^[3]证实, 在 80%氧下贮藏的牛肉上后腰牛排由于氧化而呈现出最大的 TBA(Thiobarbituric Acid)值。Seydim 等^[25]认为, 脂类氧化是限制鸵鸟肉高氧气调包装的重要因素。Chiavaro 等^[26]指出, 高氧浓度下的气调包装会明显增加香肠的脂类氧化。Martínez 等^[27]也证实高氧包装的香肠, 其氧化作用随 O₂ 的增加而增加。Kim 等^[28]确认, 高氧气调包装由于会引起脂类和肌红蛋白的氧化以及蛋白质的交联, 因而对肉类质量有不利的影响。Jayasingh 等^[19]报道 80% O₂ 和 20% CO₂ 包装的绞碎牛肉贮藏 10 d 后, TBA 值为对照的 2.6 倍。由于氧化作用, 高氧气调包装的牛肉贮藏 6 或 10 d 后的风味恶化, 达到不可接受的水平。Zakrys 等^[29]确认 50% O₂ 包装的牛背最长肌具有与 80% O₂ 相似的 TBARS 值, 高于 40%、50%和 60% O₂ 包装。但氧含量与 TBARS 值之间没有显著的相关性。Resconi 等^[30]报道牛背最长肌(*Longissimus dorsi*)高氧贮藏期间的 TBARS 值受气调包装中氧气浓度的影响, 60% O₂ > 50% O₂ > 80% O₂ > 真空。但高氧水平不一定与生肉中高酸败水平相关。

但是, 一些研究对高氧包装肉类中脂类的氧化也有不同的结论。Jakobsen 等^[9]发现, 80% O₂ 和 20% CO₂ 包装的牛肉贮藏 10 d 后, TBARS 值增加, 但未达到不可接受的水平值。Kennedy 等^[7]对羊肉的高氧气调包装进行研究时发现, 不同比例的高氧(80%和 60%)混合气体包装的羊肉贮藏期间 TBARS 值变化不大, 且均小于 2.0 mg MAD/kg 这一肉类酸败的临界值。Veberg 等^[30]发现, 猪肉在高氧(70% O₂ 和 30% CO₂)贮藏期间的脂类氧化较稳定, TBARS 值<0.2mg MDA/kg。Zakrys 等^[29]报道指出, 尽管在 50%的氧浓度下可检测出氧化气味, 但感官评价小组成员仍喜爱该浓度氧气包装的牛排产品。Resconi 等^[31]比较了 50%、70%和 80%氧气包装和真空包装牛排的脂类氧化情况, 得出结论: 高氧水平未必与生肉的高酸败水平相关。Murphy 等^[16]报道高氧包装的牛排在 14 d 贮藏期内脂类的氧化保持在低于 2 mg MDA/kg 的可接受阈值。他们还认为, 贮藏期 TBARS 值的增加是由于微生物生长的缘故。

(2) 肉类高氧气调包装的蛋白质氧化

除脂类氧化外, 蛋白质氧化也是肉类高氧气调贮藏的重要质量问题。这将会导致肉类的颜色变化, 还会影响肉类的嫩度和多汁性等品质。蛋白质氧化的主要后果是形成羰基, 其可能来源于氨基酸侧键基团、肽的断裂和与蛋白质复合的羰基化合物。

Chu 等^[32]发现, 冷冻重组牛排中高铁肌红蛋白的形成速度随氧浓度的增大而增加。Lund 等^[33]报道了包装气体对蛋白质氧化的影响, 显示出贮藏 6 d 后高氧包装的牛肉中羰基含量显著增加。Delles 等^[34]证实, 高氧(80%O₂)包装的猪肉样品贮藏期间羰基增加量较显著, 到第 14 d 比真空样

品高2倍。羰基数量的变化与TBA相似,表明脂类氧化与蛋白质羰基形成可能有关。电泳结果表明:高氧样品的肌球蛋白重链的减少更强烈,肌球蛋白通过二硫键的聚合对持水性的消失负主要责任。高氧样品在0和4 d之间持水性显著减少,这可能是由于蛋白质的氧化及随后的凝集。第4 d高氧样品的肌球蛋白凝集和细胞内空间膨胀似乎有助于持水性的减少。Kim等^[13]观察到高氧贮藏的牛肉的嫩度和多汁性下降,同时蛋白质发生分子间交联。Liu等^[35]指出,蛋白质氧化是限制肌原纤维吸水的重要因素,妨碍新鲜肉类的持水性。

