

不同月龄和部位乌珠穆沁羊AMPK活性与肉品质的关系

薛宝玲¹, 宋晓彬²

(1.内蒙古农业大学职业技术学院, 内蒙古 包头 014109; 2.内蒙古乌兰察布市检验检测中心, 内蒙古 乌兰察布 012000)

摘要:为研究乌珠穆沁羊不同生长阶段、不同骨骼肌一磷酸腺苷激活蛋白激酶(adenosine monophosphate-activated protein kinase, AMPK)活性、糖酵解相关指标和肉质相关指标的内在变化规律,选取3、6、9月龄乌珠穆沁羊背最长肌、股二头肌和腰大肌,分别测定其AMPK活性、肌糖原含量、乳酸含量、己糖激酶(hexokinase, HK)活性、pH值、剪切力和色泽等指标。结果表明:AMPK活性升高时pH_{24h}值、红度值(a^*)明显下降,并呈显著负相关($P<0.05$);剪切力随着月龄增大而降低($P<0.05$),腰大肌黄度值(b^*)最大,背最长肌 b^* 最小,腰大肌 a^* 变化规律与 b^* 相同,股二头肌与背最长肌 a^* 变化规律与 b^* 相反;同一部位肌糖原含量与月龄呈显著正相关($P<0.05$),背最长肌最大,股二头肌最小($P<0.05$),乳酸含量变化规律与肌糖原含量总体相同;HK活性与月龄呈正相关($P<0.05$),腰大肌最大,股二头肌最小($P<0.05$),AMPK活性随着 b^* 、肌糖原总体含量、6月龄与9月龄乳酸和HK活性升高呈现显著上升趋势($P<0.05$);高活性状态的AMPK能够刺激磷酸化过程中糖酵解的关键酶HK、磷酸果糖激酶和丙酮酸激酶,酶活性升高导致pH值下降快、乳酸含量增加,呼吸方式变为无氧呼吸,剪切力增大导致嫩度与熟肉率降低,表明AMPK活性的变化对宰后羊肉糖酵解和肉质有一定的影响。

关键词:乌珠穆沁羊;一磷酸腺苷激活蛋白激酶;糖酵解;肉品质;骨骼肌

Relationship between Adenosine Monophosphate-Activated Protein Kinase (AMPK) Activity and Meat Quality of Three Different Muscles of Ujumqin Sheep Slaughtered at Different Ages

XUE Baoling¹, SONG Xiaobin²

(1.College of Vocational and Technical, Inner Mongolia Agricultural University, Baotou 014109, China;

2.Ulanqab Inspection and Testing Center, Ulanqab 012000, China)

Abstract: This study aimed to investigate the pattern of changes in the activity of adenosine monophosphate-activated protein kinase (AMPK), glycolysis indicators and meat quality of different muscles from Ujumqin sheep during growth. The *Longissimus dorsi*, *Biceps femoris* and *Psoas major* of Ujumqin sheep slaughtered at 3, 6 and 9 months of age were measured for AMPK activity, muscle glycogen content, lactic acid content, hexokinase (HK) activity, pH, shear force and color. The results showed that AMPK activity had a significant negative correlation with pH₂₄ value and redness value (a^*) ($P<0.05$). Shear force significantly decreased with increasing slaughter age ($P<0.05$). The yellowness value (b^*) of *Psoas major* was largest, while that of *Longissimus dorsi* was smallest. For *Psoas major*, the pattern of change in a^* was the same as that of b^* , while the opposite was observed for *Longissimus dorsi* and *Biceps femoris*. A significant positive correlation between muscle glycogen content and slaughter age existed for each of the muscles. Muscle glycogen content was highest in *Psoas major* and lowest in *Biceps femoris*. The pattern of change in lactic acid content was the same as that of muscle glycogen content. A significant positive correlation between HK activity and slaughter age existed for each of the muscles. The HK activity of *Psoas major* was largest, while that of *Biceps femoris* was smallest. AMPK activity significantly increased with increasing b^* and muscle glycogen content, and with increasing lactic acid and HK activity for the slaughter ages of six and nine months ($P<0.05$). High AMPK activity could stimulate the key glycolysis-related enzymes during phosphorylation, HK, phosphofructokinase (PFK) and pyruvate kinase (PK), resulting in a rapid pH decline, an increase in

收稿日期: 2023-02-14

基金项目: 内蒙古自治区高等学校科学技术研究项目(NJZY22552)

第一作者简介: 薛宝玲(1988—)(ORCID: 0000-0002-8877-8639),女,讲师,硕士,研究方向为农产品加工及贮藏工程。

E-mail: xuebaoling880212@163.com

lactic acid content, the transformation of aerobic respiration to anaerobic respiration, an increase in shear force and consequently a decrease in tenderness and cooking yield, indicating that changes in AMPK activity affect postmortem glycolysis and meat quality.

