

肌纤维类型对羊肉肉质风味的调控机制及影响因素研究进展

张小飞^{1,2}, 柴进², 陈孟杰^{1*}, 熊琪^{1*}

(1. 湖北省农业科学院畜牧兽医研究所, 动物胚胎工程及分子育种湖北省重点实验室, 湖北武汉 430064;

2. 华中农业大学农业动物遗传育种与繁殖教育部重点实验室, 湖北武汉 430070)

摘要: 羊肉是一种重要的肉类消费品, 具有肉质细嫩、营养价值高等优点, 以及有别于其他红肉的独特风味, 正受到越来越多消费者的关注。肌纤维作为肌肉组织的基本结构和功能单位, 其类型组成是影响羊肉品质与风味的核心内因。近年来, 随着对羊肉肉质风味的深入研究, 肌纤维类型与羊肉品质风味之间的关系也逐渐成为研究的热点。因此, 本文在概述肌纤维类型分类及羊肉风味形成途径的基础上, 重点阐述了肌纤维类型影响羊肉色泽、pH、嫩度、多汁性及风味物质形成的作用机制, 进而系统分析了品种、基因型、年龄、性别、饲养方式及饲料营养等因素如何通过调节肌纤维类型转化与组成, 最终调控羊肉品质与风味。最后, 本研究对当前研究的不足之处进行了总结并展望了未来的研究方向, 以期为优质羊肉的遗传改良和精准生产提供理论参考。

关键词: 羊肉; 肌纤维类型; 肉质; 风味

中图分类号: S826

文献标识码: A

DOI 编号: 10.19556/j.0258-7033.20250608-01

羊肉细嫩多汁、味道鲜美且风味独特, 具有高蛋白、低脂肪、低胆固醇、富含人体所必需的氨基酸、维生素和微量元素等优点, 在人们的饮食结构中占据重要地位, 也深受消费者的喜爱^[1]。近年来, 随着居民生活水平的提升及“健康饮食”理念的普及, 消费者对羊肉的需求逐渐从“量的保障”转向“质的追求”, 尤其对肉质嫩度、多汁性及风味品质的要求显著提高^[2]。在此背景下, 如何提高羊肉肉质, 改善风味、降低膻味, 已成为肉羊产业提质增效与可持续发展亟需解决的核心问题。肉质风味是羊肉品种选育的核心指标, 主要表现在肉的颜色、

pH、嫩度、肌肉脂肪、多汁性及风味等方面, 其形成是遗传、生理代谢与环境因素共同作用的复杂过程, 而肌纤维作为肌肉组织的基本功能单位, 是连接“生理代谢”与“肉质风味”的关键纽带。研究表明, 肌纤维类型、直径、密度和代谢特性等因素都会影响羊肉的嫩度、多汁性和风味物质含量, 最终影响羊肉的整体风味特征^[3]。因此, 阐明羊肉风味的形成途径、解析肌纤维类型与羊肉肉质风味之间的关系、梳理影响肌纤维类型及肉质风味的因素, 对于提高羊肉品质、降低膻味, 满足消费需求, 促进养羊产业可持续发展具有重要意义。

1 肌纤维特性及在羊肉中的分布

肌纤维是肌肉最基本的组成单位, 约占肌肉体积的75%~90%, 呈细长、多核、纺锤形, 由许多紧密堆积的肌原纤维组成, 对调节畜禽机体代谢和内分泌具有重要作用^[4]。家畜肌肉中包含多种肌肉纤维类型, 不同类型肌纤维的收缩特性、代谢模式差异, 是决定肉质嫩度、多汁性及风味等的关键因素。传统的肌纤维类型分类方法, 是把肌纤维分为红肌纤维、白肌纤维及介于两者之间的中间型肌纤维三类。随着分子生物学技术的发展,

收稿日期: 2025-06-08; 修回日期: 2025-11-05

资助项目: 湖北省支持种业高质量发展资金项目 (HBZY2023 B008); 湖北省尖刀项目 (2023BAA029); 湖北省揭榜制科技项目 (2025BE061); 湖北省科技计划项目 (2025EBA026、2025EBA004); 湖北省中央引导地方科技发展专项 (2024BBB112)
作者简介: 张小飞 (2001-), 女, 河南邓州人, 硕士研究生, 主要从事动物遗传育种与繁殖研究, E-mail: 3523305740@qq.com

*通信作者: 陈孟杰 (1994-), 女, 河南周口人, 博士, 助理研究员, 主要从事动物遗传育种工作, E-mail: mengjiechen2020@163.com; 熊琪 (1981-), 女, 湖北武汉人, 博士, 研究员, 主要从事动物遗传育种工作, E-mail: phenixxq@163.com

