

周华倩, 陈岩, 张文喆, 等. 军垦肉羊不同毛色皮肤组织形态学及羊毛细度的差异研究 [J]. 畜牧与兽医, 2026, 58 (8): 9–16.

ZHOU H J, CHEN Y, ZHANG W Z, et al. Study on the differences in skin morphology and wool fineness of Junken meat sheep with different coat colors [J].

Animal Husbandry & Veterinary Medicine, 2026, 58 (8): 9–16.

军垦肉羊不同毛色皮肤组织形态学及羊毛细度的差异研究

周华倩^{1,2}, 陈岩², 张文喆², 余乾², 程瑞琦^{1,2}, 杨永林², 赵宗胜^{1*}, 杨华^{1,2*}

(1. 石河子大学动物科技学院, 新疆 石河子 832000;

2. 新疆农垦科学院省部共建绵羊遗传改良与健康养殖国家重点实验室, 新疆 石河子 832000)

摘要: 旨在探究肉羊毛色形成与羊毛黑色素含量、氨基酸含量以及羊毛细度的相关性。以 3 只体躯白色、头和四肢黑色及 6 只全身黑色的军垦肉羊为试验动物, 通过皮肤组织切片、HE 染色和显微镜观察对比分析黑色素颗粒的沉积, 液相色谱-质谱法检测羊毛中 16 种氨基酸含量, 乌贼黑比色法定量分析羊毛中黑色素含量, 光学显微成像和计算机图像处理技术测定断奶羔羊的羊毛细度, 分析毛色与皮肤黑色素颗粒沉积、羊毛氨基酸含量、黑色素含量和细度的相关性。结果: 黑色素颗粒主要存在于皮肤的毛囊和毛干部位, 黑色被毛皮肤中黑色素颗粒极显著多于白色被毛皮肤 ($P<0.01$); 羊毛中天冬氨酸等 16 种氨基酸含量差异不显著 ($P>0.05$); 不同个体体躯黑色的羊毛中伪黑色素含量极显著高于体躯白色个体 ($P<0.01$), 同一个体头部黑色羊毛的真黑色素含量显著 ($P<0.05$)、伪黑色素含量极显著 ($P<0.01$) 高于体躯白色羊毛, 毛色发育性变化的同一个体的体躯黑色羊毛中总黑色素、真黑色素和伪黑色素含量极显著高于体躯变为白色的羊毛 ($P<0.01$); 体躯羊毛为黑色和白色的纤维直径、细度标准差和细度离散系数差异不显著 ($P>0.05$)。结论: 黑色素颗粒沉积、真黑色素含量、伪黑色素含量与军垦肉羊黑色被毛形成有关, 总黑色素含量与毛色的发育性变化有关。

关键词: 军垦肉羊; 毛色; 黑色素; 氨基酸含量; 组织形态学

中图分类号: S826.8 文献标志码: A 文章编号: 0529-5130(2026)08-0009-08

Study on the differences in skin morphology and wool fineness of Junken meat sheep with different coat colors

ZHOU Huaqian^{1,2}, CHEN Yan², ZHANG Wenzhe², YU Qian², CHENG Ruiqi^{1,2},
YANG Yonglin², ZHAO Zongsheng^{1*}, YANG Hua^{1,2*}

(1. College of Animal Science and Technology, Shihezi University, Shihezi 832000, China;

2. State Key Laboratory of Sheep Genetic Improvement and Healthy Production, Xinjiang Academy of Agricultural and Reclamation Science, Shihezi 832000, China)

Abstract: To explore the correlation between coat color formation and wool melanin content, amino acid content as well as fiber diameter, Junken meat sheep with distinct coat color phenotypes were selected as experimental animals, including 3 sheep with white body hair and black head and limb hair, and 6 sheep with entirely black body hair. Skin tissue sections from the sheep were prepared and stained with HE staining, followed by microscopic observation to compare and analyze the deposition of melanin granules. The contents of 16 amino acids in wool were determined via liquid chromatography-mass spectrometry. The melanin content in wool was quantitatively analyzed using the squid ink colorimetric method. Moreover, the fiber diameter of the weaned lambs was measured by optical microscopy combined with computer image processing technology. On this basis, the correlations between coat color and skin melanin granule deposition, wool amino acid content, melanin content as well as fiber diameter were systematically analyzed. The results showed that melanin granules were mainly distributed in the hair follicles and hair shaft regions of the skin, and the number of melanin granules in the skin of the black-haired parts was significantly higher than that in the white-haired parts ($P<0.01$). However, there was no significant difference in the contents of 16 amino acids (including aspartic acid) in the wool among different coat color groups ($P>0.05$). The content of pheomelanin in the wool of the individuals with

收稿日期: 2025-10-24; 修回日期: 2026-05-27

基金项目: 国家自然科学基金项目 (32360818); 新疆维吾尔自治区“天山英才”培养计划项目 (2022TSYCCX0122); 新疆维吾尔自治区肉毛兼用绒毛用羊品种选育提升计划项目 (2025XJRM-03)