Keywords: Ujumqin sheep; adenosine monophosphate-activated protein kinase; glycolysis; meat quality; skeletal muscle

DOI:10.7506/rlyj1001-8123-20230214-014

中图分类号: TS251.1

文献标志码: A

文章编号: 1001-8123 (2023) 05-0018-06

引文格式:

薛宝玲, 宋晓彬. 不同月龄和部位乌珠穆沁羊AMPK活性与肉品质的关系[J]. 肉类研究, 2023, 37(5): 18-23.

DOI:10.7506/rlyj1001-8123-20230214-014. <http://www.rlyj.net.cn>

XUE Baoling, SONG Xiaobin. Relationship between adenosine monophosphate-activated protein kinase (AMPK) activity and meat quality of three different muscles of Ujumqin sheep slaughtered at different age[J]. Meat Research, 2023, 37(5): 18-23. (in Chinese with English abstract) DOI:10.7506/rlyj1001-8123-20230214-014. <http://www.rlyj.net.cn>

一磷酸腺苷激活蛋白激酶 (adenosine monophosphate-activated protein kinase, AMPK) 是真核生物细胞中存在的能感知能量状态的一种蛋白激酶^[1-2], 通过调节不同物质能量代谢中间环节保持细胞内稳定^[3], 是“细胞能量调节器”^[4]。AMPK被激活后通过形成高能磷酸键的形式提高关键酶活性^[5-6], 并通过协同调节糖酵解过程的关键酶活性, 进而促进细胞能量调节^[7-8], 还可以通过调节参与糖酵解关键酶的相关基因影响酶的活性^[9]。

骨骼肌在无氧条件下pH值的降低与升高、每分钟pH值变化速率和幅度直接对肉的僵直及嫩度等品质有重要影响, 是改变肉品质的主要因素^[10-12]。骨骼肌在无氧条件下产生乳酸会对肌肉的脂肪酸、血红蛋白、酶活性、系水力等指标产生影响^[13-14]。动物宰后肌肉组织中的葡萄糖产生丙酮酸进行糖酵解是导致宰后肌肉pH值下降以及影响肌肉僵直的主要原因^[15], 因此, 宰后骨骼肌丙酮酸产生的程度与糖酵解反应的进行程度直接影响宰后胴体肉品质的相关特性指标。因此, 高活性AMPK能够干涉并调节宰后肌肉组织的糖酵解^[16-17], 故AMPK可以直接影响胴体肉品质。本研究通过采用Underwood等^[18]的方法测定3、6、9月龄宰后乌珠穆沁羊股二头肌、背最长肌与腰大肌的AMPK活性以及测定肌糖原含量、乳酸含量、己糖激酶(hexokinase, HK)活性、pH值等相关指标, 探讨宰后乌珠穆沁羊骨骼肌中AMPK活性、糖酵解相关指标和肉品质之间的相关性, 为研究AMPK改善肉质机理进一步打下坚实的理论基础。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

分别选取3、6、9月龄乌珠穆沁羊为研究对象($n=5$), 取股二头肌、背最长肌和腰大肌, 封装于无菌EP管中, 避免酶活性与肉品质受到影响, 迅速存入液氮罐中进行快速冷冻, $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 专用冰箱中保存, 以供后续检测使用。

绵羊AMPK酶联免疫吸附测定试剂盒 北京百普赛斯生物科技有限公司; 乳酸测定试剂盒 上海酶联生物科技有限公司; HK测定试剂盒 杭州齐誉生物科技有限公司; D-甘露醇 上海同田生物技术股份有限公司; Tris-HCl 上海慧颖生物科技有限公司; 乙二胺四乙酸(ethylene diamine tetraacetic acid, EDTA) 北京鼎国昌盛生物科技有限公司; 乙二醇双四乙酸(ethylenbis tetraacetic acid, EGTA) 上海联硕生物科技有限公司; 二硫苏糖醇(dithiothreitol, DTT) 天津西典化学科技有限公司; NaCl 天津永大化学试剂有限公司; NaF 上海安谱实验科技股份有限公司; 焦磷酸钠 上海恒远生物科技股份有限公司。

