

DOI: 10.14188/j.ajsh.20250818001

粗、细型绒山羊绒毛细度的血浆代谢组学差异

魏建玮¹, 马桂霞¹, 韩迪², 全治国³, 王春强¹, 马巍^{1*}

- (1. 锦州医科大学畜牧兽医学院, 辽宁 锦州 121001;
2. 辽宁省现代农业生产基地建设工程中心, 辽宁 沈阳 110032;
3. 辽宁省辽宁绒山羊原种场有限公司, 辽宁 辽阳 111000)

摘要:通过测定粗、细绒山羊绒毛的细度、长度、观察皮肤毛囊的组织学差异并结合血浆的代谢组学分析, 探讨影响绒毛细度的重要代谢物及相关通路, 为绒山羊的分子选育提供一定的思路。对同一场区两个非近交家系(粗型、细型)的400只18月龄辽宁绒山羊母羊的绒毛细度、绒毛长度进行测定。依据绒毛细度的测定结果, 在两个群体中尽量选择各性状指标基本一致的绒山羊个体作为研究对象共12只, I组(粗型)和II组(细型)各6只。对两组绒山羊的皮肤毛囊进行组织学观察, 测定毛囊比值和次级毛囊密度。采集两组绒山羊血液样本进行代谢组学分析。结果显示, 粗、细型绒山羊的平均绒毛细度差异显著($P < 0.05$), 平均绒毛长度差异不显著($P > 0.05$); 次级毛囊密度、毛囊比没有差异($P > 0.05$); 血浆代谢组学分析发现已知的差异代谢物有25个, 其中9个上调, 16个下调; 褪黑激素、 α -生育酚及氨基酸等脂代谢及能量代谢物存在显著性差异($P < 0.05$)。25个已知差异代谢物分别富集于6条代谢通路, 其中褪黑素、L-赖氨酸出现于多条通路。结果表明, 褪黑激素、 α -生育酚及氨基酸等脂代谢及能量代谢物存在显著性差异, 是影响绒毛细度的潜在标志物。

关键词: 绒山羊; 绒毛细度; 血液; 代谢组学

中图分类号: S827

文献标志码: A

文章编号: 2096-3491(2025)06-0621-08

Plasma metabolomics differences in wool fineness between coarse and fine cashmere goats

Wei Jianwei¹, Ma Guixia¹, Han Di², Quan Zhiguo³, Wang Chunqiang¹, Ma Wei^{1*}

- (1. College of Animal Science and Veterinary Medicine, Jinzhou Medical University, Jinzhou 121001, Liaoning, China;
2. Liaoning Provincial Modern Agricultural Production Base Construction Engineering Center, Shenyang 110032, Liaoning, China;
3. Liaoning Cashmere Goat Original Breeding Farm Co., Ltd., Liaoyang 111000, Liaoning, China)

Abstract: To investigate key metabolites and pathways influencing cashmere fineness through comprehensive analysis of wool traits, skin histology, and plasma metabolomics in cashmere goats, wool fineness and length were measured in 400 eighteen-month-old female Liaoning cashmere goats from two non-inbred families (coarse- and fine-type). 12 individuals with consistent traits (6 per group) were selected for detailed study. Histological examination was used to determine secondary-to-primary follicle ratio and secondary follicle density. Plasma metabolomics analysis was performed using LC-MS. Significant difference in fiber diameter ($P < 0.05$) was observed between groups, while fiber length, secondary follicle density and secondary-to-primary follicle ratio showed no significant differences ($P > 0.05$). Plasma metabolomics analysis identified 25 known differential metabolites (9 upregulated, 16 downregulated), with significant alterations in melatonin, α -tocopherol and amino acids involved in lipid/energy metabolism ($P < 0.05$). These metabolites were en-

收稿日期: 2025-08-18 修回日期: 2025-10-08 接受日期: 2025-12-10

作者简介: 魏建玮(2004-), 硕士生, 研究方向: 畜牧学, E-mail: 2637867458@qq.com

*通信作者: 马巍(1981-), 博士, 教授, 研究方向: 动物科学, E-mail: mwworld@163.com

基金项目: 国家绒毛用羊产业技术体系(CARS-39-10; CARS-39-27); 辽宁省绒山羊养殖标准化示范区建设(SFQ11-14); 辽宁省大学生创新创业项目(S2024101600063)

引用格式: 魏建玮, 马桂霞, 韩迪, 等. 粗、细型绒山羊绒毛细度的血浆代谢组学差异[J]. 生物资源, 2025, 47(6): 621-628.

