轻工学报® 2018 年 1 月 第 33 卷 第 1 期
JOURNAL OF LIGHT INDUSTRY Vol. 33 No. 1 Jan. 2018

引用格式:李可,刘俊雅,扶磊,等. 动物宰后胴体/肌肉冷却方式研究进展[J]. 轻工学报,2018,33(1):34 - 42.
中图分类号:TS251.1 **文献标识码**:A
DOI:10.3969/j.issn.2096 - 1553.2018.01.005
文章编号:2096 - 1553(2018)01 - 0034 - 09

动物宰后胴体/肌肉冷却方式研究进展

Research progress on chilling methods of post-mortem carcass for livestack

李可,刘俊雅,扶磊,刘骁,何向丽,栗俊广,张华,白艳红
LI Ke,LIU Junya,FU Lei,LIU Xiao,HE Xiangli,LI Junguang,ZHANG Hua,BAI Yanhong

郑州轻工业学院 食品与生物工程学院/食品生产与安全河南省协同创新中心/河南省冷链食品质量安全控制重点实验室,河南 郑州 450001
College of Food and Bioengineering/He'nan Collaborative Innovation Center of Food Production and Safety/He'nan Key Laboratory of Cold Chain Food Quality and Safety Control,Zhengzhou University of Light Industry,Zhengzhou 450001,*China*

关键词:
冷鲜肉;动物胴体;冷却方式;肉品品质

Key words:
chilled fresh meat;
carcass for livestack;
chilling method;
meat quality

摘要:综述了传统冷却方式、喷淋冷却方式、血管注射冷却方式、逐步冷却方式和超快速冷却方式 5 种常用的动物宰后胴体/肌肉冷却方式研究与应用现状,提出优化宰后胴体/肌肉的冷却方式以降低胴体质量损失、改善肉的嫩度、保证冷鲜肉的品质和降低企业经济成本,仍是该领域的研究热点. 开展逐步分段冷却方式和超快速冷却方式对肌肉嫩度影响机制的研究,依据胴体质量和形状,综合考虑不同种类胴体和肌肉纤维类型的差异,对不同冷却方式参数进行调整,并结合应用电刺激、改进包装方式等措施以保证肉品品质与安全,将是该领域未来的发展趋势和主要研究方向.

收稿日期:2017 - 09 - 04
基金项目:"十三五"国家重点研发计划(2016YFD040040304);国家自然科学基金青年科学基金项目(31601492);河南省重大科技专项项目(161100110600,161100110900);河南省高等学校重点科研项目(16A550006);郑州轻工业学院博士科研启动基金项目(2015BSJJ038);郑州轻工业学院校级青年骨干教师培养对象资助计划项目
作者简介:李可(1986—),男,山东省济南市人,郑州轻工业学院讲师,博士,主要研究方向为肉品加工与质量安全控制.

Abstract: The recent research and application status of chilling methods of post-mortem carcass was summarized, including the conventional chilling, spray chilling, vascular perfusion chilling, stepwise chilling and very fast chilling. Optimizing the chilling methods of post-mortem carcass in order to reduce weight loss of post-mortem carcass, improving the meat tenderness, ensuring meat quality and decreasing economic loss of meat factory have become the research hotspot in this field. Exploring the effect of stepwise chilling and very fast chilling on meat tenderness and potential mechanism, comprehensively considering the differences in carcass types and muscle fibers according to mass and shape of post-mortem carcass, adjusting the parameters of different chilling methods, applying the electrical stimulation and improving the packaging methods to guarantee the meat quality and safety will be the development trend and main research direction in the future.

0 引言

冷鲜肉是我国城乡居民肉类消费的一个重要品类[1-4],由于动物刚刚屠宰后胴体温度较高,如果不采取措施及时排除胴体内部热量,很难保证肉品的安全和食用品质[5-6]. 因此,开展动物宰后胴体/肌肉冷却的相关研究至关重要[7-8]. 此外,合理且有效的冷却方式对控制企业经济成本非常重要:一方面,冷却是企业屠宰加工处理中能量消耗最大的环节;另一方面,冷却环节显著影响胴体的质量损失. 据 B. Tim 等[9]保守计算,冷却过程中胴体质量减少带来的经济损失是能耗费用的 17 倍.