肌纤维分类更聚焦于肌球蛋白重链（MyHC）亚型这一核心标志物。1970 年，Brooke 等^[5]根据肌球蛋白 ATP 酶反应活性的不同，将肌纤维分为 I 型、II A 型和 II B 型肌纤维 3 种。Jouffroy 等^[6]采用 NADH-TR 染色法将肌纤维分 I 型、II A 型、II B 型和 II X 型肌纤维 4 种，其分子基础主要对应 MyHC I、MyHC II A、MyHC II B 和 MyHC II X 4 种亚型。这 4 种肌纤维类型分别表示慢收缩氧化型肌纤维、快收缩氧化酵解型肌纤维、快收缩酵解型肌纤维、中间型肌纤维。在羊的肌肉组织中，上述肌纤维类型的组成与分布呈现出显著的部位特异性和品种差异性，这是导致不同部位羊肉质地与风味差异的内在原因之一。研究表明，运动量多的羊肉部位氧化能力和抗氧化能力更强，具有较多的氧化型肌纤维，可以给机体产生更多的 ATP^[7]。目前，针对羊肉肌纤维特性研究较多的部位是背最长肌和股二头肌。羊肉股二头肌通常含有更高比例的 I 型肌纤维，且肌红蛋白丰富，是不饱和脂肪酸积累的核心区域；而背最长肌中 II 型肌纤维占比较高，这与肌肉的快速生长需求和宰后更快的糖酵解速率有关^[8-9]。每种肌纤维类型的作用特征及其在羊肉中的分布详见表 1。

2 羊肉风味形成的关键途径

风味是肉制品最重要的品质特征之一，也是影响肉制品整体可接受性的关键因素，包括香味、滋味和膻味。肉中的风味前体物质通过一系列呈味反应生成多种风味物质，从而表现出羊肉独特的风味。

2.1 脂质氧化 脂质氧化是羊肉挥发性风味化合物形成的关键途径之一。羊肉中不饱和脂肪酸（Unsaturated Fatty Acids, UFA）含量较高，且结构不稳定性，羊肉中的脂类在陈化、加工和贮藏过程中易发生氧化，产生一些风味阈值较低的挥发性羰基化合物，如醛类、酮类、酯类、醇类等，对羊肉香味具有决定性作用^[10]。但过度的脂质氧化会产生过熟味（Warmed-off Flavor, WOF），主要是由烹饪过程中释放的亚铁血红素和非

亚铁血红素催化肌肉中的磷脂氧化导致，最终形成肉品不良风味物质^[11]。

2.2 美拉德反应 美拉德反应（Maillard Reaction）是指食物中的还原糖（如葡萄糖、核糖）和游离氨基酸（如氨基酸、蛋白质、多肽等）在加热过程中发生的一类复杂的非酶褐变反应，会发生脱水、降解、缩合、聚合等反应，最终产生吡咯、吡嗪、呋喃、噻唑等化合物，赋予羊肉独特的风味、色泽^[12]。鲜味氨基酸，如谷氨酸、天冬氨酸、甘氨酸、丙氨酸等可通过美拉德反应形成鲜味化合物，增强了羊肉的鲜味口感^[13]。美拉德反应还可以与脂质热降解反应相互作用影响羊肉的整体风味。

2.3 硫胺素热降解 硫胺素又称维生素 B₁，是一种含硫和含氮的双环化合物，作为肉类风味的重要前体物，在中性和碱性条件下易发生热降解反应，生成多种含氮或含硫的挥发性香味物质，如脂肪族硫化物、噻吩和脂环硫等^[14-15]。研究报道，羊肉中硫胺素含量在 0.17~0.18 mg/100 g，其降解效率易受 pH、温度、时间、基质组成等因素的影响^[16]，通过调控羊肉的烹饪条件提升硫胺素降解效率，提高羊肉的香味和鲜味。

2.4 瘤胃微生物代谢 反刍动物瘤胃微生物群落结构复杂，瘤胃中存留的大量微生物对饲料消化利用、能量物质转化、脂肪沉积及肉质风味物质形成等都具有重要影响，如瘤胃中的酵母菌和乳酸菌可以分解羊肉中的糖类和蛋白质，生成醇、酯、酸等挥发性化合物。瘤胃微生物氢化作用产生的 4- 烷基支链脂肪酸，如 4- 甲基辛酸（4-methyloctanoic Acid, MOA）、4- 乙基辛酸（4-ethyloctanoic Acid, EOA）、4- 甲基壬酸（4-methylnonanoic Acid, MNA）等，对羊肉膻味具有决定性作用^[17]。研究报道，利用百合科葱属植物及其提取物的活性成分等方法可以阻滞瘤胃微生物的生物氢化作用，进而抑制 4- 烷基支链脂肪酸的合成，降低羊肉的膻味^[1]。

3 肌纤维类型影响羊肉肉质和风味的作用机制

3.1 肌纤维类型对肉色的影响 色泽是消费者判断羊肉

表 1 肌纤维类型的作用特征

肌纤维类型	主要标记	直径	收缩速度	线粒体密度	代谢类型	肌红蛋白含量	糖原含量	耐疲劳性	羊肉中分布部位
I 型	MyHC I	最细	最慢	最高	有氧氧化	最高	最低	最高	股二头肌
II A 型	MyHC II A	中等	中等	高	有氧 - 糖酵解	高	中等	中等	背最长肌
II X 型	MyHC II X	粗	快	中等	无氧酵解	中等	高	低	-
II B 型	MyHC II B	最粗	最快	最低	无氧酵解	最低	最高	最低	背最长肌