1.2 仪器与设备

Varioskan LUX酶联免疫检测分析仪 杭州优米仪器有限公司; TU 1810PC紫外-可见分光光度计 天津诺雷信达科技有限公司; HM21R高速冷冻离心机 盐城市凯特仪器有限公司; pH-10 pH计 季尔国际贸易(上海)有限公司; JY-SMY-2000SF全自动测色色差仪 北京金洋万达科技有限公司; 肉质嫩度仪 北京布拉德科技发展有限公司; MS-H-S磁力搅拌器 信钰仪器(北京)有限公司; ROTINA 380台式离心机 北京汉达森机械技术有限公司; LB-E05050电子天平 苏州卡吉德化学科技有限公司; THZ-82B恒温水浴振荡器 北京水北盛威实验仪器厂; VORTEX-1A快速混匀器 上海希言科学仪器有限公司。

1.3 方法

1.3.1 AMPK活性测定

AMPK提取: $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 条件下取0.8 g去掉结缔与脂肪组织的股二头肌、背最长肌、腰大肌组织样品切碎, 加入 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、2.5 mL匀浆缓冲液, 3 200 r/min匀浆3 min, $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、12 000×g条件下离心8 min, 取上层溶液。

匀浆缓冲液配制: D-甘露醇0.5 mol/L、Tris-HCl (pH 7.4) 0.1 mol/L、EDTA 2 mmol/L、EGTA 2 mmol/L、DTT 2 mmol/L、NaF 100 mmol/L、焦磷酸钠10 mmol/L。

AMPK活性测定：参照绵羊AMPK酶联免疫吸附测定试剂盒方法。加入稀释后的标准品50 μL 于反应孔内盖上膜板，轻轻振荡混匀，37 $^{\circ}\text{C}$ 温育98 min，甩去孔内液体，每孔加满洗涤液，振荡30 s，甩去洗涤液，用吸水纸拍干，重复此操作3次，如果用洗板机洗涤，洗涤次数增加1次；加入50 μL 生物素标记的抗体，37 $^{\circ}\text{C}$ 温育75 min，重复上述操作3次；加入100 μL 亲和链酶素-辣根过氧化物酶复合物工作液，37 $^{\circ}\text{C}$ 温育50 min，重复上述操作6次，立即加入3,3',5,5'-四甲基联苯胺（3,3',5,5'-tetramethylbenzidine, TMB）显色工作液避光反应10 min，加入TMB终止液，35 min内读取OD值，计算AMPK活性。

1.3.2 肌糖原含量测定

取样品80 mg，用0 $^{\circ}\text{C}$ 生理盐水溶液洗掉样品组织中的血液，吸水纸拭干，加入试剂盒所带碱液试剂200 μL ，35 min沸水浴后流水冲洗直至冷却，加入1 000 μL 蒸馏水混合均匀，为肌糖原检测原液，沸水浴12 min，冷却至室温测定OD_{620 nm}，肌糖原含量按式（1）计算。

$$\text{肌糖原含量}/(\text{mg/g}) = \frac{0.007 \times (\text{OD}_{\text{样品}} - \text{OD}_{\text{空白}})}{\text{OD}_{\text{标准}} - \text{OD}_{\text{空白}}} \quad (1)$$

式中：OD_{空白}为只加蒸馏水的测定结果；OD_{标准}为标准品的测定结果；OD_{样品}为样品的测定结果。

1.3.3 乳酸含量测定

取样品3.0 g，用0 $^{\circ}\text{C}$ 生理盐水溶液洗掉样品组织中的血液，吸水纸拭干，加入2.0 mL 0 $^{\circ}\text{C}$ 0.9 g/100 mL NaCl溶液，冰浴3 200 r/min匀浆5 min，取上清液37 $^{\circ}\text{C}$ 水浴8 min，530 nm波长处测定OD_{样品}，乳酸含量按式（2）计算。

$$\text{乳酸含量}/(\mu\text{g/mL}) = \text{OD}_{\text{样品}} \times \text{稀释倍数} \quad (2)$$

1.3.4 HK活性测定

取样品3.0 g，用0 $^{\circ}\text{C}$ 生理盐水溶液洗掉样品组织中的血液，吸水纸拭干，加入2.0 mL 0 $^{\circ}\text{C}$ 0.9 g/100 mL NaCl溶液，冰浴3 200 r/min匀浆5 min，取上清液。工作液于37 $^{\circ}\text{C}$ 恒温预热15 min，加入待测样品混合均匀，反应60 s时于340 nm波长处测定吸光度（ A_1 ），37 $^{\circ}\text{C}$ 水浴3 min，反应5 min时于340 nm波长处测定吸光度（ A_2 ），HK活性按式（3）计算。

$$\text{HK活性}/(\text{U/mL}) = 1\ 113 \times (A_2 - A_1) \quad (3)$$

1.3.5 pH值测定

采用胴体直测式pH计进行pH值测定。采用组织高速分散器在3 500 r/min条件下将所取待测组织样品与蒸馏水按照1:9（ m/V ）匀浆5次，混匀静置25 min测定pH值。