第一作者: 周华倩, 女, 博士研究生

* 通信作者: 赵宗胜, 博士, 教授, 研究方向为动物遗传育种与繁殖, E-mail: 2944138946@qq.com; 杨华, 博士, 研究员, 研究方向为动物遗传育种与繁殖, E-mail: yhxjcn@sina.com。

black body hair was significantly higher than those with white body hair ($P<0.05$). For the same individual, the eumelanin content and pheomelanin content in the black wool from the head were significantly higher than those in the white wool from the body side ($P<0.05$ or $P<0.01$). In individuals with developmental coat color change, the contents of total melanin, eumelanin and pheomelanin in the original black body wool were extremely significantly higher than those in the subsequently whitened body wool ($P<0.01$). However, there were no significant differences in fiber diameter, standard deviation and coefficient of variation between the individuals with black body wool and those with white body wool ($P>0.05$). In conclusion, the differences deposition of melanin granules and elevated contents of eumelanin and pheomelanin were associated with the formation of the black coat color in the sheep. Total melanin content was closely related to the developmental changes of coat color.

Keywords: Junken meat sheep; wool color; melanin content; amino acid content; histomorphology

家养动物的毛色是人们高度关注的经济表型性状,也是动物品种的重要特征之一,不同品种的毛色特征可以作为品种鉴定的重要依据^[1]。毛色也被广泛用于评判动物品种的纯度、遗传的稳定性和亲缘关系的远近,在整套培育体系中用来确定亲本的杂交组合的复杂性^[2]。毛色不仅仅是动物适应性进化的结果,同时还在躲避天敌、捕食、求偶以及抵御紫外线、体温调节和信息交流等多个方面发挥重要作用^[3],为动物生产中的品质改良提供科学依据。

毛色差异形成的原因是由体内黑色素决定的,黑色素是由黑色素细胞的黑素体合成并累积,当黑色素合成积累到一定程度后,黑素体被转移至黑色素细胞周围的角质形成细胞的细胞核周围,以保护细胞核免受紫外线辐射及其他不利因素的影响^[4]。通常哺乳动物成年个体的毛色相对稳定,不会出现明显的变化,但也有特例,随着真黑素/褐黑素的含量变化,其毛色能够随着季节而变化^[3]。黑色素细胞分布及黑色素合成相关酶的表达量差异是同种动物形成不同毛色表型的基础。黑色素一般在皮肤表皮、眼睛、大脑的黑质和毛囊中沉积,是由神经嵴细胞迁移到表皮基底层和毛囊并分化而来^[5-6]。Guo 等^[7]通过对波尔山羊、美姑山羊、南江黄羊、藏山羊、金堂黑山羊和西藏绒山羊的毛色、高海拔适应以及生长繁殖进行分析,发现黑色素细胞的分化和迁移可以调控黑色素的生成,有助于西藏绒山羊抵御青藏高原强烈的紫外线辐射。家畜物种在不同的地点和历史时期被驯化,但与它们的野生祖先相比,家畜表现出性情更加温顺、繁殖能力增强、性成熟提前等一些共同特征,人工选择在其中发挥了重要作用^[8]。人工选择作用也使得毛色表现出高度多态性,例如驴的毛色包括栗色、黑色、白色等,猪的毛色有两头乌、六白、黑斑等^[9],绵羊的毛色有白色、黑色、灰色、棕色、褐色、黄褐色等^[10],马的毛色有黑色、栗色、骝毛、奶酪色、珍珠色、白斑等^[11],牛的毛色有黑白花、白色斑点、黄色等^[12]。目前,大多数研究主要集中在毛色形成基因的筛选,针对毛色与毛品质、黑色素含量、氨基酸含量等多表型性状的相关性研究报道较少。

军垦肉羊是新疆农垦科学院等单位联合培育的具有产肉性能突出、繁殖力高、适应性强的肉用绵羊新品种,2025 年 7 月通过国家畜禽遗传资源委员会的审定。该品种被毛颜色特点为头和四肢为黑褐色,体躯为白色。军垦肉羊有 22.81% 的羔羊出生时全身黑色,且黑色羔羊在 179 日龄以后体躯毛色由黑色逐渐变成白色,而头和四肢的颜色为褐色。因此,本研究以军垦肉羊为研究对象,通过测定分析不同毛色个体、同一个体不同毛色部位以及发育性毛色变化的皮肤组织中黑色素颗粒沉着、黑色素含量、羊毛细度、氨基酸含量等表型性状的差异,为阐明动物毛色变化导致的表型性状差异,深入解析毛色变化的分子机制以及新品种培育提供理论基础。

1 材料与方法

1.1 试验动物及设计

选取新疆农垦科学院种羊场全身黑色被毛的军垦肉羊 5 日龄内初生羔羊 6 只,以及头和四肢为黑色、体躯白色的 5 日龄内初生羔羊 3 只,分别采集羔羊体侧中部和额头部位羊毛和皮肤组织样品,其中观察 3 只全身黑色被毛的羔羊体侧毛色变化情况,待绵羊在 179 日龄体侧黑色被毛变为白色后同样方法采集羊毛和皮肤样品,用于发育性变化观察和分析。皮肤组织(1.5 cm×1.5 cm)保存于 4% 多聚甲醛固定液中,用于组织形态学分析。每只羊采集羊毛 30 g,羊毛洗净后自然晾干,放于阴凉干燥处保存,用于羊毛黑色素含量、氨基酸含量及细度测定。