品质是否新鲜的直观依据之一，它决定了消费者对羊肉的最终评价和接受程度。正常的羊肉呈鲜红色或砖红色，其中肌红蛋白是影响鲜肉色泽的主要物质^[18]。I 型肌纤维肌红蛋白含量约为 II B 型纤维的 4 倍，富含 I 型纤维的肌肉颜色会更鲜红（ a^* 值更高），也更受消费者青睐^[19]。II B 型肌纤维中具有更多的糖酵解酶和肌浆网，宰后产生的厌氧代谢物，可能导致肌肉出现 PSE 肉特征，即表现为肉色苍白（Pale）、质地松软（Soft）和汁液渗出（Exudative），此类肉的亮度 L^* 值通常较高^[20]。苏尼特羊股二头肌 I 型比例（16.3%）显著高于背最长肌（8.7%），且股二头肌的 a^* 值显著高于背最长肌， L^* 值显著低于背最长肌^[8]。

3.2 肌纤维类型对羊肉 pH 的影响 pH 是反映羊肉新鲜度和肉质的重要指标。一般而言，反刍动物宰后肌肉 pH 的下降速度比猪和鸡慢，这是由于反刍动物中慢氧化肌纤维的比例更高^[21]。研究表明，肌肉中 I 型肌纤维比例增加能够延缓 pH 下降的速率，同时改善羊肉的持水性、多汁性和风味。而富含 II B 型肌纤维的肌肉，宰后机体由于缺氧而使乳酸和磷酸快速积聚，引起肌肉 pH 和系水力大幅下降，也会造成血红蛋白大量流失，严重时可能会形成白肌肉^[22]。通过降低猪背最长肌中 II B 型和 II X 型肌纤维的百分含量，可降低宰后 pH 的下降程度，从而提高肉品质^[23]。宰前应激也会使胴体糖原大量消耗，导致 pH 下降缓慢，形成黑干肉，影响风味^[24]。

3.3 肌纤维类型对羊肉嫩度的影响 嫩度指肉在食用时被嚼烂的难易程度，是羊肉品质的重要感官特性，直接影响消费者的食用体验。常用剪切力大小来评价肉的嫩度，剪切力越大，嫩度就越差。肌纤维类型通过直径与密度影响肉的嫩度。I 型肌纤维直径较小、密度较大，其比例增加会降低肌肉的剪切力值，提升肉的嫩度^[2]。相反，II B 型肌纤维直径相对较大，会降低肉的嫩度^[25]。研究也表明，牦牛肉中 I 型肌纤维比例与剪切力呈负相关，即 I 型肌纤维比例越高，剪切力越低，牛肉的嫩度也就越好^[26]。白藜芦醇可促进山羊肌纤维从快速酵解型向慢速氧化型转化，降低了滴水损失及剪切力，改善了肉的嫩度^[27]。绵羊双肌臀虽然提高了产肉率和养殖经济效益，但会使肉的肌纤维直径增大，继而导致肉的嫩度下降、多汁性能减弱^[28]。

3.4 肌纤维类型对羊肉肌内脂肪的影响 肌内脂肪

（Intramuscular Fat, IMF）指位于肌肉内和肌纤维间的脂肪，对肉的嫩度、多汁性、风味及视觉特征都有重要影响^[29]。研究表明，IMF 含量与肌纤维横截面积及 II B 型肌纤维比例呈负相关，而与 I 型肌纤维数量呈正相关^[30]。I 型肌纤维中含有较多的中性脂质，而 II B 型肌纤维几乎不含。同时 I 型肌纤维还富含磷脂，与肉的多汁性呈正相关，这对烹饪过程中的羊肉风味起重要作用^[31]。然而，也有学者认为，IMF 和肌纤维类型组成之间没有普遍通用的联系，两者特性是相对独立的，可单独操控^[32]。

3.5 肌纤维类型对羊肉风味的影响 肌纤维的代谢特性对肉质风味有重要影响，通过影响风味物质的生成和转化过程来发挥作用。氧化型肌纤维含有较多的线粒体和肌红蛋白，有利于脂肪酸 β -氧化和某些风味前体物质的生成，此类肌纤维含量增加，能够提高肌肉的鲜味和风味丰富度。相反，酵解型肌纤维比例增加，可能会导致乳酸积累，影响肉的 pH 和保水性，增加肉的酸涩味^[33]。I 型肌纤维与赖氨酸、缬氨酸和谷氨酸等必需氨基酸的含量呈正相关，从而提高了肉的营养与风味前体物水平；相反，II B 型纤维与氨基酸含量呈负相关^[34]。磷脂作为关键风味前体物质，对肉品风味具有决定性作用，I 型肌纤维对风味的积极影响可能是由于其磷脂含量较高，可通过热降解反应产生更多风味物质，但磷脂中的多不饱和脂肪酸也会增加脂肪酸氧化和酸败的风险，导致不良风味的形成^[18]。