1.3.6 色泽测定

使用全自动测色色差仪测定5 cm $\times$ 5 cm $\times$ 4 cm大

小的肌肉块色泽，结果分别用亮度值（ L^* ）、红度值（ a^* ）和黄度值（ b^* ）表示。

1.3.7 剪切力测定

选取待测肌肉组织样品，切成4 cm $\times$ 5 cm $\times$ 7 cm大小，采用肌肉嫩度仪测定剪切力。将待测肌肉组织样品置于密封袋密封后75 $^{\circ}\text{C}$ 水浴锅中煮制40 min，取出后室温冷却，顺着肌肉组织纤维方向将样品修成大小为1.5 cm $\times$ 2 cm $\times$ 2.5 cm的肉块进行测定。

1.3.8 熟肉率测定

称取35~55 g去掉结缔与脂肪组织的待测样品，置于75 $^{\circ}\text{C}$ 恒温水浴锅中煮制55 min后冷却至室温30 min，称其质量，熟肉率按式（4）计算^[19]。

$$\text{熟肉率}/\% = \frac{\text{肉样煮后质量}/\text{g}}{\text{肉样煮前质量}/\text{g}} \times 100 \quad (4)$$

1.4 数据处理

采用MATLAB及SAS14.0数据分析软件进行统计分析。实验结果表示为平均值 $\pm$ 标准差，方差实验采用PROC ANOVA进行分析，多重比较实验采用Duncan's进行分析，相关性分析采用PROC CORR程序进行数据分析。

2 结果与分析

2.1 不同月龄和部位乌珠穆沁羊肉AMPK活性

表1 不同月龄和部位乌珠穆沁羊肉AMPK活性（ $n=5$ ）
Table 1 AMPK activity of three different muscles of Ujumqin sheep slaughtered at different ages ($n=5$)

U/L			
月龄	股二头肌	背最长肌	腰大肌
3	3.274 $\pm$ 0.603 ^{aA}	4.867 $\pm$ 0.988 ^{bA}	5.041 $\pm$ 1.538 ^{bA}
6	8.571 $\pm$ 0.463 ^{aB}	10.963 $\pm$ 2.781 ^{bB}	11.338 $\pm$ 1.349 ^{bB}
9	10.458 $\pm$ 0.402 ^{aC}	12.101 $\pm$ 2.452 ^{bC}	11.465 $\pm$ 1.461 ^{bB}

注：同列大写字母不同，表示同一部位、不同月龄差异显著（ $P<0.05$ ）；同行小写字母不同，表示同一月龄、不同部位差异显著（ $P<0.05$ ）。表2~5同。

由表1可知，不同月龄乌珠穆沁羊肉间AMPK活性差异显著（ $P<0.05$ ），且9月龄 $>$ 6月龄 $>$ 3月龄，不同部位AMPK活性不同，9月龄时，背最长肌 $>$ 腰大肌 $>$ 股二头肌，与相关研究^[20-22]表明宰后10 min，24月龄老鼠心肌AMPK- $\alpha 2$ 活性显著高于5月龄及24月龄AMPK- $\alpha 1$ 基础活性显著大于5月龄的结论相符。宰后随着年龄增加乌珠穆沁羊肉AMPK活性呈现增加趋势，9月龄时，背最长肌AMPK活性大于腰大肌，且显著大于股二头肌，表明其糖酵解速度较快。不同月龄之间和同一月龄、不同部位之间AMPK活性大小不同，导致不同月龄和部位间肉品质有所差异。

2.2 不同月龄和部位乌珠穆沁羊肉糖酵解指标测定结果

表2 不同月龄和部位乌珠穆沁羊肉糖酵解指标 ($n=5$)Table 2 Glycolysis indicators of three different muscles of Ujumqin sheep slaughtered at different ages ($n=5$)