Wei Jianwei, Ma Guixia, Han Di, et al. Plasma metabolomic differences in wool fineness between coarse and fine cashmere goats[J]. Biotic Resources, 2025, 47(6): 623-631.

riched in six metabolic pathways, with melatonin and L-lysine appearing in multiple pathways. Melatonin, α -tocopherol and amino acids related to lipid and energy metabolism represent potential biomarkers for cashmere fineness regulation.

Key words: cashmere goat; wool fineness; blood; metabolomics

0 引言

辽宁绒山羊是中国优秀的高产山羊品种之一,具有产绒量高、净绒率高、绒纤维长、体型大、遗传性能稳定和改良低产山羊效果显著等特点^[1]。绒山羊皮肤中含有两种毛囊:分别是生长粗毛的初级毛囊和生长绒毛的次级毛囊。羊绒的细度是许多国家评价羊绒质量的重要指标,也是影响羊绒生产的重要因素。中国羊绒分类的国家标准 GB18267—2013 中,将 $15.5 \mu\text{m} < \text{羊绒细度} \leq 16.0 \mu\text{m}$ 和 $16.0 \mu\text{m} < \text{羊绒细度} \leq 18.5 \mu\text{m}$ 分别划分为细型和粗型。因为次级毛囊的生长发育决定着羊绒的产量和品质,所以绒山羊次级毛囊的生长发育机制成为近几年的研究热点。绒山羊毛囊的发育是一系列信号分子、基因、代谢物作用于不同的细胞上,相互调控,促进细胞的增殖,最终形成完整的毛囊结构。因此,这些信号分子及其代谢物对毛囊的发育、羊绒的产量和品质至关重要^[2]。

代谢组学是目前常用的系统生物学技术之一,分为靶向和非靶向代谢组学两种,前者主要使用在定量检测代谢途径中的代谢物,后者主要研究所有代谢物的差异及变化^[3]。在代谢组技术中,气相色谱-质谱因其特异性强、灵敏度高的特点而得到广泛应用^[4-5]。代谢组学技术是以筛查出的差异代谢物为基础,以特定的差异代谢物为目标,对其进行注释,以确定特定的代谢通路^[6]。代谢组学已经广泛应用于生物医学、畜牧学和植物学领域,其研究表明,动物遗传学与生理表型之间存在一定的关联,而这一关联的发现进一步强化了遗传学和基因组学提供的信息^[7]。代谢组是连接基因型和表型的桥梁,能够更准确且直接地反映生命体终端和表型信息^[8]。有研究指出,在代谢组学检测中,血浆是一种相对更好的材料,血浆从血细胞中分离出来的速度比血清从凝血块中分离出来的速度快,而且血浆在凝血过程中受到血细胞释放的代谢物和酶污染的影响较弱^[9]。因此,血浆是更常见的代谢组学检测材料。近年来的研究中,组织学研究技术被广泛用于分析与羊绒质量相关的关键基因和代谢物,以促进优质羊绒的生产^[10]。

绒毛细度对羊绒的质量至关重要。经过多年的选育,辽宁绒山羊的绒产量和品质均有一定程度的提高,但远不能满足市场的需要,仍有较大的提高潜

力。因此,本研究以辽宁绒山羊为研究对象,通过对绒毛细度及长度的测定,依据绒毛细度进行分组。利用血浆代谢组学,在分子水平找出影响绒山羊表皮毛囊发育的因素,筛选出影响绒毛品质的相关代谢物并进行分析。以期为绒山羊的分子标记辅助育种提供基础数据,并为改进绒山羊生产实践提供新思路。

1 材料与方法

1.1 实验动物及设计

实验所用绒山羊由辽宁现代农业生产基地建设中心提供。选取400只18月龄健康且体重相近的辽宁绒山羊母羊(非近交家系)按照中国羊绒分类的标准 GB18267—2013 划分为粗型和细型。统计各组羊只的产绒量、净绒率并测定羊绒样品的细度和长度。依据绒毛细度的测定结果,在两个群体中选择各性状指标基本一致的绒山羊个体12只作为研究对象,Ⅰ组(粗型)和Ⅱ组(细型)各6只。

1.2 样本采集

本研究绒毛样品的采集:在试验羊只的右侧肩胛骨部位选取 $5 \text{ cm} \times 5 \text{ cm}$ 的区域,用剪毛弯剪紧贴皮肤将该区域内绒毛剪下,保持自然状态装入密封袋中并做好标记,用于测定绒毛细度和绒毛长度。

本研究皮肤样品的采集:通过活检穿孔器(直径1 cm)沿肩胛骨上缘采集生长期(9月)皮肤样本。取皮时注意消毒,以免皮样受到污染。用生理盐水对皮肤样品进行清洗,清洗后的样品分两部分进行保存,一部分置于离心管(4%多聚甲醛)内进行皮肤切片的制作,另一部分经液氮速冻, $-80 \text{ }^\circ\text{C}$ 保存备用。