动物宰后胴体/肌肉冷却是 HACCP 和 PACCP 体系的关键控制点,也一直是肉品加工行业科技工作者关注的热点之一. 已有研究[10]表明,宰后不恰当的温度变化能够导致肉品食用品质的不可逆损坏. 随后,J. W. Savell 等[11]也综述了胴体各种冷却方式对肉品食用品质的影响. 随着近年来畜牧养殖业的迅速发展,以及消费者追求高品质肉品需求的不断增加,关于动物宰后胴体/肌肉冷却方式的研究在国内外又有了新的发展. 本文拟对动物宰后胴体/肌肉不同冷却方式的最新研究进展进行综述,以期为动物屠宰加工企业改善冷却系统、提升肉品的食用品质提供理论参考.

1 传统冷却方式

传统冷却方式是指将胴体放置在 0 ~ 4 ℃(风速 0.2 ~ 0.5 m/s,空气相对湿度 90%)的冷却间中,使胴体中心温度达到 0 ~ 4 ℃的冷却过程[5,7]. 使用该方式时,通常牛胴体的冷却时间达到 24 ~ 48 h,容易造成胴体质量的严重损失. 因此,目前屠宰加工企业中胴体冷却参数的制定主要以预防冷收缩的发生为目标.

J. R. Bendall[12]提出了经典的预防冷收缩规则,即牛胴体的温度在宰后 10 h 内不能降低到 10 ℃以下. D. J. Troy 等[13]建议胴体温度在宰后 12 h 内应控制在 12 ℃以上. 有学者研究延迟冷却对胴体/肌肉冷收缩的影响,即将胴体放置于冷却室外或 15 ~ 20 ℃环境一段时间,随后转入 0 ~ 4 ℃ 常规冷却间,结果表明,延迟冷却能够有效预防肌肉冷收缩的发生,改善肉的嫩度[14-15].

然而,预防冷收缩的冷却参数仍有很大的局限性,尤其是近几年随着品种选育和饲养条件的改善,饲养业大发展,动物胴体质量逐步增加,北美地区已经较少使用延迟冷却方式. 原因是,延迟冷却或僵直期间温度控制不合理容易引起肌肉热收缩,降低肉的保水性和嫩度[16-18]. 研究发现,在 15 ~ 20 ℃ 区间放置的肌肉收缩量最小,可减小肉的硬度的增加量. 但长时间放置在 15 ~ 20 ℃下,胴体或热剔骨肉容易出现微生物甚至致病菌的生长繁殖[19-21]. 因此,根据胴体重量或热剔骨方式选择合理的冷却程序(温度、湿度、风速),才能保证肉品的安全和食用品质[22-24].

2　喷淋冷却方式

喷淋冷却方式是将 0 ~ 4 ℃冷水通过喷淋设备雾化成细小液滴,喷射在胴体上的过程. 在肉类屠宰加工企业中,传统冷却方式易使胴体表面发生蒸发和干燥,造成胴体质量的严重损失,在北美地区胴体质量损失为 0. 75% ~ 2.00%,而在英国为 1.2% ~ 1.7%[25]. 为了控制胴体失重,保证肉品安全,喷淋冷却逐渐被广泛应用于北美、欧洲等地的肉屠宰加工流程中[26-28].

C. S. Prado 等[25]报道了两种冷却方式对牛胴体质量的影响:一种为冷却 48 h,风速 2.0 m/s,并且在宰后 6 h 内每间隔 10 min 喷淋 2 ℃ 水 30 s;另一种为冷却 48 h,风速 2.0 m/s,并且在宰后 12 h 内转入 10 ℃冷却,然后再转入 0 ℃冷却,喷淋条件与前者一致. 结果发现,经两种方式喷淋冷却后,胴体质量损失分别为 -0.28% 和 0. 34%. E. Wiklund 等[28]研究发现喷淋冷却鹿胴体 6 h 后,胴体质量损失小于 0.01 kg,而传统冷却处理的胴体损失为 1 kg. 同时,喷淋冷却方式对鹿肉的嫩度和保水性没有影响. 这与先前报道喷淋传统冷却后牛胴体质量损失比传统冷却低 0. 19% 的结果基本一致[26].