1.2 主要试剂及仪器

HE 染色试剂盒和 4% 多聚甲醛固定液均购自北京索莱宝科技有限公司,黑色素标准品和氢碘酸(HI)购自德国 Sigma 公司,无水乙醇、二甲苯、中性树脂、NaOH、PBS、氯仿、乙醚均购自天津市富宇精细化工有限公司。真空干燥箱(GZX-9140MBE)购自上海博讯实业有限公司,组织包埋机(EG1150H)和组织切片机(RM2235)均购自德国徕卡仪器有限公司,液相色谱仪(1260)购自安捷伦科技有限公司,CU-4 羊毛细度分析仪(CU-4)

购自北京和众视野科技有限公司。

1.3 羊毛纤维直径、细度标准差和细度离散系数的测定

采集的羊毛样品用哈氏切片器制作羊毛纤维横截面试样,通过 CU-4 羊毛细度分析仪测量羊毛纤维直径、细度标准差和细度离散系数。

1.4 皮肤组织形态学观察

皮肤组织的 HE 染色根据参考文献 [13] 进行操作。具体步骤:皮肤组织放入生理盐水清洗,放入 4%多聚甲醛固定液中浸泡 2 d,剪刀修整后用自来水清洗 2 h,梯度酒精 (70%、80%、95%、100%) 脱水,二甲苯透明 2 次 (每次 10 min),浸蜡 2 次后放入石蜡包埋机中包埋组织块,待蜡块凝固后在切片机上切片,水浴锅中展片、贴片和烘烤,二甲苯 (2 次)、梯度酒精 (100%、80%、70%) 脱蜡,自来水清洗 3 次,去离子水清洗 10 min,根据 HE 染色试剂盒步骤进行染色并用中性树脂-二甲苯混合液封片。显微镜观察毛囊结构和黑色素沉积情况,使用 ImageJ 软件,根据阳性黑色素面积占组织总面积的百分比,统计每张图片中的黑色素沉积量。

1.5 羊毛中氨基酸含量检测

羊毛样品中氨基酸含量的测定根据参考文献 [14] 进行操作。具体步骤:称取 50 mg 羊毛于 50 mL 水解管中,按 1:1 加入 20 mL HCL,110 ℃ 水解 22~24 h,取出冷却后转移至 25 mL 比色管中定容,准确取 100 μ L 羊毛溶解样品于 15 mL 离心管中,放入真空干燥箱中 60 ℃ 干燥 2 h,烘干溶剂,离心管中充氮,准确加入 50 μ L 衍生试剂 (乙醇:异硫氰酸苯酯:水:三乙胺=7:1:1:1),常温下衍生 30 min,加入流动相 A 定容到 0.5 mL,混匀,过 0.45 μ m 有机膜上机。色谱柱设置为 C18 SHISEIDO (4.6 mm $\times$ 250 mm $\times$ 5 μ m),进样量为 10 μ L,柱温保持 40 ℃,波长为 254 nm,流动相 A:0.1 mol/L 无水乙酸钠+乙腈=97%+3%,混匀后调 pH 值至 6.5,流动相 B:乙腈+水=80%+20%。根据水解氨基酸含量公式计算氨基酸含量。

1.6 羊毛中黑色素含量检测

羊毛样品中黑色素含量检测根据乌贼黑色素碱溶比色法步骤进行,分别测定羊毛中总黑色素 (TM)、真黑色素 (EM) 和伪黑色素 (PM) 的含量。

TM 含量测定:羊毛放入中性洗涤剂中洗涤后烘干,天平称取 30 mg 置于 15 mL 离心管中。向每个样品中加入 3 mL 1 mol/L NaOH,85 ℃ 下孵育 4 h。取 3 mg 乌贼黑色素于 3 mL 双蒸水中,在 37 ℃ 超声波

中作用 5 min。以 3 mL 1 mol/L NaOH 作为参比液,在 400 nm 波长下重复测量 3 次样品的吸光度 (OD_{400}) 值。

EM 含量测定:羊毛洗涤后烘干,天平称取 30 mg 置于 15 mL 离心管中。向每个样品中添加 3 mL 的 30%碘化氢 (HI),80 ℃ 下孵育 2 h。冷却后加入 3 mL 50%乙醇,2 500 r/min 离心 10 min 后取沉淀。在沉淀中加入 3 mL 1 mol/L NaOH 溶液,80 ℃ 恒温水浴锅反应 4 h 使样品完全溶解。10 000 r/min 离心 10 min 后取上清液。在 350 nm 波长下重复测量 3 次样品的吸光度 (OD_{350}) 值。

PM 含量测定:天平称取 30 mg 洗干净并烘干的羊毛,放在 15 mL 离心管。加入 3 mL 0.1 mol/L PBS (pH=10.5),剧烈混合后室温下孵育 10 min。10 000 r/min 离心 10 min,取上清液。在上清液中加入 2 mL 氯仿,振荡均匀,4 000 r/min 离心 10 min,取出黄色上清液。将黄色上清液在 10 000 r/min 离心 10 min 后,取上清液。在 400 nm 波长下重复测量 3 次样品的吸光度 (OD_{400}) 值。