一些研究指出,蛋白质氧化与脂类氧化两者之间存在着相关关系。Zakrys等^[36]证实,高氧包装的牛肉中,氧合肌红蛋白与TBARS值有较强的相关性,在80%和50%的氧浓度下,二者的相关性分别为-0.89和-0.95,表明随TBARS值的增大,氧合肌红蛋白减少。此外,高氧包装的牛排贮藏15 d后,血红素铁与氧浓度呈负相关。Estevez等^[37]报道了高氧包装肉类非血红素铁与TBARS之间的关系,确认80% O₂包装样品的TBARS和非血红素铁之间的关系为-0.63,表明高氧条件下脂类的氧化诱导了肌肉色素的破坏。他们还发现,高氧包装的鹅肝冷藏期间,TBARS值与羰基含量相关。Mercier等^[38]也报道了肉类和鹅肝产品中脂类氧化和蛋白质氧化之间紧密相关。Faustman等^[39]阐明脂类氧化促进肌红蛋白氧化的机制可能是由于不饱和脂肪酸初级和次级氧化产物的反应活性。

Lund等^[33]发现高氧气调包装(70% O₂/30% CO₂)的猪肉背最长肌(*longissimus dorsi*)贮藏期间嫩度降低,而无氧贮藏的肉嫩度却增加。蛋白质交联及肉的嫩度和多汁性下降有直接关系。他们发现高氧贮藏期间蛋白质表面平均直径较大而肌原纤维小片化碎片较少。Lagerstedt等^[40]指出,高氧气调包装的牛肉与真空包装相比具有较低的持水性。而Resconi等^[8]认为,这种持水性的差别是高氧下肉类更易氧化的结果。Grobbel等^[41]证实,80% O₂和20% CO₂包装的牛肉贮藏18 d后的Warner-Bratzler剪切力低于真空包装贮藏28 d的牛肉。Zakrys等^[34]指出,牛肉的Warner-Bratzler剪切力与包装的氧浓度呈正相关,用50%和80% O₂包装的牛肉比低氧包装牛肉硬。

高氧包装的肉类变硬的机制主要有两种:一是担负肉类嫩化的酶类在高氧条件下被氧化,导致降低或破坏嫩化过程。Rowe等^[42]发现,牛肉蛋白质的氧化钝化了 μ -calpain,降低了肌原纤维的水解,因而可能限制了嫩化作用。Lund等^[33]根据高氧贮藏期间蛋白质表面平均直径较大而肌原纤维小片化碎片较少的研究结果,推断高氧环境通过氧化作用而影响肉类嫩化的酶类。Lindahl等^[43]发现,高氧包装的牛背最长肌贮藏期间m-钙激活酶活性明显要低。二是蛋白质分子在高氧环境下发生包括肌球蛋白内形成二硫键的分子交联,因而肉类韧性增大。Lund等^[44]用

SDS-PAGE分析确认了高氧包装贮藏期间猪肉背最长肌的蛋白质通过二硫键形成了肌球蛋白重链的交联。Kim等^[13]用SDS-PAGE法证实了高氧包装牛肉肌肉中蛋白质的交联,用免疫印迹技术确认了蛋白质的交联与重链肌球蛋白相关,并通过对角SDS-PAGE技术断定了蛋白质的交联是分子间二硫键结合的结果。

(3) 肉类高氧气调包装的“过早熟褐现象(Premature Browning, PBW)”

过早熟褐现象是指熟制期间肉类期间在达到微生物安全的温度之前肉体已经形成褐色^[45]。早期褐变是食品安全关心的^[46],因为煮制产品在食物中毒细菌可能残存的温度下看上去象是煮熟了。