喷淋冷却胴体的效果主要取决于冷水喷淋的程序(循环次数、时间),在保证降低胴体干耗的同时,应考虑喷淋冷却引起的空气湿度增大对肉品外观、嫩度和微生物增长的影响[29-30]. 另外,喷淋冷却过程还应防止胴体质量过度增加,因此有些国家/地区禁止使用喷淋冷却方式[31].

3　血管注射冷却方式

血管注射冷却方式是在动物放血后利用血管这一传导通道,将预冷水或低浓度冷盐水输送至深层肌肉内部来达到迅速冷却的目的. 血管注射预冷水冷却牛、羊胴体作为一种新的快速冷却方法,能够有效预防由深层肌肉温度较高和 pH 值下降过快而引起的蛋白质变性及肉品嫩度和保水性的劣化.

B. Tim 等[9]报道了应用血管注射冰浆来加快冷却羊胴体的方法. 使用该冷却方式,羊胴体深层肌肉的温度降至 20 ℃所需的时间从以往的 2.6 h 缩短至 1.3 h. Y. Wang 等[32]研究发现,血管注射冷却方式使胴体背最长肌温度降至 10 ℃所需时间从以往的 9.9 h 缩短到 5.5 h.

然而,水的添加对肉的外观和质构特性产生了不利影响. 因此,仍需进一步研究,以优化血管注射方式在肉屠宰加工企业的应用.

4　逐步冷却方式

逐步冷却方式又称多段式冷却,是指先将胴体温度快速冷却到 10 ~ 15 ℃,然后控制温度恒定一段时间,在此温度下肌肉进入僵直阶段,最后转至 0 ~ 4 ℃冷却 24 h. 目前,已有关于应用逐步冷却方式处理猪胴体的研究报道,认为逐步冷却方式不仅能够改善肉的嫩度并保持良好的保水性,还可以抑制产品表面的微生物生长[33-34]. 与牛肉和羊肉不同,宰后早期猪肉在低温下不易发生冷收缩. 所以宰后初期快速冷却可降低猪胴体的温度和减缓 pH 值的下降速率,减少猪的肌肉 PSE 的发生. 多段式冷却方式能够更好地保证猪肉的品质,主要基于以下几个原因:1)在僵直阶段保持适宜的温度既能保证僵直期间肌肉的收缩程度最小,又使宰后肌肉蛋白质水解程度最大[19];2)良好的宰前管理能有效降低猪肉 PSE 的发生率[35];3)糖原酵解的速率在 15 ℃时与 4 ℃时是相同的[36]. 然而,S. D. Shackelford 等[37]发现,早期快速冷却对猪背腰肉的嫩度产生负面作用,与其他的研究[38-39]报道不一致. 其原因可能是现

代基因选育的不同品质猪肉影响了冷却速率. 因此,应该关注现代饲养加工变化趋势,调整冷却速率,以免猪肉品质下降对企业造成经济损失. 另外,M. Therkildsen 等[40]研究了逐步冷却(-22.8 ℃,3.9 m/s,52 min;10 ℃,6 h;1 ℃,2 h)结合盆骨吊挂和成熟处理等方式有效解决有机猪肉品质较差的问题.