将同一条件下测得的样品 OD 值与乌贼黑色素标准液 OD 值进行比较,即为样品中的 TM、EM 或 PM 含量。计算公式:

$$c = \frac{ad}{b},$$

式中 a 为乌贼黑色素标准液浓度, $a=1$ mg/mL; b 为乌贼黑色素标准液对应 OD 值; c 为待测样品中黑色素含量 (mg/mL); d 为待测样品 OD 值。

1.7 数据统计与分析

试验数据使用 JMP v16.0 软件的单因素方差分析和 t 检验方法进行分析,以“平均数 $\pm$ 标准差”表示, $P<0.05$ 表示有统计学差异。

2 结果与分析

2.1 不同毛色的绵羊羊毛细度测定

同一个体初生羔羊头部黑色、体侧白色的羊毛细度测定发现,头部黑色羊毛的纤维直径、细度标准差和细度离散系数与体侧白色的羊毛差异不显著 ($P>0.05$)。不同个体初生羔羊体侧黑色和白色的羊毛细度测定发现,羊毛的纤维直径、细度标准差和细度离散系数均差异不显著 ($P>0.05$)。同一个体 179 日龄绵羊体侧部毛色由黑色变为白色的羊毛细度测定发现,羊毛的纤维直径、细度标准差和细度离散系数均未发生显著变化 ($P>0.05$) (表 1)。

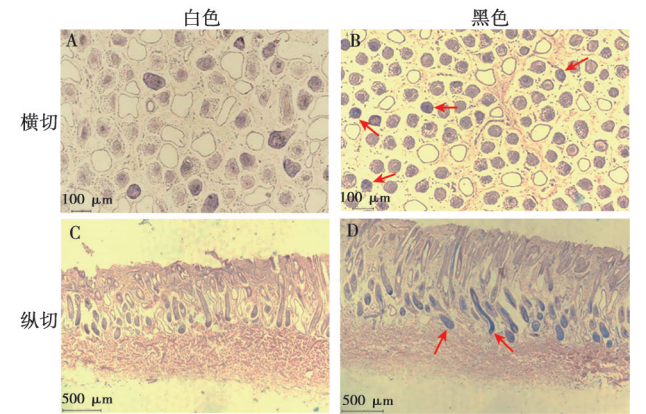
表 1 不同毛色的绵羊羊毛细度测定 (n=3)

指标	初生阶段			发育性变化	
	头部黑色	体侧白色	体侧黑色	变色前黑色	变色后白色
纤维直径/ μm	23.13 $\pm$ 4.51	18.37 $\pm$ 0.48	17.46 $\pm$ 0.66	23.02 $\pm$ 1.83	23.52 $\pm$ 1.19
细度标准差	8.70 $\pm$ 3.72	4.99 $\pm$ 0.46	3.51 $\pm$ 0.67	5.22 $\pm$ 0.65	5.08 $\pm$ 0.47
细度离散系数/%	37.08 $\pm$ 2.84 ^a	24.48 $\pm$ 2.66 ^{ab}	20.08 $\pm$ 3.17 ^b	23.75 $\pm$ 2.45	21.60 $\pm$ 1.81

注：同一日龄，同行数据肩标不同大写字母表示差异极显著 ($P<0.01$)，不同小写字母表示差异显著 ($P<0.05$)。下同。

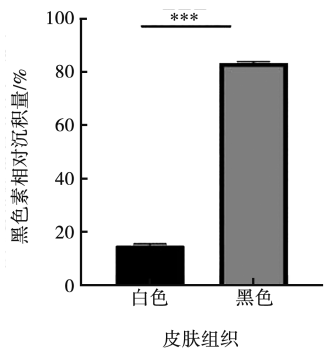
2.2 不同毛色的绵羊皮肤组织形态学观察

针对不同个体初生羔羊的体侧白色和黑色被毛皮肤组织的形态学观察 (图 1)，发现黑色被毛皮肤组织较白色有明显的黑色素颗粒沉积，且黑色素颗粒主要存在于毛囊和毛干周围 (图 1B, 1D)，白色被毛皮肤见少量黑色素颗粒沉积 (图 1A, 1C)。由图 2 可知，体侧黑色被毛皮肤组织中黑色素沉积量极显著高于白色的 ($P<0.001$)。



箭头指示为黑色素所在位置。下同。

图 1 不同个体初生羔羊体侧白色和黑色被毛的皮肤组织 HE 染色观察



*** 表示 $P<0.001$ 。下同。

图 2 不同个体初生羔羊体侧白色和黑色被毛的皮肤组织黑色素沉积量差异 (n=3)

肤组织形态学观察 (图 3)，发现头部黑色被毛皮肤组织含有较多黑色素颗粒，且黑色素颗粒主要存在于毛囊及其周围 (图 3B, 3D)，而体侧白色被毛皮肤组织有少量黑色素颗粒沉积 (图 3A, 3C)。由图 4 可见，同一个体的头部黑色被毛皮肤组织中黑色素沉积量极显著高于体侧白色的 ($P<0.001$)。