4 影响羊肉肌纤维类型及肉质和风味的因素

4.1 品种和基因型 肌纤维具有较高的遗传力，由于遗传背景的差异，不同品种的羊在肌纤维类型组成、分布比例及代谢特性上存在很大差异。苏尼特羊各类肌纤维的直径和横切面积均显著低于巴美肉羊和小尾寒羊，在一定程度上解释了苏尼特羊肉质优良的内在原因^[35]。湖羊背最长肌的肌纤维直径小于陶赛特羊，肌纤维密度显著大于陶塞特羊，表明湖羊的肉质比陶赛特羊更细嫩^[36]。这也揭示了我国地方品种羊（如湖羊、苏尼特羊）通常比国外引进的肉用品种（如陶赛特羊）具有更细的肌纤维和更高的氧化潜能，这与它们肉质性状更优相关。在羊肉风味方面，与山羊肉相比，绵羊肉质地柔软细嫩，多汁性好，且肌肉粗脂肪含量高，膻味相对较轻，具有较好的食用价值^[37]。哈萨克羊肉的蛋白含量高，必需

氨基酸总量和鲜味氨基酸含量也较高,且风味较佳^[38];而乌珠穆沁羊肉中的IMF含量较高,脂肪酸组成合理且种类丰富,风味浓郁^[39]。但在品种选育中,不应仅关注“产肉量”单一指标,可将肌肉中I型与II B型肌纤维的比例设定为一个阈值,作为优质羊肉品种的选育标准之一,这既能保证一定的生长速率,又可通过氧化型肌纤维的高磷脂含量,促进脂质氧化产生更多香味物质,同时避免酵解型肌纤维过量导致的嫩度劣化。

另一方面,可以通过选育优良基因来实现肉质风味的改善。肌纤维类型在羊、猪和牛中均表现出中等偏高的遗传特性,可以将这些特性纳入基因选择程序中,通过选育来提升羊肉的肌纤维类型和肉质风味,推动羊肉产业的高质量发展^[35]。研究发现,*FoxO1*基因的表达升高与MyHC I mRNA水平呈负相关,与MyHC II X和MyHC II B呈正相关,是肌纤维类型转化的核心调控因子^[40]。氟烷(Halothane, *Hal*)基因能够下调II A型肌纤维的基因表达,上调II X型肌纤维的基因表达,增加白肌纤维的比例,降低肉品质,而酸肉(Rendement Napole, *RN*)基因突变能够降低MyHC II B mRNA并促进II A和II X mRNA的表达,这2种基因的突变,改变了肌肉中肌纤维类型的组成比例,最终都会对肉质特性产生负面影响^[41]。此外,脂蛋白脂肪酶(Lipoprotein Lipase, *LPL*)^[42]、双皮质素样激酶1(Doublecortin-Like Kinase, *DCLK1*)^[43]、脂素1(Lipin-1, *LPIN1*)^[44]等基因可通过调控IMF沉积,间接影响肌纤维类型与风味物质积累,可作为羊肉肉质性状遗传改良的分子辅助选择标记基因,提高羊产业的快速发展。

4.2 年龄和性别 年龄通过改变肌纤维类型转化方向影响肉质。氧化型纤维含量与年龄成负相关,酵解型纤维含量与年龄成正相关。肌纤维数目在动物出生时已基本固定,但其类型之间可以互相转化,遵循I型→II A型→II X型→II B型的顺序,氧化型肌纤维的比例逐渐减少,酵解型肌纤维比例增加,肌纤维逐渐变粗,肌纤维面积逐渐变大,这可能导致肉质变硬、嫩度下降^[45]。研究报道,7日龄八眉猪和长白猪背最长肌II A、II X型肌纤维比例丰富,但在180日龄时均显著降低,II B型肌纤维比例显著增加,其中长白猪的变化尤为明显^[46]。新疆褐牛和安格斯牛在不同生长阶段(3~24月龄)均表现出I型肌纤维密度随年龄的增长而降低的趋势^[47]。年龄还会影响肌肉肌内脂肪沉积、化学组成及风味物质

的积累。幼龄羊的肉质鲜嫩,肌纤维较细,结缔组织含量少,但风味相对不足。随着年龄的增加,羊肉肌纤维变粗,脂肪沉积量增加,脂肪酸组成发生改变,一些风味前体物质的含量也会发生变化,使得羊肉嫩度下降、风味逐渐浓郁^[48]。苏尼特羊随年龄增长,肌肉中多不饱和脂肪酸(Polyunsaturated Fatty Acids, PUFA)含量显著降低,而饱和脂肪酸(Saturated Fatty Acids, SFA)及硬脂酸的含量逐渐增加,羊肉的膻味物质积累增加^[49]。