Seyfert等^[47]的研究确认,高氧气调包装的牛排会影响煮制时的内部颜色,证实了高氧MAP中的过早熟褐问题。John等^[3]发现,80% O₂包装的牛排与厌氧包装相比,在49℃或57℃下明显地变褐,特别是在外部边缘。另外,他们^[11]还观察到,80% O₂下贮藏的碎牛肉煮制时在内部温度低至49℃时可观察到过早熟褐现象,但49℃煮制时得到的目测色泽评分与真空包装牛肉在79℃下的色泽评分相似。80% O₂和20% CO₂ MAP的牛排在70℃温度下a*值较低且内部呈褐色,构成安全风险^[9]。

5 提高高氧气调包装肉类品质的措施

针对高氧气调包装鲜肉出现的品质问题,一些研究着眼于改进和提高肉类制品的稳定性。

Lund等^[33]用迷迭香提取物和抗坏血酸盐/柠檬酸盐(1:1)与高氧气调(80% O₂/20% N₂)包装组合,可以保护新鲜牛肉的颜色,有效降低了牛肉馅饼的脂类氧化,但对蛋白质氧化无抑制效果。其中迷迭香提取物具有较好的脂类抗氧化作用,而抗坏血酸盐/柠檬酸盐对肉色的保持比迷迭香提取物更有效。Sanchez-Escalante等^[48]认为,单独的抗坏血酸盐对高氧包装的牛肉馅饼没有抗氧化效果,需要柠檬酸盐的协同作用。这可能是由于柠檬酸盐螯合了金属离子,否则这些金属离子在Fenton反应中将与抗坏血酸盐发生反应。

Rajkovic等^[49]用乳酸/乳酸钠缓冲液处理鸡大腿后再进行高氧气调包装,可以显著减少空肠弯曲杆菌(*Campylobacter jejuni*)的残活。贮藏2周后,空肠弯曲杆菌的残活数为0 CFU/g,而对照组则达到1.3 logCFU/g。Suman等^[50]发现,添加异抗坏血酸盐可以提高60℃和66℃时牛肉的a*值。Kim等^[21]研究发现乳酸钾可以防止牛腰最长肌(*M. longissimus lumborum*)和腰大肌(*M. psoas major*)在高氧气调包装期间颜色的恶化而保持较高的a*和色度值。Kim等^[51]发现,用乳酸盐/磷酸盐注射的牛排时高氧贮藏期间可以保持较大的红色值。未发现对重链肌球蛋白交联形成有影响。

Ramanathan 等^[52]报道了丙酮酸盐在改善高氧包装牛肉脂类氧化稳定性和稳定红色的作用。他们发现, 将丙酮酸盐添加到高氧(80%O₂)贮藏的绞碎牛肉中, 降低了脂类的氧化作用, 且抑制作用取决于丙酮酸盐的浓度。丙酮酸盐的添加可使牛肉的红色保持到 6 d, 但对氧合肌红蛋白质的氧化没有影响。他们指出, 丙酮酸盐稳定肉色的机制可能是降低了脂类氧化的缘故。

Jongberg 等^[53]证实, 在 70%O₂ 包装冷藏的牛肉馅饼中添加 500 ppm 的白葡萄提取物, 对产品的颜色具有显著的保护作用并显示出明显地抑制了脂类氧化的效果。贮藏 9 d 后, 仍然保持较好的红色, 而不添加白葡萄提取物的产品在第 6 d 即发现褪色现象。抑制氧化方面, 添加白葡萄提取物后, 产品的 TBARS 值几乎与真空包装相同。添加白葡萄提取物后, 蛋白质羰基明显减少, 也加快了巯基浓度的降低, 同时保持了产品的多汁性。他们指出, 白葡萄提取物的这种作用是由于其含有的多酚物质的缘故。