R. A. Bowling 等[41]较早报道了逐步冷却对牛胴体品质的影响. 结果发现,与常规冷却(-7 ℃,24 h)相比,将牛胴体在-70 ℃下冷冻5 h,然后在16 ℃放置4 h,最后在1 ℃放置15 h的冷却,获得了较大的肌节长度、较小的剪切力值和较高的嫩度感观评分,且有效降低了胴体干耗失分,增加了大理石花纹评分. 然而,目前鲜有研究多段式冷却方式对牛肉品质的影响的报道,这可能与牛胴体宰后早期超低的冷却温度条件很难在屠宰加工企业实施有关. 前期快速冷却速率可以显著降低胴体的水分损失,抑制肉表面微生物的生长,但通常也认为容易导致牛肉发生冷收缩,成熟贮藏也难以改善肉的嫩度. L. Zhu 等[42]研究发现,应用快速冷却((-14±1) ℃,风速3 m/s,2 h)的同时必须结合电刺激处理,才可以有效预防冷收缩发生. 另外,当胴体在较低温度快速冷却时,由于饲养育肥的牛体重较大、脂肪厚度增加,容易使内外层肌肉之间产生温度差. 因此,在进行冷却参数设计时,需进一步关注宰后温度对牛胴体重要部位肌肉嫩度影响的规律. 最近,Y. Liu 等[43]研究设计了中国黄牛胴体的逐步冷却方法:先快速冷却(温度(-11±1) ℃,风速0.5 m/s)2 h,然后停止冷却(风速0 m/s)直到宰后10 h,保证牛背最长肌在12~18 ℃条件下进入尸僵,然后转至(1±1) ℃(风速0.5 m/s)冷却到宰后48 h. 结果表明,该逐步冷却方式可以有效改善黄牛肉嫩度,缩短成熟时间. 僵直前期12~18 ℃温度控制的逐步冷却程序结合盆骨吊挂技术,既能满足尽可能缩短胴体冷却时间、减少胴体质量损失的要求,也能提供最佳的肉品品质,可在商业化屠宰企业中推广应用[44]. 此外,如何将逐步冷却方式与宰后电刺激、吊挂、成熟处理等方式相结合,以改善各种肉类的品质,也值得进一步探讨.

5 超快速冷却方式

超快速冷却方式是指在宰后5 h内,肌肉温度从40 ℃迅速降低至0 ℃或-1 ℃[45-46]. 该冷却方式的特点是将处于僵直前期的肌肉温度降低到冰点附近. 欧盟较早地研究并应用超快速冷却方式,以预防肌肉冷收缩的发生,降低微生物生长与胴体干耗,缩短胴体冷却时间并保证肉的嫩度[45].

J. L. Aalhus 等[47]应用超快速冷却(-20 ℃/-35 ℃,风速2.32 m/s)方式处理加拿大一级牛胴体,冷却时间为3~10 h. 结果表明,即使牛胴体温度没有严格达到超快速冷却条件,但与常规冷却相比,该冷却方式足以保证牛肉的嫩度并缩短成熟时间,提高牛肉大理石花纹的评定等级. 超快速冷却具有减少冷却时间、增加产品出转率、降低肌肉冷收缩和水分损失等潜在优势,是对经典预防肌肉冷收缩发生准则的挑战. 该冷却方式与食用品质保证关键控制点中pH-温度-时间窗口理论存在不一致性. 因为超快速冷却迅速经过肌肉易发生冷收缩的温度区间,使肌肉未发生冷收缩现象,而且能提高肉的食用品质[48-50].

J. J. Sheridan 等[50]研究认为骨骼的牵引和表面的"硬化"(表面迅速冻结和肌肉固定)对肌节收缩起到物理性限制,从而减少僵直过程的肌节收缩. R. L. Joseph[45]研究报道了超快速冷却使肌肉处在较高的pH值和较低温度条件下,使僵直早期肌浆中Ca^{2+}浓度增大,进而激活Calpains酶并促进蛋白酶降解骨架蛋白,因

此可改善肉的嫩度,同时克服由于过度收缩而增加肌肉硬度的不良影响. 然而关于超快速冷却方式介导的物理效应与生物化学酶活性对肉嫩度的贡献度仍需进一步研究. V. M. Moeseke 等[51]研究了不同超快速冷却方式(-20/-25 ℃,3 m/s 或 3.4% NaCl, -2 ℃)对牛肉品质的影响,结果发现,超快速冷却增加了肌浆 Ca^{2+} 浓度,肌节发生过度收缩导致牛半键肌肉的嫩度降低,但 Ca^{2+} 浓度增加并未促进 Calpains 酶活性水平和肌肉骨架蛋白质的降解.