指标	月龄	股二头肌	背最长肌	腰大肌
肌糖原含量/ (mg/g)	3	2.924±1.537 ^{aA}	5.012±2.133 ^{bA}	4.483±1.212 ^c
	6	5.076±2.648 ^{aB}	9.134±2.247 ^{bB}	6.761±2.309 ^{aB}
	9	8.023±2.711 ^{aC}	11.276±2.988 ^{bC}	9.022±1.567 ^{cC}
乳酸含量/ (μg/mL)	3	1.145±0.348 ^{aA}	1.549±0.346 ^{bA}	1.381±0.441 ^{aA}
	6	1.879±0.506 ^{aB}	2.076±0.889 ^{bB}	2.121±0.387 ^{aB}
	9	2.084±0.623 ^{aC}	2.603±1.102 ^{bC}	2.673±0.435 ^{bC}
HK活力/ (U/mL)	3	22.658±9.015 ^{aA}	42.737±9.318 ^{bA}	48.161±15.677 ^{aA}
	6	35.375±9.661 ^{aB}	45.615±13.956 ^{bB}	49.601±14.987 ^{aB}
	9	39.016±9.974 ^{aC}	48.923±15.518 ^{bC}	49.976±14.335 ^{bB}
初始pH	3	5.289±0.230 ^{aA}	6.217±0.135 ^{bA}	6.474±0.182 ^{bA}
	6	6.016±0.247 ^{aB}	7.003±0.354 ^{bB}	6.596±0.343 ^{bB}
	9	6.569±0.329 ^{aC}	7.564±0.367 ^{bC}	6.621±0.445 ^{bB}
pH _{24h}	3	6.413±0.146 ^{aA}	6.571±0.203 ^{aA}	6.337±0.105 ^{aA}
	6	6.158±0.193 ^{aB}	6.036±0.254 ^{bB}	6.112±0.913 ^{bB}
	9	5.890±0.224 ^{aC}	5.486±0.277 ^{bC}	5.902±0.771 ^{bC}

由表2可知：同一部位3~9月龄乌珠穆沁羊肉肌糖原含量随着月龄的增加呈现上升趋势，且9月龄>6月龄>3月龄 ($P<0.05$)，不同部位肌糖原含量背最长肌最大，其次为腰大肌，股二头肌含量最低 ($P<0.05$)；乳酸含量为背最长肌>腰大肌>股二头肌，同一部位、不同月龄为9月龄>6月龄>3月龄；HK活性为腰大肌>背最长肌>股二头肌 ($P<0.05$)，不同月龄间9月龄>6月龄>3月龄。表明宰后乌珠穆沁羊肉肌糖原、乳酸含量与HK活性总体呈现随着月龄增加而增加的趋势，股二头肌低于其他部位。

股二头肌、背最长肌及腰大肌pH值下降幅度有所不同，表明糖酵解速率和程度不同，且背最长肌pH值下降幅度最大，其次为股二头肌，腰大肌pH值下降幅度最小。3~9月龄之间以及股二头肌、背最长肌、腰大肌宰后肌肉糖酵解有差异。随着月龄增大，肌糖原含量增加，胴体乳酸的蓄积量增高和pH值大幅度下降可能是宰后肌糖原含量升高所导致^[23-25]。乌珠穆沁羊宰前应激反应会影响胴体内糖酵解的各项指标，动物在宰前受到强烈的应激反应，肌糖原分解随之增多，乳酸含量升高。

2.3 不同月龄和部位乌珠穆沁羊肉肉质指标测定结果

表3 不同月龄和部位乌珠穆沁羊肉剪切力 ($n=5$)Table 3 Shear force of three different muscles of Ujumqin sheep slaughtered at different ages ($n=5$)

月龄	股二头肌	背最长肌	腰大肌
3	55.875±7.869 ^{aA}	52.474±7.423 ^{bA}	46.130±5.114 ^{cA}
6	48.263±6.304 ^{aB}	35.756±5.146 ^{bB}	28.412±4.005 ^{cB}
9	40.411±6.018 ^{aC}	23.134±3.290 ^{bC}	14.519±3.773 ^{cC}

由表3可知，股二头肌剪切力最大，腰大肌最小 ($P<0.05$)，同一部位、不同月龄间剪切力随着月龄增加呈现下降趋势，3月龄达最大，9月龄最小 ($P<0.05$)。由于骨骼肌肌肉组织及结缔组织含量不同导致乌珠穆沁羊股二头肌、背最长肌和腰大肌剪切力及肉质嫩度不同，股二头肌结缔组织含量大于背最长肌和腰大肌，并且动物宰后冷却过程中不同骨骼肌受到的拉伸力有所不同，背最长肌和腰大肌较股二头肌受到的拉伸力大，故肉质较嫩，腰大肌嫩度最佳，此外由于乌珠穆沁羊屠宰后胴体温度降低，导致受到的拉伸力有所改变，也会导致肉的嫩度不同。总体来看，由于肌肉脂肪不断沉积，改善了肉的嫩度，剪切力随月龄的增加而减小。

表4 不同月龄和部位乌珠穆沁羊肉色泽 ($n=5$)Table 4 Color parameters of three different muscles of Ujumqin sheep slaughtered at different ages ($n=5$)