性别通过激素水平调控羊肉的肉质、风味、肌纤维特性及化学组成。一般来说,公羊的生长速度比母羊快,肌肉发达,但肉质相对较粗,肌纤维直径较大,膻味也较重。这是因为公羊体内雄激素水平较高,会促进脂肪代谢,使得脂肪中的短链脂肪酸和不饱和脂肪酸含量和组成发生改变,加重肉的膻味,而母羊肉质相对细嫩,肌纤维直径最小,膻味较轻^[50]。去势公羊(羯羊)增加了机体血液中促卵泡素(Follicle-Stimulating Hormone, FSH)和促黄体素(Luteinizing Hormone, LH)的水平,降低促性腺激素和雄性激素睾酮的浓度,这种激素调控有效减少了羊肉中与膻味相关支链脂肪酸的合成,降低肉的膻味,进而显著改善肉品风味^[51]。在养殖过程中,推荐羯羊养殖,若需兼顾繁殖与肉质,母羊可作为次选,但应避免公羊直接育肥。

4.3 饲养方式与饲料营养 反刍动物饲养方式主要有天然放牧、舍饲、放牧补饲3种模式。在不同的饲养模式下,动物乳肉产品的风味和肌肉肌纤维类型也有所不同。放牧饲养使羊只运动量增加,有助于氧化型肌纤维(I型)的生成,同时牧草中的多不饱和脂肪酸也能富集到肌肉中,使得羊肉风味更自然丰富^[52]。而舍饲虽能加快增重速率,但可能增加酵解型纤维(II B型)的比例,且因高谷物日粮在瘤胃中产生更多丙酸,导致膻味支链脂肪酸的沉积增加^[53]。研究也表明,放牧羊的肌纤维最细,纤维中MyHC I表达显著升高,MyHC II A和MyHC II B表达显著降低,其剪切力值和肉色参数(L*和b*值)均显著低于舍饲羊^[54]。苏尼特羊分别在3种饲养模式下饲喂,发现舍饲组II B型肌纤维比例最高,而放牧组和放牧补饲组I型和II A肌纤维比例较高,肉质较嫩^[18],表明放牧能够增加羊肉的质量和风味。但放牧饲养育肥周期长,羊只出栏胴体重小,短期内难以达到优质羔羊标准,且放牧饲养对草地资源利用力大,经济效益低。

为加快育肥速度,通常采用白天放牧加早晚补饲饲养模式,这种模式不仅能够缩短育肥周期,节约饲养成本,羊只的日常营养需求也可以得到满足,生产的羊肉肉质风味也较好^[55]。

营养对肌纤维的生长至关重要,饲料中能量、蛋白质水平及添加剂均可通过调控肌纤维代谢影响类型组成。有研究通过用不同梯度能量分别饲喂湖羊,发现降低饲料能量水平可减小湖羊肌纤维面积、增加密度,提升肉品质^[56]。但也有研究表明,适当提高猪饲料中能量水平可以使氧化型肌纤维的比例增大,进而提高肉品质^[57]。在杜寒杂交羊的日粮中补充 100 mg/kg 的发酵麸皮多糖可显著提高背最长肌中氧化型肌纤维的表达,降低中间型肌纤维的表达和剪切力值,改善嫩度^[58]。在贵州黑山羊日粮中添加不同剂量的大蒜素,发现大蒜素可以促进肌纤维类型由 II 型肌纤维向 I 型肌纤维转化,通过调节相关酶活性和基因表达,改善肉质,也可改变羊肉中脂肪酸组成及氨基酸谱,进而影响挥发性风味物质的生成^[59]。此外,饲料成分直接影响风味物质积累。添加 3% 复合中草药可降低羊肉中 EOA、MNA 含量,减轻膻味^[60];饲喂富含单宁酸的红豆草,不仅可以抑制瘤胃脂肪酸的部分氧化,增加 n-3 PUFA 含量,还可以最小化由饲草引起的不愉快气味,改善羊肉风味^[61]。饲养过程中可通过“低能量限饲 + 添加抗氧化剂”的组合方案,减缓肌纤维向酵解型转化的速率,改善肉质风味。

5 小结与展望

本文系统阐述了以肌纤维类型作为核心内因,在羊肉品质与风味形成中的决定性作用。I 型、II A 型氧化型肌纤维因富含肌红蛋白与磷脂,可提升羊肉嫩度、多汁性与风味丰富度,是优质羊肉的核心特征;II B 型酵解型肌纤维比例过高则导致肉质粗糙、风味不足。品种、年龄、饲养方式等因素通过调控肌纤维类型转化,间接影响脂质氧化、美拉德反应等风味形成过程,最终决定羊肉品质。

但当前研究仍存在一些不足,一是肌纤维类型与风味物质的分子调控机制尚未完全明确,如磷脂代谢与肌纤维类型的关联路径需进一步解析;二是高大理石花纹等级羊肉中肌纤维类型的分布规律及调控方法缺乏数据支撑;三是现有研究多集中于背最长肌等少数商业价值