近几年,关于超快速冷却方式对肉嫩度影响及其机制的研究正逐步成为热点. R. Jacob 等[48]研究了不同超快速冷却速率(1.5 h 后肌肉温度为 2.6 ℃,5.5 h 后肌肉温度至 0.7 ℃,1.5 h 后肌肉温度至 -1.6 ℃,5.5 h 后肌肉温度至 -2.3 ℃)对羊肉嫩度的影响,结果表明,经过超快速冷却,羊肉温度在宰后 1.5 h 内必须降至 0 ℃以下才能保证良好的嫩度. A. M. Fernández 等[14]研究发现,超快速冷却(-20 ℃,3.5 h)能够使羊肉的肌节长度缩短至 1.1 μm,远小于常规冷却处理组,但客观测定剪切力值和主观感官评定的嫩度与常规冷却组差异不显著. K. Li 等[52]研究了超快速冷却(-21 ℃,3 h)对牛肉嫩度的影响,结果表明,宰后 1 d 的牛肉肌节长度过度缩短,但牛肉的剪切力值与常规冷却(14 ℃,10 h)无差异;超快速冷却使肌原纤维产生挛缩带并使冰晶破坏肌原纤维,从而改善肉的嫩度. 但在成熟贮藏时超快速冷却处理组的成熟速率最低且汁液损失最大. M. P. Neto 等[53]研究了不同冷却方法和热剔骨对牛背最长肌肉的品质影响,结果发现,与常规冷却(0 ℃,24 h)相比,超快速冷却(-20 ℃,2 m/s,3.5 h)至肉表面微冻,宰后 1 d 的牛肉肌节长度并未缩短,各个处理组剪切力值没有差异,但在成熟后期肌节长度缩短至约为 1.23 μm. 超快速冷却处理抑制了成熟过程中的嫩化,增加了肉的硬度与汁液损失. 通过以上研究发现,超快速冷却对肉成熟过程中嫩度的影响具有不一致性. K. Li 等[52]借助透射电镜观察肌原纤维超微结构,有效解释了肌节虽然过度收缩,但成熟初期并未降低肉嫩度的原因;R. Jacob 等[48]研究发现,超快速冷却(宰后 1.5 h 后肌肉温度降至 -1.6 ℃)使肌肉表面冷冻,肌肉内能量代谢缓慢耗尽,肌原纤维之间产生的张力使肌原纤维被物理性破坏,从而加快肉的嫩化. 但超快速冷却组与常规组的肌钙蛋白-T 和 Desmin 降解并没有差异. 该学者认为,肌肉表面冷冻只起到部分物理性限制作用,主要是通过优化超快速冷却肌肉的时间和温度产生了嫩化效果,很可能存在其他嫩化机制. 最近,R. D. Warner 等[54]研究发现经超快速冷却的羊肉糖原酵解代谢过程中 IMP 含量增加,引起肌动蛋白-肌球蛋白交联桥弱化,从而改善了肉的嫩度. A. L. Sikes 等[55]研究发现,超快速冷却对热剔骨牛肉的嫩化主要基于超快速冷却使沿着肌纤维方向的结构改变,并不是由牛肉成熟过程中蛋白质降解速率加快引起的.

尽管以上研究提出了不同的肌肉嫩化机理,但关于超快速冷却嫩化肌肉的机制仍不完全清楚. 超快速冷却方式对肌节的收缩、钙激活酶活性、肌原纤维蛋白质降解和糖原酵解代谢的影响是相互关联的:一方面,-2 ~ 2 ℃的区域温度对肌肉代谢具有不确定性,尤其是超快速冷却对宰后早期肌肉糖原酵解速率与程度影响差异较大;另一方面,动物本身存在个体差异,且不同的研究部位、大小、品种、基因和宰前运输状态等也是影响因素,尤其是牛、羊存在胴体大小与质量的差异,肌肉类型和表面冷冻限制能力不同. 但超快速冷却方式与传统的预防冷收缩方式规则不同,具有巨大的优势,值得进一步研究. 另外,目前超快速冷却方式已经成功应用于热剔骨肌肉和小胴体的冷却,且无需考

虑胴体的干耗问题,这使其具有广阔的发展前景.