指标	月龄	股二头肌	背最长肌	腰大肌
L^*	3	23.475±2.834 ^{aA}	27.524±3.323 ^{bA}	32.135±3.197 ^{aA}
	6	25.016±2.217 ^{aB}	23.451±2.885 ^{bB}	26.946±2.531 ^{aB}
	9	26.992±2.309 ^{aB}	20.236±2.317 ^{bC}	21.728±1.872 ^{bC}
a^*	3	20.471±2.105 ^{aA}	13.448±1.728 ^{bA}	14.156±1.525 ^{bA}
	6	12.361±1.836 ^{aB}	11.225±1.510 ^{aB}	16.112±1.893 ^{bB}
	9	8.840±1.194 ^{aC}	8.983±1.377 ^{aC}	17.843±1.974 ^{bB}
b^*	3	2.747±0.882 ^{aA}	2.876±1.657 ^{aA}	2.914±1.183 ^{aA}
	6	3.901±1.156 ^{aB}	3.613±1.789 ^{aB}	5.280±1.836 ^{bB}
	9	5.042±1.137 ^{aC}	4.925±1.410 ^{aC}	7.542±2.034 ^{bC}

由表4可知：不同部位间腰大肌 b^* 达到最大值，其次为股二头肌，背最长肌 b^* 最小，同一部位随着月龄增加总体呈现上升趋势，9月龄达到最大值，3月龄为最小值 ($P<0.05$)；腰大肌 a^* 变化规律与 b^* 相同，股二头肌与背最长肌 a^* 变化规律与 b^* 相反，同一部位3月龄达到最大值，其次为6月龄，9月龄为最小值 ($P<0.05$)；不同部位间腰大肌 L^* 达到最大值，股二头肌最小，股二头肌 L^* 随着月龄增加呈现增加趋势，9月龄达到最大值，6月龄其次，3月龄为最小值 ($P<0.05$)，其余部位呈现下降趋势。

表5 不同月龄和部位乌珠穆沁羊肉熟肉率 ($n=5$)Table 5 Cooking yield of three different muscles of Ujumqin sheep slaughtered at different ages ($n=5$)

月龄	股二头肌	背最长肌	腰大肌
3	63.586±1.723 ^{aA}	67.635±2.212 ^{bA}	72.246±2.086 ^{aA}
6	77.127±1.106 ^{aB}	73.562±1.774 ^{aB}	76.835±1.420 ^{aB}
9	82.693±1.289 ^{aC}	80.125±1.206 ^{bC}	81.839±1.061 ^{bC}

由表5可知，同一部位熟肉率随着月龄增加呈现上升趋势，在9月龄达到最大值 ($P<0.05$)，不同部位间，3月龄为腰大肌>背最长肌>股二头肌 ($P<0.05$)，6~9月龄为股二头肌>腰大肌>背最长肌。衡量乌珠穆

沁羊骨骼肌保水性能的指标之一就是熟肉率，熟肉率与肉的保水性能呈正相关。

不同月龄、不同骨骼肌之间的肉品质有差异^[26-27]，剪切力随着年龄的增大而减小，剪切力大，骨骼肌的嫩度差，熟肉率降低。由于随着月龄增加肌肉脂肪组织与结缔组织进行沉积，直接影响了肉的嫩度^[28-29]。不同部位骨骼肌剪切力有所不同，表明腰大肌与背最长肌肌纤维较细，股二头肌肌纤维较粗^[30]，直接导致肉品质的差异。

2.4 不同月龄和部位乌珠穆沁羊肉AMPK活性与糖酵解和肉质各项指标的相关性分析

表6 不同月龄和部位乌珠穆沁羊肉AMPK活性与糖酵解指标和肉质指标的相关性分析

Table 6 Correlation analysis of AMPK activity with glycolysis indicators and meat quality indicators

指标	3月龄	6月龄	9月龄
初始pH	0.301	0.131	0.123
pH _{24h}	-0.265	-0.454*	-0.241
肌糖原含量	0.569*	-0.021	-0.020
乳酸含量	-0.568	0.021	0.019
HK活性	0.363	0.690*	0.664
L*	-0.366	-0.015	-0.012
a*	-0.012	-0.400*	-0.361
b*	0.664*	0.101	0.097
剪切力	-0.002	-0.154	-0.140

注：*，显著相关（ $P<0.05$ ）；**，极显著相关（ $P<0.01$ ）。

由表6可知，总体来看，AMPK活性随着pH_{24h}值、 a^* 升高呈现显著下降趋势（ $P<0.05$ ），随着 b^* 、肌糖原总体含量、6月龄与9月龄乳酸含量和HK活性升高呈现显著上升趋势（ $P<0.05$ ）。