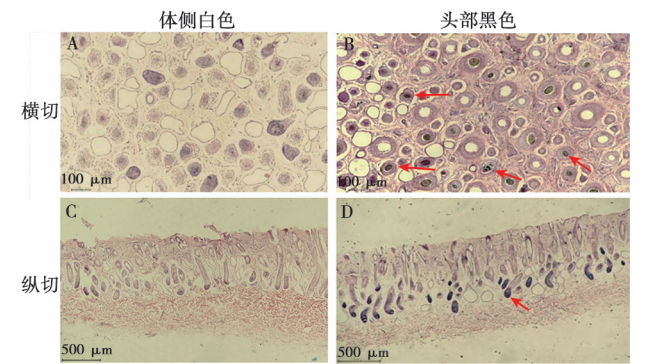


图 3 同一个体初生羔羊体侧白色与头部黑色被毛的皮肤组织 HE 染色观察

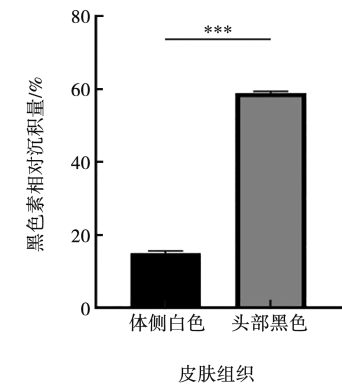


图 4 同一个体初生羔羊体侧白色与头部黑色被毛的皮肤组织黑色素沉积量差异 (n=3)

对同一个体 179 日龄绵羊体侧部毛色由黑色变为白色的皮肤组织进行形态学观察 (图 5)，发现变为白色被毛的皮肤组织见少量黑色素颗粒沉积 (图 5A, 5C)。由图 6 可见，179 日龄绵羊体侧部变为白色被毛的皮肤组织黑色素沉积量呈现发育性极显著下降 ($P<0.001$)。

同一个体初生羔羊头部黑色、体侧白色被毛的皮

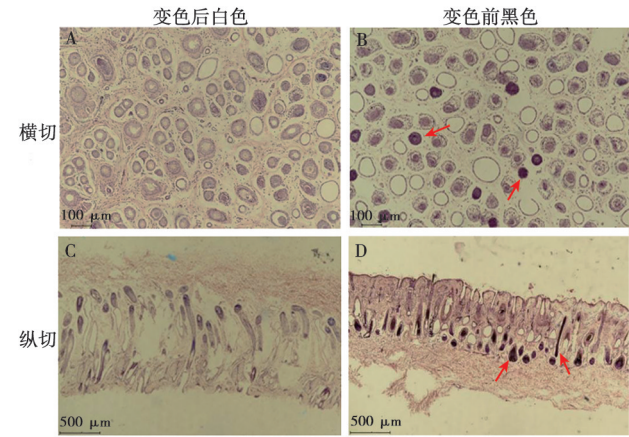


图 5 发育性毛色变化的 179 日龄绵羊体侧部皮肤组织 HE 染色观察

2.3 不同毛色的绵羊羊毛中氨基酸含量的测定

由表 2 可见，同一只初生羔羊头部黑色、体侧白色的羊毛中，天冬氨酸等 16 种氨基酸含量差异不显

著 ($P>0.05$)。不同初生羔羊体侧黑色和白色羊毛的氨基酸含量差异不显著 ($P>0.05$)。同一个体 179 日龄绵羊体侧部毛色由黑色变为白色的羊毛中，氨基酸含量未发生显著变化 ($P>0.05$)。

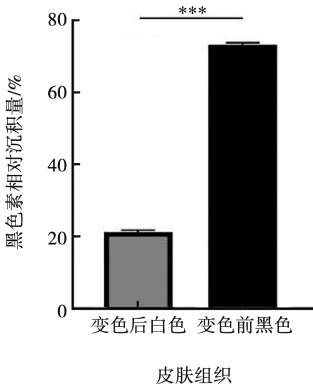


图 6 发育性毛色变化的 179 日龄绵羊体侧部皮肤组织黑色素沉积量差异 ($n=3$)

表 2 不同毛色的绵羊羊毛氨基酸含量测定 ($n=3$) g/kg

氨基酸	初生阶段			发育性变化	
	头部黑色	体侧白色	体侧黑色	变色前黑色	变色后白色
天冬氨酸	39.27±5.13	28.88±5.92	21.01±5.92	34.75±4.58	27.25±5.92
谷氨酸	107.77±10.44	76.06±12.05	73.95±12.05	97.36±9.33	86.25±12.05
丝氨酸	62.12±6.08	47.66±7.02	46.14±7.02	53.14±5.43	44.69±7.01
甘氨酸	36.10±3.05	32.31±3.52	32.24±3.52	39.46±2.72	35.04±3.51
组氨酸	8.56±0.71	7.51±0.82	7.05±0.82	7.69±0.63	6.71±0.81
精氨酸	77.47±7.74	58.47±8.94	58.99±8.94	67.58±6.92	61.52±8.9
苏氨酸	42.78±3.72	34.44±4.29	31.82±4.28	37.84±3.32	32.03±4.28
丙氨酸	32.65±3.07	26.93±3.54	27.52±3.54	30.27±2.74	27.20±3.54
脯氨酸	59.88±5.54	47.79±6.79	46.01±6.39	50.99±4.95	43.13±6.39
酪氨酸	28.16±2.73	28.59±3.14	24.18±3.15	35.17±2.43	30.93±3.14
缬氨酸	44.08±3.86	33.84±4.46	34.43±4.46	38.80±3.45	33.31±4.46
蛋氨酸	6.51±0.83	6.83±0.96	5.16±0.96	6.84±0.74	6.46±0.96
异亮氨酸	28.06±2.45	21.23±2.83	22.39±2.83	25.01±2.19	21.36±2.83
亮氨酸	64.06±6.02	47.74±6.95	51.29±6.95	58.25±5.38	49.99±6.95
苯丙氨酸	24.63±2.27	20.77±2.62	21.52±2.62	26.17±2.03	23.16±2.62
赖氨酸	27.99±2.66	22.63±3.07	22.25±3.07	24.92±2.38	23.79±3.07
胱氨酸	-	-	-	-	-