高的部位,对全身不同部位肌纤维的动态分布与转化规律缺乏系统认识。

基于此,未来研究可围绕 3 个方面展开:一是利用单细胞测序、多组学整合技术,挖掘调控肌纤维类型转化的关键基因与信号通路(如 MyHC 亚型表达调控机制);二是开展高等级大理石花纹羊肉的肌纤维特性研究,建立肌纤维类型与风味品质的精准关联模型;三是研发“遗传选育 + 营养调控 + 饲养管理”的综合技术体系,通过定向调控肌纤维向理想类型转化(如提高 I 型肌纤维比例),同时挖掘与优质肌纤维类型和低膻味性状紧密连锁的分子标记,并将其应用于羊肉品质的分子设计育种,加速培育肉质更优、膻味更轻的新品种(系)。此外,可结合电子鼻、电子舌等快速检测技术,构建羊肉风味评价标准,为优质羊肉生产提供技术支撑。

参考文献:

- [1] 杨东松,高爽,袁红,等.羊肉中呈膻物质的形成机制及降膻方式的研究进展[J].食品科学,2024,45(8):331-341.
- [2] 杨媛媛.舍饲、放牧对盐池滩羊肉风味与嫩度的影响[D].北京:中国农业科学院,2021.
- [3] 努孜古丽·图尔荪.新疆地方绵羊品种肌纤维特性与产肉量及肉品质的相关性研究[D].新疆:新疆农业大学,2015.
- [4] Listrat A, Lebreton B, Louveau I, et al. How muscle structure and composition influence meat and flesh quality[J]. Sci World J, 2016, 2016: 3182746.
- [5] Brooke M H, Kaiser K K. Three "myosin adenosine triphosphatase" systems: the nature of their pH lability and sulfhydryl dependence[J]. J Histochem Cytochem, 1970, 18(9): 670-672.
- [6] Jouffroy F K, Medina M F, Renous S, et al. Immunocytochemical characteristics of elbow, knee and ankle muscles of the five-toed jerboa (*Allactaga elater*)[J]. J Anat, 2003, 202(4): 373-386.
- [7] 谭丹丹,陈洋,柳杭,等.绵羊不同部位肌纤维类型组成及其特性研究[J].中国畜牧杂志,2024,60(12):158-163.
- [8] 李劲.苏尼特羊背最长肌和股二头肌的品质特性分析及肌肉脂肪沉积机制研究[D].呼和浩特:内蒙古农业大学,2024.
- [9] Li J, He B L, He X G, et al. Muscle fiber and meat quality characteristics of longissimus dorsi and biceps femoris in Sunit sheep[J]. Food Sci, 2025, 46(10): 22-30.
- [10] Yang Z H, Cui Z H, Zhang M, et al. Analysis of the effects of hydroxyl radicals on the volatile flavor composition and lipid profile of sheep meat based on HS-SPME-GC-MS and UPLC-MS/MS studies[J]. Food Chem, 2025, 484: 144161.
- [11] 王金兴.日粮中添加茉莉花渣对山羊肉质和风味影响的研究[D].南宁:广西大学,2023.
- [12] 赵建生,王起帆,黄启瑞,等.热反应条件对葡萄糖-游离氨美拉德反应体系中关键中间体的影响[J].食品研究与开发,2025,46(17):10-14,54.
- [13] 陈佳欣,张英杰.羊肉风味的形成及影响因素研究[J].饲料