6 结语与展望

本文通过综述宰后动物胴体/肌肉不同冷却方式的研究进展,发现必须快速降低宰后动物胴体/肌肉的温度,才能有效抑制微生物生长、降低胴体干耗,从而保证肉品品质. 其中,喷淋冷却方式虽可有效降低胴体质量损失,但是容易引起其他感官问题;逐步冷却方式的温度控制与肌肉间温度平衡是关键,否则过高的温度会导致热收缩发生;超快速冷却方式必须严格控制宰后肌肉的冷却时间和温度,在僵直前期使肌肉温度达到冰点以下,以此来保证肉的嫩度,同时应考虑其对肉品保水性、颜色等的影响. 不同的动物胴体/肌肉冷却方式对肉嫩度的影响取决于温度下降速率对僵直过程肌肉收缩和蛋白质降解程度的影响. 有效地减少宰后肌肉收缩量,且提高内源蛋白酶活性,是优化屠宰工业冷却温度条件、改善肉嫩度的基础. 然而,这同某些研究结果并不一致,例如:Ca^{2+} 的作用是两方面的,既促进肌节收缩(降低嫩度),又激活蛋白酶(改善嫩度),因而其对肉嫩度的影响效果是模棱两可的. 另外,由于现代基因工程与动物生产系统的改善,胴体质量与形状发生巨大变化,必须对不同冷却方式的参数进行调整,综合考虑肉品安全、不同种类胴体和肌肉纤维类型的差异,及时调整冷却程序,并结合应用电刺激、改进包装方式等措施,以保证肉品食用品质.

参考文献:

[1] 周光宏,罗欣,徐幸莲,等. 肉品加工学[M]. 北京:中国农业出版社,2008.

[2] SUN X D, HOLLEY R A. Antimicrobial and antioxidative strategies to reduce pathogens and extend the shelf life of fresh red meats[J]. Comprehensive Reviews in Food Science & Food Safety, 2012, 11(4): 340.

[3] ZHOU G H, XU X L, LIU Y. Preservation technologies for fresh meat—A review[J]. Meat Science, 2010, 86(1): 119.

[4] COOMBS C E O, HOLMAN B W B, FRIEND M A, et al. Long-term red meat preservation using chilled and frozen storage combinations—A review[J]. Meat Science, 2017, 125: 84.

[5] REID R, FANNING S, WHYTE P, et al. The microbiology of beef carcasses and primals during chilling and commercial storage[J]. Food Microbiology, 2016, 61: 50.

[6] YUAN H B K, WARNER R D, ROSENVOLD K. Influence of high pre-rigor temperature and fast pH fall on muscle proteins and meat quality—A review[J]. Animal Production Science, 2014, 54(4): 375.

[7] BELLÉS M, ALONSO V, RONCALÉS P, et al. A review of fresh lamb chilling and preservation[J]. Small Ruminant Research, 2017, 146: 41.

[8] ZHOU G, ZHANG W, XU X. China's meat industry revolution: Challenges and opportunities for the future[J]. Meat Science, 2012, 92(3): 188.

[9] TIM B, IAN R R, CAROLANN W, et al. Vascular perfusion chilling of red meat carcasses—A feasibility study[J]. Meat Science, 2009, 83(4): 666.

[10] FERGUSON D M, BRUCE H L, THOMPSON J M, et al. Factors affecting beef palatability—Farmgate to chilled carcass[J]. Australian Journal of Experimental Agriculture, 2001, 41(7): 879.

[11] SAVELL J W, MUELLER S L, BAIRD B E. The chilling of carcasse[J]. Meat Science, 2005, 70(3): 449.

[12] BENDALL J R. The influence of rate of chilling

in the development of rigor and cold-shortening. Pages 3. 1 – 3. 6 in meat chilling—Why and how? [M]. Langford: Meat Research Institute, 1972.

[13] TROY D J, KERRY J P, JOO S T, et al. Consumer perception and the role of science in the meat industry[J]. Meat Science, 2010, 86(1): 214.

[14] FERNÁNDEZ A M, VIEIRA C. Effect of chilling applied to suckling lamb carcasses on hygienic, physicochemical and sensory meat quality [J]. Meat Science, 2012, 92(4): 569.

[15] 罗欣,周光宏. 电刺激和延迟冷却对牛肉食用品质的影响[J]. 中国农业科学, 2008, 41(1): 188.

[16] KIM Y, STUART A, NYGAARD G, et al. High pre-rigor temperature limits the ageing potential of beef that is not completely overcome by electrical stimulation and muscle restraining[J]. Meat Science, 2012, 91(1): 62.