注：-表示含量极低，未检测到。

2.4 不同毛色的绵羊羊毛中黑色素含量的测定

由表 3 可见，同一只初生羔羊头部黑色、体侧白色的羊毛中黑色素含量测定发现，TM 含量差异不显著 ($P>0.05$)，头部黑色的羊毛黑色素含量高于体侧白色的；头部黑色羊毛的 EM 含量显著 ($P<0.05$)、PM 含量极显著 ($P<0.01$) 高于体侧白色羊毛。不同个体初生羔羊体侧黑色和白色的羊毛中，TM 含量

差异不显著 ($P>0.05$)；体测黑色羊毛的 PM 含量极显著高于体侧白色的羊毛 ($P<0.01$)。同一个体 179 日龄绵羊体侧部毛色由黑色变为白色的羊毛中，TM、EM 和 PM 含量均差异极显著 ($P<0.01$)，变色前黑色被毛黑色素含量高，变色后白色被毛黑色素含量低。

表 3 不同毛色的绵羊羊毛黑色素含量测定 ($n=3$) mg/mL

黑色素种类	初生阶段			发育性变化	
	头部黑色	体侧白色	体侧黑色	变色前黑色	变色后白色
TM	12.59±1.15	11.56±0.59	12.45±0.36	17.26±0.40 ^A	10.72±0.20 ^B
EM	11.79±0.80 ^a	10.37±0.41 ^b	11.29±0.04 ^{ab}	16.04±0.64 ^A	9.65±0.20 ^B
PM	2.45±0.12 ^B	1.35±0.12 ^C	2.88±0.09 ^A	3.62±0.35 ^A	1.41±0.12 ^B

3 讨论

毛色是绵羊重要的经济性状，也是品种特征、评价品种纯度、杂交组合、亲缘关系、产品质量等的参考依据，对于新品种选育至关重要^[15-16]。1837 年，著名捷克生理学家 Purkyne 在脑缘皮质细胞中发现了黑色素颗粒。从此之后，生物病理学、组织酶学、组织化学和生物化学等多种技术开始应用于人类不同组织黑色素含量的检测，黑色素研究得到了快速发展。研究表明，毛色与黑色素的数量、质量和分布状况密切相关，不同毛色对动物的适应性进化具有重要意义，包括自然选择和人工选择。栖息于高海拔地区的藏猪通过黑色的毛发来抵御紫外辐射，能有效避免紫外辐射引起的 DNA 损伤^[17]。在中国家猪品系中，有黑色、白色和黑白花色等，其中较为常见的黑色家猪的毛色被认为是驯化出来的性状^[18]。白色水牛在亚洲国家受到特别的偏爱，主要是由于葬礼文化或宗教的影响。

目前，观察皮肤组织中黑色素含量的方法主要有 HE 染色、甲苯胺蓝染色、银浸染色、多巴染色等，其中 HE 染色是主要的研究方法。任航行等^[13]对西州乌羊和渝东白山羊 100 日龄的胎儿皮肤组织进行形态学分析，发现西州乌羊表皮与真皮组织均含有较多的黑色素颗粒，而渝东白山羊皮肤组织中未检测到明显的黑色素沉积。成年渝东白山羊表皮与真皮组织中含有较少的黑色素颗粒，成年西州乌羊的皮肤基底层存在大量黑色素^[19]。王高富等^[20]用酶解提取法检测西州乌羊皮肤中的黑色素，发现其结构中存在苯环、烷基、羧基、羟基及氨基等官能团，初步判定为具有吲哚结构的 EM。邓雅迪等^[21]对中国美利奴羊皮肤组

织（白色、棕色和黑色）进行 HE 染色，发现黑色素颗粒主要分布于黑色、棕色皮肤组织的毛囊、毛干中。本试验通过 HE 染色法观察军垦肉羊不同生长阶段及部位的黑色和白色被毛下皮肤组织的黑色素分布情况，3 组试验样本包括同一个体不同部位、不同个体同一部位和发育性毛色变化前后的黑色和白色被毛皮肤组织。结果发现，黑色被毛的皮肤组织其黑色素含量明显多于白色，且主要分布在毛囊的基底部和毛干中，白色被毛未见明显的黑色素颗粒沉积，说明黑色素颗粒的沉积与黑色羊毛形成密切相关。