3 结论

乌珠穆沁羊宰后不同部位骨骼肌AMPK活性和糖酵解指标在不同生长阶段呈现不同变化特征；AMPK可以调节糖酵解进程，从而影响宰后肉品质，AMPK活性增强是导致磷酸化糖酵解的关键酶HK、磷酸果糖激酶和丙酮酸激酶活性增高的关键因素；AMPK活性升高时，pH值、 a^* 下降快、乳酸蓄积多，肌糖原含量与HK活性升高进而促进糖酵解。3月龄与9月龄相比，月龄越小，AMPK活性相对越高，肌糖原含量越高，HK活性越高；同一月龄背最长肌、股二头肌及腰大肌之间，背最长肌AMPK活性最高，糖酵解速率最快，腰大肌次之，股二头肌糖酵解速率最慢。宰后HK活性变化趋势与AMPK活性变化趋势相一致。当pH值下降到最低点时剪切力达到最大值，嫩度与熟肉率最小。AMPK活性与糖酵解各项指标和肉质指标具有显著相关性，表明AMPK和糖酵解的不同可能导致了肉品质的差异，乌珠穆沁羊宰后呼吸方式变为无氧呼吸，从而激活了AMPK，通过影响糖酵

解关键酶活性相关基因进而影响糖酵解进程，导致肉品质的差异性。本研究为进一步研究调控AMPK活性改善宰后肌肉品质及机理提供了参考。

参考文献：

- [1] 沈文清, 何标, 丁树哲. AMPK: 运动调控骨骼肌糖脂代谢的重要激酶[J]. 生命科学, 2022, 34(6): 631-643. DOI:10.13376/j.cbls/2022073.
- [2] KLEIN J D, KHANNA I, PILLARISSETTI S, et al. An AMPK activator as a therapeutic option for congenital nephrogenic diabetes insipidus[J]. JCI Insight, 2021, 6(8): 146-148. DOI:10.1172/jci.insight.146419.
- [3] 王德宝, 郭天龙, 王莉梅, 等. 不同屠宰方式对宰后蒙古羊羊肉AMPK活性、糖酵解及羊肉品质的影响[C]//中国畜牧兽医学动物福利与健康养殖分会第四次全国学术研讨会论文集. 2020: 631-643. DOI:10.26914/c.cnkihy.2020.062056.
- [4] 赵永才, 高炳宏. 急性运动及激活剂激活AMPK的特征对比[C]//第十一届全国体育科学大会论文摘要汇编. 2019: 7632-7633. DOI:10.26914/c.cnkihy.2019.032457.
- [5] 王柏辉, 韩利伟, 王德宝. 绒山羊宰后成熟过程中羊肉品质和风味的变化分析[J]. 食品工业科技, 2020, 41(8): 230-235. DOI:10.13386/j.issn1002-0306.2020.08.036.
- [6] 肖雄, 张德权, 李铮, 等. 宰后僵直和解僵过程羊肉风味品质分析[J]. 现代食品科技, 2019, 35(6): 287-294. DOI:10.13982/j.mfst.1673-9078.2019.6.038.
- [7] ANURAJ T, SUKUMARAN, ALEXANDER J. et al. Technological characteristics of pre- and post-rigor deboned beef mixtures from Holstein steers and quality attributes of cooked beef sausage[J]. Meat Science, 2018, 145(6): 71-78. DOI:10.1016/j.meatsci.2018.06.001.
- [8] KIM M K, KIM S H, YU H S, et al. The effect of clozapine on the AMPK-ACC-CPT1 pathway in the rat frontal cortex[J]. Neuropsychopharmacol, 2012, 15(7): 907-917. DOI:10.1017/S1461145711000976.
- [9] 藏磊, 马纪兵, 韩玲, 等. 活性氧对宰后牦牛肉成熟过程中腺苷一磷酸活化蛋白激酶通路、糖酵解及肉品质的影响[J]. 食品与发酵工业, 2020, 46(12): 44-50. DOI:10.13995/j.cnki.11-1802/TS.022584.
- [10] 金亚东, 杨万宗, 吴爽, 等. 饲料精料比例对羊屠宰性能和肉品质的影响及其作用机理[J]. 动物营养学报, 2019, 31(10): 4450-4457. DOI:10.3969/j.issn.1006-267X.2019.10.006.
- [11] 李文博. 饲养方式对苏尼特羊宰后肌原纤维蛋白与肉品质的影响[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2021: 24-26. DOI:10.27229/d.cnki.gnmnu.2020.000423.
- [12] 窦露, 罗玉龙, 孙雪峰, 等. 苏尼特羊、巴美肉羊和乌拉特山羊的肉品质和挥发性风味物质比较[J]. 食品工业科技, 2020, 41(15): 8-14. DOI:10.13386/j.issn1002-0306.2020.15.002.
- [13] 王恒鹏, 吴鹏, 陈胜姝, 等. 排酸时间与熟制程度对牛肉挥发性风味物质的影响[J]. 食品与机械, 2018, 34(12): 16-21. DOI:10.13652/j.issn.1003-5788.2018.12.003.
- [14] 程佳佳, 胡胜杰, 马汉军, 等. 成熟时间和斩拌时间对低盐牛肉丸品质的影响[J]. 肉类研究, 2018, 32(5): 9-14. DOI:10.7506/rlyj1001-8123-201805001.
- [15] 袁倩. 饲养方式对苏尼特羊AMPK途径脂肪代谢和肉品质的影响及机理研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2018: 32-33.
- [16] 李衡, 付尚辰, 肖宇. 4个糖酵解途径基因的siRNA干扰及其在肌肉卫星细胞中的沉默效应[J]. 陕西师范大学学报(自然科学版), 2022, 50(5): 90-98. DOI:10.15983/j.cnki.jsnu.2022022.