- 工业, 2020, 41(23): 22-26.
- [14] 张巧娥, 敖长金. 羊肉风味的研究进展 [J]. 动物营养学报, 2006(S1): 367-371.
- [15] 任国栋, 罗海玲. 羊肉风味来源及其测定技术研究进展 [J]. 动物营养学报, 2025, 37(6): 3519-3531.
- [16] 梁蓉, 赵宝, 房义, 等. 羊肉挥发性风味物质形成路径及其调控研究进展 [J]. 动物营养学报, 2024, 36(11): 6872-6881.
- [17] Liu W J, Tang D F, Ao C J. Adding of *Allium mongolicum* regel extracts to lamb feedlot diets influences 4-alkyl-branched fatty acids deposition and the meat quality during storage[J]. Meat Sci, 2022, 193: 108951.
- [18] 冯谦洁, 文璟, 许艳丽, 等. 家畜肌纤维特性的调控因素及其对肉品质的影响研究进展 [J]. 中国畜牧兽医, 2025, 52(3): 1057-1069.
- [19] Henckel P, Oksbjerg N, Erlandsen E, *et al.* Histo- and biochemical characteristics of the Longissimus dorsi muscle in pigs and their relationships to performance and meat quality[J]. Meat Sci, 1997, 47(3/4): 311-321.
- [20] Wang Y F, Zhang D H, Liu Y P. Research progress on the regulating factors of muscle fiber heterogeneity in livestock: A review[J]. Animals (Basel), 2024, 14(15): 2225.
- [21] Matarneh S K, Silva S L, Gerrard D E. New insights in muscle biology that alter meat quality[J]. Annu Rev Anim Biosci, 2021, 9: 355-377.
- [22] Li B J, Li P H, Wu W J, *et al.* Progresses in research of the mechanisms of skeletal muscle fiber formation[J]. Sci Agric Sin, 2014, 47(6): 1200-1207.
- [23] 尹丽卿. 不同饲养方式下苏尼特羊肌纤维特性和 *MyHC* 基因对肉质的影响 [D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2016.
- [24] 廖智. 永昌羊肉品质评价 [D]. 兰州: 兰州大学, 2021.
- [25] 王勇峰, 丰永红, 万红兵, 等. 新疆褐牛不同部位牛肉肌纤维类型及品质差异研究 [J]. 食品工业科技, 2018, 39(6): 19-24, 37.
- [26] 王莉. 牦牛肉肌纤维类型组成及其代谢酶活力差异对宰后肉嫩度的影响 [D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2016.
- [27] 吴少强, 刘雨帆, 韦义荣, 等. 白藜芦醇通过 *PROX1/SIRT1* 信号通路调控山羊肌纤维类型转化的机制研究 [J]. 畜牧兽医学报, 2025, 56(1): 201-212.
- [28] Shackelford S D, Wheeler T L, Koohmaraie M. Effect of the callipyge phenotype and cooking method on tenderness of several major lamb muscles[J]. J Anim Sci, 1997, 75(8): 2100-2105.
- [29] 杜春林, 谭娅, 齐婧, 等. 畜禽肌内脂肪的测定及分子调控机制研究进展 [J]. 中国猪业, 2025, 20(4): 40-49.
- [30] Joo S T, Joo S H, Hwang Y H. The relationships between muscle fiber characteristics, intramuscular fat content, and fatty acid compositions in *M. longissimus lumborum* of Hanwoo Steers[J]. Korean J Food Sci Anim Resour, 2017, 37(5): 780-786.
- [31] 孟金柱, 吴震洋, 安清明, 等. 黔北黑猪肌内脂肪沉积相关基因的筛选 [J]. 浙江大学学报 (农业与生命科学版), 2021, 47(6): 797-804.
- [32] Lefaucheur L. A second look into fiber typing-relation to meat quality[J]. Meat Sci, 2010, 84(2): 257-270.
- [33] Hwang Y H, Ismail I, Joo S T. The relationship between muscle fiber composition and pork taste-traits assessed by electronic tongue system[J]. Korean J Food Sci Anim Resour, 2018, 38(6): 1305-1314.
- [34] Fu Y, Chen Y, Han X W, *et al.* Effects of muscle fiber composition on meat quality, flavor characteristics, and nutritional traits in lamb[J]. Foods, 2025, 14(13): 2309.
- [35] 苏琳, 辛雪, 刘树军, 等. 苏尼特羊肉肌纤维特性与肉质相关性研究 [J]. 食品科学, 2014, 35(7): 7-11.
- [36] 孙伟, 程华平, 马月辉, 等. 湖羊背最长肌组织学特性分析及其与陶赛特羊的初步比较 [J]. 中国畜牧杂志, 2011, 47(11): 12-14, 78.
- [37] Sen A R, Santra A, Karim S A. Carcass yield, composition and meat quality attributes of sheep and goat under semiarid conditions[J]. Meat Sci, 2004, 66(4): 757-763.
- [38] 王穆峰, 郝惠阳. 不同品种、性别羊肉品质差异性分析 [J]. 食品研究与开发, 2024, 45(21): 90-96.
- [39] 苏湘潭, 刘叶青, 张高威, 等. 乌珠穆沁羊肉品质研究进展 [J]. 饲料研究, 2024, 47(11): 165-169.
- [40] Shi X E, Song Z Y, Yang Q M, *et al.* Correlation of forkhead box transcription factor *O1* and myosin heavy chain isoforms in porcine skeletal muscle[J]. Genet Mol Res, 2013, 13(4): 10231-10240.
- [41] Park S, Gunawan A, Scheffler T, *et al.* Myosin heavy chain isoform content and energy metabolism can be uncoupled in pig skeletal muscle[J]. J Anim Sci, 2009, 87(2): 522-531.
- [42] 刘星, 孔园园, 张雪莹, 等. 羊肉品质评价指标及重要候选基因研究进展 [J]. 农业生物技术学报, 2020, 28(10): 1881-1892.
- [43] 王钟毓. 湖羊肌内脂肪沉积的关键基因鉴定及其分子调控机制研究 [D]. 兰州: 兰州大学, 2024.
- [44] 梁鹏, 张稳, 冯登侦, 等. 基于转录组学筛选绵羊肉肉质性状相关候选基因 [J]. 华北农学报, 2022, 37(4): 220-231.
- [45] 谢冰心, 黄艳, 黄合特, 等. 猪肌纤维生长发育及影响因素研究进展 [J]. 饲料研究, 2024, 47(16): 168-171.
- [46] 陈妍, 胡涛, 盛响响, 等. 八眉猪和长白猪背最长肌肌纤维及脂肪细胞的发育性变化 [J]. 基因组学与应用生物学, 2022, 41(5): 981-992.
- [47] 加依娜古丽·吐尔逊拜, 孙亚伟, 闫向民, 等. 不同月龄新疆褐牛和安格斯牛背最长肌肌纤维形态特征比较研究 [J]. 黑龙江畜牧兽医, 2020(11): 63-67, 71, 167.
- [48] Zhang X, Han L J, Hou S Z, *et al.* Effects of different feeding regimes on muscle metabolism and its association with meat quality of Tibetan sheep[J]. Food Chem, 2022, 374: 131611.
- [49] 教力格日玛, 双金, 敖长金. 年龄和育肥对苏尼特羊肝脏组织脂肪酸组成的影响 [J]. 黑龙江畜牧兽医, 2015(7): 17-23.
- [50] 薛丽娜, 周胜花. 羊肉膻味物质的影响因素及候选基因研究进展 [J]. 山西农业科学, 2020, 48(8): 1347-1350.
- [51] 孟宪然, 杜琛, 王静, 等. 基于 RNA-Seq 识别山羊肉质候选基因 [J]. 畜牧兽医学报, 2015, 46(8): 1300-1307.
- [52] Sinclair L A. Nutritional manipulation of the fatty acid composition of sheep meat: a review[J]. J Agric Sci, 2007, 145(5): 419-434.