研究表明，羊毛主要由角朊蛋白组成，而角朊蛋白的氨基酸成分、结构和性质对羊毛的品质具有很大的影响，因此检测毛发中的氨基酸种类和含量可以更清晰地阐述毛发品质的差异性。权富生等^[22]通过检测安哥拉山羊与陕北本地山羊杂交后代毛纤维中 17 种氨基酸含量发现，中性氨基酸> 酸性氨基酸> 碱性氨基酸，说明该羊毛具有耐酸而不耐碱的性质。胱氨酸是由 2 个半胱氨酸分子通过二硫键连接而成的氨基酸，且二者可相互转化，在生物体内都有重要的生理功能，半胱氨酸是一种有效的抗氧化剂，可以保护头发免受阳光伤害和其他有害辐射，增强毛发的抗氧化性。王艳萍等^[23]在藏羚羊被毛纤维中氨基酸含量检测发现，粗毛中谷氨酸含量比绒纤维提高将近 33%，但组氨酸和胱氨酸含量仅为绒纤维的 66% 和 16%。目前，关于不同颜色的羊毛中氨基酸种类和含量的差异性研究未见报道，本试验对不同被毛颜色的绵羊毛发中纤维氨基酸种类进行检测，发现黑色羊毛和白色羊毛中 16 种氨基酸含量差异不显著，且未检测出胱氨酸，预示该品种羊毛的抗氧化性是否与胱氨酸含量较低有关。本研究结果与上述报道的安哥拉山羊、陕

北本地山羊和藏羚羊毛发中胱氨酸含量较高的结果不一致。发育性毛色变化的研究结果表明 16 种氨基酸含量随着绵羊日龄的增长而减少,但是羊毛中氨基酸含量与毛色形成不相关。

检测羊毛黑色素的常用方法主要是乌贼黑比色法,通过定量分析毛纤维中 TM、EM 和 PM 的含量^[24]。范瑞文等^[25]通过该方法测定了 22 种自然毛色羊驼毛纤维中黑色素含量,发现在 22 种毛色的毛纤维中 TM 和 PM 呈显著差异,而 EM 差异不显著。刘学玮等^[26]通过同样的方法测定羊驼白色、棕色和黑色毛纤维中的黑色素含量,发现随着毛色的加深其 TM、EM 和 PM 的含量升高。本试验通过乌贼黑比色法检测不同毛色军垦肉羊的羊毛中黑色素含量,发现 EM 和 PM 含量在同一个体头部黑色羊毛显著高于体侧白色羊毛,PM 含量在不同个体中体侧黑色羊毛极显著高于体侧白色羊毛,但 TM 含量差异不显著。TM、EM 和 PM 含量在发育性毛色变化前后存在显著差异性,变色前黑色羊毛的含量极显著高于变色后白色羊毛,与刘学玮等^[26]研究结果一致。结果说明,毛色形成的部位、个体间差异及发育性变化影响 EM、PM 含量,而 TM 含量受毛色的发育性变化影响。

研究证明动物毛色与生产性能有直接的关系,其中与羊毛品质密切相关。羊毛的物理性状研究主要集中在美国美利奴羊,徐从祥等^[27]以中国美利奴羊(新疆军垦型)5 种品系(超细毛、A 品系、B 品系、毛用多胎和肉用多胎)为试验对象,测定羊毛品质的 3 个特性,结果表明超细毛品系羊毛纤维直径最小,其纤维直径、细度标准差和细度离散系数显著低于其他品系。哈尼克孜·吐拉甫等^[28]用同样的方法测定巩乃斯种羊场、南山种羊场、伊犁州畜禽改良总站的中国美利奴羊(新疆型)的羊毛品质,发现巩乃斯种羊场的中国美利奴羊(新疆型)的羊毛纤维直径最小,成年母羊的羊毛纤维直径大于周岁母羊的羊毛纤维直径。本文对不同毛色军垦肉羊羊毛纤维进行纤维直径、细度标准差和细度离散系数检测,发现同一个体头部黑色和体侧白色被毛,不同个体体侧部位黑色和白色被毛以上指标差异不显著。

4 结论

黑色素颗粒与军垦肉羊黑色被毛形成有关,主要存在于毛囊基底和毛干中。EM、PM 含量与毛色形成的部位、个体间差异及发育性变化有关, TM 含量变化只影响毛色的发育性变化,与不同部位及不同个体的毛色无关。羊毛的氨基酸含量、纤维直径、细度标准差和细度离散系数与毛色变化无关。

参考文献:

- [1] 杨广礼. 家养动物的毛色形成与遗传进化机制 [J]. 河南农业科学, 2013, 42 (12): 20-23.
- [2] 张俊珍, 董常生, 范瑞文, 等. 哺乳动物毛色形成研究进展 [J]. 动物医学进展, 2006, 27 (S1): 65-68.
- [3] 章誉兴, 吴宏, 于黎. 哺乳动物毛色调控机制及其适应性进化研究进展 [J]. 遗传, 2021, 43 (2): 118-133.
- [4] 渠国文. TGF- β 1, TGF- β 2 和 TGF- β 3 在不同毛色哈萨克绵羊皮肤中的表达与定位 [D]. 太谷: 山西农业大学, 2020.
- [5] 柴婷, 左晓佳, 赛迪古丽, 等. 不同毛色巴什拜羊皮肤组织中 10 个候选基因表达水平分析 [J]. 中国草食动物科学, 2024, 44 (3): 39-44.
- [6] 陈旭, 刘欣, 邢秀梅. SCF 基因参与哺乳动物肤色和毛色表型形成的研究进展 [J]. 黑龙江畜牧兽医, 2024 (2): 28-32, 42.
- [7] GUO J, TAO H, LI P, et al. Whole-genome sequencing reveals selection signatures associated with important traits in six goat breeds [J]. Sci Rep, 2018, 8: 10405.
- [8] WANG C, LI H, GUO Y, et al. Donkey genomes provide new insights into domestication and selection for coat color [J]. Nat Commun, 2020, 11: 6014.
- [9] 张建, 陈伟, 王慧, 等. 猪毛色遗传机制的研究进展 [J]. 猪业科学, 2013, 30 (1): 100-103.
- [10] 孙晓燕, 付琳, 陈灿灿, 等. 绵羊毛色相关基因 MC1R 和 ASIP 的研究进展 [J]. 黑龙江畜牧兽医, 2019 (17): 41-44.
- [11] 赵若阳, 赵一萍, 李蓓, 等. 马毛色遗传机理研究进展 [J]. 遗传, 2018, 40 (5): 357-368.
- [12] LIANG D, ZHAO P, SI J, et al. Genomic analysis revealed a convergent evolution of LINE-1 in coat color: a case study in water buffaloes (*Bubalus bubalis*) [J]. Mol Biol Evol, 2021, 38 (3): 1122-1136.
- [13] 任航行, 王高富, 陆健, 等. 不同肤色山羊皮肤组织形态学及黑色素生成相关基因的表达分析 [J]. 畜牧兽医学报, 2015, 46 (9): 1525-1531.
- [14] 黄小兰, 何旭峰, 杨勤, 等. 不同产地地参中 17 种氨基酸的测定与分析 [J]. 食品科学, 2021, 42 (2): 255-261.
- [15] ZEHAVID, SCHAYEK H, JACOB-HIRSCH J, et al. MiR-377 targets E2F3 and alters the NF- κ B signaling pathway through MAP3K7 in malignant melanoma [J]. Mol Cancer, 2015, 14: 68.
- [16] 勿都巴拉, 吴铁成, 李玉荣, 等. 家畜毛色形成分子基础及应用研究进展 [J]. 中国畜牧兽医, 2019, 46 (9): 2665-2675.
- [17] LI M, TIAN S, JIN L, et al. Genomic analyses identify distinct patterns of selection in domesticated pigs and Tibetan wild boars [J]. Nat Genet, 2013, 45 (12): 1431-1438.
- [18] WANG C, WANG H, ZHANG Y, et al. Genome-wide analysis reveals artificial selection on coat colour and reproductive traits in Chinese domestic pigs [J]. Mol Ecol Resour, 2015, 15 (2): 414-424.
- [19] 赵金红, 任航行, 刘良佳, 等. 两种肤色山羊黑色素形态学研究 [J]. 畜禽业, 2021, 32 (2): 15-16.
- [20] 王高富, 蒋婧, 付琳, 等. 西州乌羊皮肤黑色素含量和结构分

析 [J]. 黑龙江畜牧兽医, 2019 (20): 35-38.

[21] 邓雅迪, 张雪梅, 王旭光. 不同毛色 ASIP 基因编辑中国美利奴细毛羊皮肤组织中黑色素分布及 ASIP 蛋白的表达定位 [J]. 黑龙江畜牧兽医, 2024 (1): 17-22.

[22] 权富生, 杨蔼云, 张永平. 安哥拉山羊与其杂交后代毛纤维氨基酸分析研究 [J]. 西北农业学报, 1997, 6 (3): 20-23.

[23] 王艳萍, 曾维斌, 张力, 等. 藏羚羊被毛纤维氨基酸含量的分析研究 [J]. 中国畜牧兽医, 2008, 35 (10): 149-151.

[24] 余刚, 司小花, 沈思军, 等. 不同毛色中国美利奴羊毛纤维细度与黑色素含量分析 [J]. 草食家畜, 2019 (5): 16-21.

[25] 范瑞文, 杨姗姗, 白俊明, 等. 羊驼毛纤维中黑色素含量的相关性研究 [J]. 中国农学通报, 2013, 29 (14): 7-10.

[26] 刘学玮, 黄昀巍, 迟志端, 等. 不同毛色羊驼皮肤中 *Agouti* 和 *PMEL* 基因表达与毛纤维中黑色素含量的相关性研究 [J]. 家畜生态学报, 2023, 44 (9): 6-11.

[27] 徐从祥, 杨华, 廖和荣, 等. 中国美利奴羊 (新疆军垦型) 品系间毛细度分析 [J]. 家畜生态学报, 2011, 32 (3): 14-17.

[28] 哈尼克孜·吐拉甫, 李彦飞, 田可川, 等. 中国美利奴羊 (新疆型) 羊毛纤维直径与变异分析 [J]. 中国草食动物科学, 2013, 33 (1): 78-80.

• 信息 •