[17] WARNER R D, DUNSHEA F R, GUTZKE D, et al. Factors influencing the incidence of high rigor temperature in beef carcasses in Australia [J]. Animal Production Science, 2014, 54(4): 363.

[18] ROSENVOLD K, NORTH M, DEVINE C, et al. The protective effect of electrical stimulation and wrapping on beef tenderness at high pre-rigor, temperatures[J]. Meat Science, 2008, 79(2): 299.

[19] HUFF L E, ZHANG W, LONERGAN S M. Biochemistry of postmortem muscle-lessons on mechanisms of meat tenderization[J]. Meat Science, 2010, 86(1): 184.

[20] LENAHAN M, O'BRIEN S B, KINSELLA K. Assessment of lamb carcass hygiene before and after chilling at five Irish abattoirs[J]. Food Control, 2010, 21(3): 313.

[21] RUBIO B, VIEIRA C, MARTÍNEZ B, et al. Effect of different post mortem temperatures on carcass quality of suckling lamb[J]. Food Science & Technology International, 2013, 19(4): 351.

[22] SALES D C, URBANO S A, BORGES K C, et al. Cheese yield in Brazil: State of the art [J]. Food Science and Technology, 2016, 36(4): 563.

[23] MILIOS K T, DROSINOS E H, ZOIOPOULOS P E. Food safety management system validation and verification in meat industry: carcass sampling methods for microbiological hygiene criteria—A review[J]. Food Control, 2014, 43(8): 74.

[24] POPHIWA P, WEBB E C, FRYLINCK L. Meat quality characteristics of two South African goat breeds after applying electrical stimulation or delayed chilling of carcasses[J]. Small Ruminant Research, 2016, 145: 107.

[25] PRADO C S, FELÍCIO P E D. Effects of chilling rate and spray-chilling on weight loss and tenderness in beef strip loin steaks[J]. Meat Science, 2010, 86(2): 430.

[26] KINSELLA K J, SHERIDAN J J, ROWE T A, et al. Impact of a novel spray-chilling system on surface microflora, water activity and weight loss during beef carcass chilling [J]. Food Microbiology, 2006, 23(5): 483.

[27] TITTOR A W, TITTOR M G, BRASHEARS M M, et al. Effects of simulated dry and wet chilling and aging of beef fat and lean tissues on the reduction of Escherichia coli O157: H7 and Salmonella[J]. Journal of Food Protection, 2011, 74(2): 289.

[28] WIKLUND E, KEMP R M, LEROUX G J, et al. Spray chilling of deer carcasses—Effects on carcass weight, meat moisture content, purge and

microbiological quality [J]. Meat Science, 2010,86(4):926.

[29] GREIG J D, WADDELL L, WILHELM B, et al. The efficacy of interventions applied during primary processing on contamination of beef carcasses with Escherichia coli : A systematic review-meta-analysis of the published research [J]. Food Control, 2012, 27(2):385.

[30] DE MELLO A S, RINGKOB T P, YEH Y. Effects of long spray-chilling on water pocket development in ribeyes [J]. Meat Science, 2017, 129:185.

[31] SAMPAIO G S L, PFLANZER-JÚNIOR S B, ROÇA R D O, et al. Effects of polyethylene film wrap on cooler shrink and the microbial status of beef carcasses[J]. Meat Science, 2015, 100: 164.

[32] WANG Y, MCGINNIS D S, SEGADO R R, et al. Vascular infusion of beef carcasses: Effects on chilling effciency and weight change [J]. Food Research International, 1995, 28 (4):425.

[33] ROSENVOLD K, BORUP U, THERKILDSEN M. Stepwise chilling: Tender pork without compromising water-holding capacity[J]. Journal of Animal Science, 2010, 88(5):1830.

[34] ROSENVOLD K, BORUP U. Stepwise chilling adapted to commercial conditions-improving tenderness of pork without compromising water-holding capacity[J]. Acta Agriculturae Scandinavica, 2011, 61(3):121.

[35] BARBUT S, SOSNICKI A A, LONERGAN S M, et al. Progress in reducing the pale, soft and exudative (PSE) problem in pork and poultry meat[J]. Meat Science, 2008, 79(1):46.