- [53] Schreurs N M, Lane G A, Tavendale M H, *et al.* Pastoral flavor in meat products from ruminants fed fresh forages and its amelioration by forage condensed tannins[J]. *Anim Feed Sci Technol*, 2008, 146(3): 193-221.
- [54] Hou Y, Su L, Su R, *et al.* Effect of feeding regimen on meat quality, MyHC isoforms, AMPK, and PGC-1 α genes expression in the biceps femoris muscle of Mongolia sheep[J]. *Food Sci Nutr*, 2020, 8(5): 2262-2270.
- [55] 张宁. 日粮添加琥珀酸对滩羊肉品质及肌纤维类型影响的研究[D]. 银川: 宁夏大学, 2023.
- [56] 王震, 马铁伟, 邓凯平, 等. 能量限饲和补偿对湖羊生长性能及相关激素和肉品质的影响[J]. *南京农业大学学报*, 2018, 41(4): 722-729.
- [57] 孙相俞. 不同品种和营养水平对猪肌纤维类型和胴体肉质性状的影响[D]. 成都: 四川农业大学, 2009.
- [58] 胡宇超, 王园, 孟子琪, 等. 发酵麸皮多糖对肉羊肉品质、肌肉氨基酸组成及肌肉抗氧化酶和肌纤维类型相关基因表达的影响[J]. *动物营养学报*, 2020, 32(2): 932-940.
- [59] Long Y, Wu X M, Chen X, *et al.* Effects of dietary allicin supplementation on meat quality, antioxidant enzymes, fiber characteristics, and flavor composition of Guizhou black goats[J]. *Meat Sci*, 2025, 231: 109962.
- [60] 陈亮, 刘建国, 王毅. 中草药添加剂对杜湖杂交 F1 代羔羊肉品质及风味化合物的影响[J]. *畜牧兽医杂志*, 2019, 38(2): 26-29.
- [61] Girard M, Dohme-Meier F, Silacci P, *et al.* Forage legumes rich in condensed tannins may increase n-3 fatty acid levels and sensory quality of lamb meat[J]. *J Agric Food Chem*, 2016, 96(6): 1923-1933.

Research Progress on the Regulatory Mechanisms and Influencing Factors of Muscle Fiber Types on Mutton Quality and Flavor

ZHANG Xiaofei^{1,2}, CHAI Jin², CHEN Mengjie^{1*}, XIONG Qi^{1*}

(1. Hubei Key Laboratory of Animal Embryo Engineering and Molecular Breeding, Institute of Animal Husbandry and Veterinary, Hubei Academy of Agricultural Sciences, Hubei Wuhan 430064, China; 2. Key Laboratory of Agricultural Animal Genetics, Breeding & Reproduction of Ministry of Education, Huazhong Agricultural University, Hubei Wuhan 430070, China)

Abstract: Mutton as an important meat consumer product, it has the advantages of tender and high nutritional value. However, mutton has a unique flavor, which is different from other popular red meat, which is the reason why consumers pay more and more attention to it. Muscle fiber is the basic structure and functional unit of muscle tissue, and its type composition is the core internal factor affecting the quality and flavor of mutton. In recent years, with the in-depth study of mutton flavor, the relationship between muscle fiber types and mutton quality flavor has gradually become a research hotspot. Therefore, this paper begins by outlining the classification of muscle fiber types and the pathways of flavor formation in mutton, with a focus on elucidating the mechanisms by which muscle fiber types influence mutton color, pH, tenderness, juiciness, and the formation of flavor compounds. It further systematically analyzes how factors--such as genotype, age, sex, feeding practices, and dietary nutrition--regulate mutton quality and flavor by modulating muscle fiber type transformation and composition. Finally, we summarize the current research limitations and offers prospects for future research directions, aiming to provide theoretical insights for the genetic improvement and precision production of high-quality mutton.

Keywords: Mutton; Muscle fiber types; Meat; flavor

(责任编辑: 石丽丹)