参考文献

- [1] McMillin KW. Where is MAP Going? A review and future potential of modified atmosphere packaging for meat [J]. *Meat Sci*, 2008, 80: 43–65.
- [2] Lindahl G. Colour stability of steaks from large beef cuts aged under vacuum or high oxygen modified atmosphere [J]. *Meat Sci*, 2011, 87: 428–435.
- [3] John L, Cornforth D, Carpenter CE, *et al.* Color and thiobarbituric acid values of cooked top sirloin steaks packaged in modified atmospheres of 80% oxygen, or 0.4% carbon monoxide, or vacuum [J]. *Meat Sci*, 2005, 69: 441–449.
- [4] Martínez L, Djenane D, Cilla I, *et al.* Effect of different concentrations of carbon dioxide and low concentration of carbon monoxide on the shelf-life of fresh pork sausages packaged in modified atmosphere [J]. *Meat Sci*, 2005, 71: 563–570.
- [5] Sekar A, Dushyanthan K, Radhakrishnan K T *et al.* Effect of modified atmosphere packaging on structural and physical changes in buffalo meat [J]. *Meat Sci*, 72: 211–215.
- [6] Esmer OK, Irkin R, Degirmencioglu N, *et al.* The effects of modified atmosphere gas composition on microbiological criteria, color and oxidation values of minced beef meat [J]. *Meat Sci*, 2011, 88: 221–226.
- [7] Kennedy C, Buckley DJ, Kerry JP. Display life of sheep meats retail packaged under atmospheres of various volumes and compositions [J]. *Meat Sci*, 2004, 68: 649–658.
- [8] Resconi VC, Escudero A, Beltrán JA. *et al.* Color, lipid oxidation, sensory quality, and aroma compounds of beef steaks displayed under different levels of oxygen in a modified atmosphere package [J]. *J Food Sci*, 2012, 71: S10–S18.
- [9] Grobbel JP, Dikeman ME, Hunt MC *et al.* Effects of packaging atmospheres on beef instrumental tenderness, fresh color stability, and internal cooked color [J]. *J Animal Sci*, 2008, 86: 1191–1199.
- [10] Jakobsen M, Bertelsen G. Colour stability and lipid oxidation of fresh beef. Development of a response surface model for predicting the effects of temperature, storage time and modified atmosphere composition [J]. *Meat Sci*, 2000, 54: 49–57.
- [11] John L, Cornforth D, Carpenter CE, *et al.* Comparison of color and thiobarbituric acid values of cooked hamburger patties after storage of fresh beef chubs in modified atmospheres [J]. *J food Sci*, 2004, 69: C608–614.
- [12] Seyfert M, Mancini RA, Hunt MC *et al.* Influence of carbon monoxide in package atmospheres containing oxygen on colour, reducing activity, and oxygen consumption of five muscles [J]. *Meat Sci*, 2007, 75: 432–442.
- [13] Kim YH, Huff-Lonergan E, Sebranek JG, *et al.* High-oxygen modified atmosphere packaging system induces lipid and myoglobin oxidation and protein polymerization [J]. *Meat Sci*, 2010, 85: 759–767.
- [14] Belcher JN. Industrial packaging developments for the global meat market [J]. *Meat Sci*, 2006, 74: 143–148.
- [15] O'Grady MN, Monahan FJ, Burke RM, *et al.* The effect of oxygen level and exogenous α -tocopherol on the oxidative stability of minced beef in modified atmosphere packs [J]. *Meat Sci*, 2000, 55: 39–45.
- [16] Murphy KM, O'Grady MN, Kerry JP. Effect of varying the gas headspace to meat ratio on the quality and shelf-life of beef steaks packaged in high oxygen modified atmosphere packs [J]. *Meat Sci*, 2013, 94: 447–454.
- [17] Ordonez JA, Ledward DA. Lipid and myoglobin oxidation in pork stored in oxygen- and carbon dioxide-enriched atmospheres [J]. *Meat Sci*, 1977, 1: 41–48.
- [18] López-Caballero ME, Sánchez-Fernández JA, Moral A, *et al.* Growth and metabolic activity of *Shewanella putrefaciens* maintained under different CO₂ and O₂ concentrations [J]. *Inter J Food Microbiol*, 2001, 64: 277–287.
- [19] Jayasingh P, Cornforth D P, Brennan CP *et al.* Sensory evaluation of ground beef stored in high-oxygen modified atmosphere packaging [J]. *J Food Sci*, 2002, 67: 3493–3496.
- [20] Ho CP, Huang NY, McMillin KW. Microflora and color of ground beef in gas exchange modified atmosphere packaging with abusive display temperatures [J]. *J Food Sci*, 2003, 68: 1771–1776.
- [21] Geysen S, Verlinden BE, Geeraerd AH, *et al.* Predictive modelling and validation of *Listeria innocua* growth at superatmospheric oxygen and carbon dioxide concentrations [J]. *Inter J Food Microbiol*, 2005, 105: 333–345.
- [22] Geysena S, Geeraerd AH, Verlinden BE, *et al.* Predictive modelling and validation of *Pseudomonas fluorescens* growth at superatmospheric oxygen and carbon dioxide concentrations [J]. *Food Microbiol*, 2005, 22: 149–158.
- [23] Byrd JA, Sams AR, Hargis BM, *et al.* Effect of selected modified atmosphere packaging on *Campylobacter* survival in raw poultry [J]. *Poultry Sci*, 2011, 90: 1324–1328.
- [24] Tremonte P, Sorrentino E, Succi M, *et al.* Shelf life of fresh sausages stored under modified atmospheres [J]. *J Food Prot*, 2005, 68: 2686–2692.
- [25] Seydim AC, Acton JC, Hall MA, *et al.* Effects of packaging atmospheres on shelf-life quality of ground ostrich meat [J]. *Meat Sci*, 2006, 73: 503–510.
- [26] Chiavaro E, Zanardi E, Bottari B, *et al.* Efficacy of different storage practices in maintaining the physicochemical and microbiological properties of fresh pork sausage [J]. *J Muscle Food*, 2008, 19: 157–174.
- [27] Martínez L, Djenane D, Cilla I, *et al.* Effect of varying oxygen concentrations on the shelf-life of fresh pork sausages packaged in modified atmosphere [J]. *Food Chem*, 2006, 94: 219–225.
- [28] Kim YH, Huff-Lonergan E, Sebranek JG, *et al.* High-oxygen modified