[36] KYLÄ-PUHJU M, RUUSUNEN M, PUOLANNE E. Activity of porcine muscle glycogen debranching enzyme in relation to pH and temperature[J]. Meat Science, 2005, 69(1):143.

[37] SHACKELFORD S D, KING D A, WHEELER T L. Chilling rate effects on pork loin tenderness in commercial processing plants[J]. Journal of Animal Science, 2012, 90(8):2842.

[38] LIU N, LIU R, HU Y, et al. Influence of rapid chilling on biochemical parameters governing the water-holding capacity of pork longissimus dorsi[J]. International Journal of Food Science & Technology, 2015, 50(6):1345.

[39] XU Y, HUANG J C, HUANG M, et al. The effects of different chilling methods on meat quality and calpain activity of pork muscle longissimus dorsi [J]. Journal of Food Science, 2012, 77(1):C27.

[40] THERKILDSEN M, KRISTENSEN L, KYED S, et al. Improving meat quality of organic pork through post mortem handling of carcasses: An innovative approach[J]. Meat Science, 2012, 91 (2):108.

[41] BOWLING R A, DUTSON T R, SMITH G C, et al. Effects of cryogenic chilling on beef carcass grade, shrinkage and palatability characteristics[J]. Meat Science, 1987, 21(1):67.

[42] ZHU L, GAO S, LUO X. Rapid chilling has no detrimental effect on the tenderness of low-voltage electrically stimulated *M. longissimus* in Chinese bulls[J]. Meat Science, 2011, 88(3): 597.

[43] LIU Y, MAO Y, ZHANG Y, et al. Pre-rigor temperature control of Chinese yellow cattle carcasses to 12 ~ 18 ℃ during chilling improves beef tenderness[J]. Meat Science, 2015, 100:139.

[44] LIU Y, MAO Y, LIANG R, et al. Effect of suspension method on meat quality and ultrastructure of Chinese yellow cattle under 12 ~ 18 ℃ pre-rigor temperature controlled chilling [J]. Meat Science, 2016, 115: 45.

[45] JOSEPH R L. Very fast chilling of beef and tenderness—A report from an EU concerted action [J]. Meat Science, 1996, 43S1(12): 217.

[46] RONCALES P. Very fast chilling of beef: Muscle to meat—An introductory review [J]. Very Fast Chilling in Beef, 1998, 2: 1.

[47] AALHUS J L, ROBERTSON W M, MER D, et al. Very fast chilling of beef carcasses [J]. Canadian Veterinary Journal La Revue Veterinaire Canadienne, 2002, 82(1): 59.

[48] JACOB R, ROSENVOLD K, NORTH M, et al. Rapid tenderisation of lamb *M. longissimus*, with very fast chilling depends on rapidly achieving sub-zero temperatures [J]. Meat Science, 2012, 92(1): 16.

[49] JAIME I, BELTRAN J A, CENA P, et al. Tenderisation of lamb meat: Effect of rapid postmortem temperature drop on muscle conditioning and aging [J]. Meat Science, 1992, 32(4): 357.

[50] SHERIDAN J J. The ultra-rapid chilling of lamb carcasses [J]. Meat Science, 1990, 28(1): 31.

[51] MOESEKE V M, SDE S, CLAEYS E, et al. Very fast chilling of beef: Effects on meat quality [J]. Meat Science, 2001, 59(1): 31.

[52] LI K, ZHANG Y, MAO Y, et al. Effect of very fast chilling and aging time on ultra-structure and meat quality characteristics of Chinese yellow cattle *M. Longissimus lumborum* [J]. Meat Science, 2012, 92(4): 795.

[53] NETO M P, BERAQUET N J, CARDOSO S. Effects of chilling methods and hot-boning on quality parameters of *M. longissimus lumborum* from *Bos indicus* Nelore steer [J]. Meat Science, 2013, 93(2): 201.

[54] WARNER R D, JACOB R H, ROSENVOLD K, et al. Altered post-mortem metabolism identified in very fast chilled lamb *M. longissimus thoracis et lumborum* using metabolomic analysis [J]. Meat Science, 2015, 108: 155.

[55] SIKES A L, JACOB R, D'ARCY B, et al. Very fast chilling modifies the structure of muscle fibres in hot-boned beef loin [J]. Food Research International, 2017, 93: 75.