- [17] 郭谦, 沈清武, 罗洁. 畜禽宰后肌肉能量代谢与肉品质研究进展[J]. 食品工业科技, 2020, 41(9): 357-361. DOI:10.13386/j.issn1002-0306.2020.09.057.
- [18] UNDERWOOD K R, MEEANS W J, ZHU M J. AMP-activated protein kinase is negatively associated with intramuscular fat content in *Longissimus dorsi* muscle of beef cattle[J]. Meat Science, 2008, 79(2): 394-402. DOI:10.1016/j.meatsci.2007.10.025.
- [19] 杨媛媛, 李敬, 赵青余, 等. 猪肌肉糖原酵解潜力的影响因素及其营养调控研究进展[J]. 中国畜牧杂志, 2019, 55(11): 8-15. DOI:10.19556/j.0258-7033.20190331-04.
- [20] MORENO I, LIPOVA P, LADERO L, et al. Glycogen and lactate contents, pH and meat quality and gene expression in muscle *Longissimus dorsi* from Iberian pigs under different rearing conditions[J]. Livestock Science, 2020(12): 33-36. DOI:10.1016/j.livsci.2020.104167.
- [21] 库勒米拉·克兰拜, 高丽, 哈尔阿力·沙布尔. 全株青贮玉米对小尾寒羊生长性能和肉品质的影响[J]. 养殖与饲料, 2022, 21(8): 8-15. DOI:10.13300/j.cnki.cn42-1648/s.2022.08.001.
- [22] 陈若楠, 胡波, 杨朝永, 等. 不同饲养方式对科宝鸡肌纤维发育、肉品质及屠宰性能的影响[J]. 中国家禽, 2022, 44(7): 77-83. DOI:10.16372/j.issn.1004-6364.2022.07.013.
- [23] 白玛央珍, 赵满达, 次顿珠, 等. 养殖模式对霍尔巴羊屠宰性能和肉品质影响的研究[J]. 中国饲料, 2022(12): 26-29. DOI:10.15906/j.cnki.cn11-2975/s.20221207.
- [24] 李乔, 马纪兵, 余群力, 等. NO-AMPK通路对牛肉宰后成熟过程中蛋白特性与肉品质的影响[J]. 核农学报, 2022, 36(7): 1413-1424. DOI:10.11869/j.issn.100-8551.2022.07.1413.
- [25] 高永芳. CaCl₂处理对不同海拔高度牛肉宰后成熟过程中AMPK活性、能量代谢及肉质影响的研究[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2020: 42-43. DOI:10.27025/d.cnki.ggsnu.2020.000186.
- [26] 高永芳, 宫玉霞, 杨雅媛, 等. AMPK活性对宰后牛肉糖酵解、肌肉内环境及品质的影响[J]. 食品科学, 2019, 40(17): 45-52. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20180923-249.
- [27] 王梓凡, 塔娜, 张晓庆, 等. 不同草原类型对乌珠穆沁羔羊生产性能和肉品质的影响[J]. 中国草地学报, 2022, 44(3): 91-97. DOI:10.16742/j.zgdx.20210126.
- [28] 孙国虎, 牛小莹, 白雅琴, 等. 不同绵羊品种杂交羔羊肉品质分析与嫩度基因mRNA表达验证[J]. 甘肃畜牧兽医, 2022, 52(1): 43-47. DOI:10.15979/j.cnki.cn62-1064/s.2022.01.012.
- [29] 李旺平, 王建军, 严秉莲, 等. 不同品种杂交肉羊生产性能和肉品质的比较[J]. 中国畜牧杂志, 2019, 55(5): 118-123. DOI:10.19556/j.0258-7033.2019-05-118.
- [30] 郭谦, 沈清武, 罗洁. 畜禽宰后肌肉能量代谢与肉品质研究进展[J]. 食品工业科技, 2020, 41(9): 357-361. DOI:10.13386/j.issn1002-0306.2020.09.057.