- atmosphere packaging system induces lipid and myoglobin oxidation and protein polymerization [J]. *Meat Sci*, 2010, 85: 759–767.
- [29] Zakrys PI, O'Sullivan MG, Allen P, *et al.* Consumer acceptability and physicochemical characteristics of modified atmosphere packed beef steaks [J]. *Meat Sci*, 2009, 81: 720–725.
- [30] Veberg A, Sorheim O, Moan J, *et al.* Measurement of lipid oxidation and porphyrins in high oxygen modified atmosphere and vacuum-packed minced turkey and pork meat by fluorescence spectra and images [J]. *Meat Sci*, 2006, 73: 511–520.
- [31] Resconi VC, Escudero A, Beltrán JA, *et al.* Color, lipid oxidation, sensory quality, and aroma compounds of beef steaks displayed under different levels of oxygen in a modified atmosphere package [J]. *J Food Sci*, 2012, 71: S10–S18.
- [32] Chu YH, Huffman DL, Egbert WR, *et al.* Color and color stability of frozen restructured beef steaks: effect of processing under gas atmospheres with differing oxygen concentration [J]. *J Food Sci*, 1988, 53: 705–710.
- [33] Lund MN, Hviid MS, Skibsted LH. The combined effect of antioxidants and modified atmosphere packaging on protein and lipid oxidation in beef patties during chill storage [J]. *Meat Sci*, 2007, 76: 226–233.
- [34] Delles RM, Xiong YL. The effect of protein oxidation on hydration and water-binding in pork packaged in an oxygen-enriched atmosphere [J]. *Meat Sci*, 2014, 97: 181–188.
- [35] Liu Z, Chen J, Xiong YL. Identification of restricting factors that inhibit swelling of oxidized myofibrils during brine irrigation [J]. *J Agric Food Chem*, 2009, 57: 10999–11007.
- [36] Zakrys PI, Hogan SA, O'Sullivan MG, *et al.* Effects of oxygen concentration on the sensory evaluation and quality indicators of beef muscle packed under modified atmosphere [J]. *Meat Sci*, 2008, 79: 648–655.
- [37] Estevez M, Cava R. Lipid and protein oxidation, release of iron from heme molecule and colour deterioration during refrigerated storage of liver pate [J]. *Meat Sci*, 2004, 68: 551–558.
- [38] Mercier Y, Gatellier P, Renner M. Lipid and protein oxidation in vitro, and antioxidant potential in meat from Charolais cows finished on pasture or mixed diet [J]. *Meat Sci*, 2004, 66: 467–473.
- [39] Faustman C, Sun Q, Mancini R, *et al.* Myoglobin and lipid oxidation interactions: Mechanistic bases and control [J]. *Meat Sci*, 2010, 86: 86–94.
- [40] Lagerstedt Å, Lundström K, Lindahl G. Influence of vacuum or high-oxygen modified atmosphere packaging on quality of beef *M. longissimus dorsi* steaks after different ageing times [J]. *Meat Sci*, 2011, 87: 101–106.
- [41] Grobbel JP, Dikeman ME, Hunt MC, *et al.* Effects of different packaging atmospheres and injection-enhancement on beef tenderness, sensory attributes, desmin degradation, and display color [J]. *J Anim Sci*, 2008, 86: 2697–2710.
- [42] Rowe LJ, Maddock KR, Lonergan SM, *et al.* Oxidative environments decrease tenderization of beef steaks through inactivation of μ -calpain [J]. *J Anim Sci*, 2004, 82: 3254–3266.
- [43] Lindahl G, Lagerstedt Å, Ertbjerg P, *et al.* Ageing of large cuts of beef loin in vacuum or high oxygen modified atmosphere –Effect on shear force, calpain activity, desmin degradation and protein oxidation [J]. *Meat Sci*, 2010, 85: 160–166.
- [44] Lund MN, Lametsch R, Hviid MS *et al.* High-oxygen packaging atmosphere influences protein oxidation and tenderness of porcine longissimus dorsi during chill storage [J]. *Meat Sci*, 2007, 77: 295–303.
- [45] King NJ, Whyte R. Does it look cooked? A review of factors that influence cooked meat color [J]. *J Food Sci*, 2006, 71: R31–R40.
- [46] Lyon BG, Berry BW, Soderberg D, *et al.* Visual color and doneness indicators and the incidence of premature brown color in beef patties cooked to four end point temperatures [J]. *J Food Prot*, 2000, 63: 1389–1398.
- [47] Seyfert M, Hunt MC, Manicini RA, *et al.* Internal premature browning in cooked steaks from enhanced beef round muscles packaged in high-oxygen and ultralow oxygen modified atmospheres [J]. *J Food Sci*, 2004, 69: C142–C146.
- [48] Sanchez-Escalante A, Djenane D, Torrescano G, *et al.* The effects of ascorbic acid, taurine, carnosine and rosemary powder on colour and lipid stability of beef patties packaged in modified atmosphere [J]. *Meat Sci*, 2001, 58: 421–429.
- [49] Rajkovic, A., Tomic, N., Smigic N. *et al.* Survival of *Campylobacter jejuni* on raw chicken legs packed in high-oxygen or high-carbon dioxide atmosphere after the decontamination with lactic acid/sodium lactate buffer [J]. *Inter. J. Food Microbiol.*, 2010, 140:201–206
- [50] Suman SP, Faustman C, Lee S, *et al.* Effect of erythorbate, storage and high-oxygen packaging on premature browning in ground beef [J]. *Meat Sci*, 2005, 69: 363–369.
- [51] Kim YH, Huff-Lonergan E, Sebranek JG. *et al.* Effects of lactate/phosphate injection enhancement on oxidation stability and protein degradation in early postmortem beef cuts packaged in high oxygen modified atmosphere [J]. *Meat Sci*, 2010, 86: 852–858.
- [52] Ramanathan R, Mancini RA, Van Buiten CB, *et al.* Effects of pyruvate on lipid oxidation and ground beef color [J]. *J Food Sci*, 2012, 77: C886–C892.
- [53] Jongber S, Skov SH, Tørngren MA, *et al.* Effect of white grape extract and modified atmosphere packaging on lipid and protein oxidation in chill stored beef patties [J]. *Food Chem*, 2011, 128:276–283

(责任编辑: 白洪健)

作者简介



秦卫东, 教授, 主要研究方向为畜禽科学与技术。

E-mail: wdqin@xzit.edu.cn