本研究血液样品的采集:在试验羊只颈静脉处采集血液样品,血样置于离心机内离心(15 min, 3 000 r/min)。将抽取出的血浆置于 $-20 \text{ }^\circ\text{C}$ 保存备用。

1.3 绒毛细度、长度测量及皮肤组织形态学观察

1.3.1 绒毛细度、纤维长度测量

取待测样品,清洗处理(3~5次)后自然晾干;实施预调湿处理;1 d后测试绒毛长度。用纤维切样器将羊绒沿其长度方向分成5等份,切去约 $2 \mu\text{m}$ 短纤维试样置于纤维自动散布器中,注明位置;纤维密度约为20%;在标定后的 WYZ-1 型纤维自动测量仪

系统上放置样片,进行绒毛细度检测。

1.3.2 皮肤组织形态学观察

将固定完成后的皮肤组织切面修整整齐,厚度约2 mm,用清水冲洗干净;后进行脱水、包埋、切片、展附及烘干;苏木精-伊红染色法染色后于OLYMPUS BX53成像系统中进行观察分析,包括初级毛囊和次级毛囊的形态及密度观察。

1.4 血浆的代谢组学分析

首先,取25 mg样品置于1.5 mL离心管中,进行提取、涡旋、钢球研磨、冰水浴中超声波处理(4次重复),经离心后,取上清液转移置1.5 mL离心管中,混合少量质量控制样本(control sample, QC);其次,对提取物进行干燥处理,再加入甲氧胺盐试剂,混匀后放入烘箱中孵育;再次,后加入N,O-双(三甲基硅基)三氟乙酰胺BSTFA,在高温下孵育混合物;待平衡至室温后向样本中加脂肪酸甲酯FAMES;最后,随机顺序进行上机检测。利用ChromatOF软件提取质谱数据的峰、基线校正、解卷积及其他分析等^[11]。利用离子色谱图计算出各组分含量和相对丰度值,再结合化学计量学方法确定目标物结构并建立标准曲线。在进行物质的定性工作时,使用LECO-Fiehn Rtx5数据库,包括质谱匹配和保留时间的指数匹配。根据质谱法特点及结果要求,选择合适的方法和参数,完成样品前处理。除去QC样品中检出率低于50%或相对标准偏差RSD>30%的峰值^[12]。在样本数据质量控制之后,使用多元方差MSA统计分析对数据进行分析;*t*检验值的 $P<0.05$,而OPLA-DA模型第一主成分的变量投影重要度(variable importance in the projection, VIP)变量大于1。模型的VIP>1被用作筛选差异丰富代谢物的标准。

1.5 数据分析

绒毛细度、绒毛长度、净绒率及毛囊密度等数据,经整理后,采用“平均数±标准差”表示,结果利用SPSS 25.0软件进行两样本差异显著性分析比较, $P<0.05$ 表示具有统计学意义。

2 结果

2.1 羊绒相关性状的测定

本实验对羊绒样品的细度、纤维长度进行测定并分析,由表1可知,I组(粗型)绒的产绒量与II组(细型)绒的产绒量差异不显著($P>0.05$);I组(粗型)绒的平均细度显著高于II组(细型)($P<0.05$)。两组羊绒样品的平均长度差异不显著($P>0.05$)。

2.2 皮肤毛囊的组织学观察

苏木精-伊红染色法用于检测粗细型绒山羊羊绒生长期毛囊的组织学差异。如图1所示,皮肤组织纵切和横切的组织切片均显示,在生长期粗细型绒山羊的初级毛囊和次级毛囊均具有完整的毛囊结构。如图1(a)所示,皮肤组织纵切切片显示,初级毛囊和次级毛囊结构均清晰,初级毛囊的毛囊深度明显大于次级毛囊。如图1(b)所示,皮肤组织横切切片显示,次级毛囊为同心圆柱样结构组成,由外到内依次为结缔组织鞘、外跟鞘、内跟鞘、皮质部。图1(c)和(d)为两种类型绒山羊的皮肤组织横切切片,无论哪种类型,初级毛囊均呈线状排列,次级毛囊均围绕初级毛囊,呈散状排列;从形态组成上二者无差异。结合表2分析发现,两种类型绒山羊的平均次级毛囊密度分别为38.24个/mm²和39.03个/mm²,差异不显著($P>0.05$);毛囊比分别为17.07和18.32,差异不显著($P>0.05$)。

2.3 粗细型绒山羊血浆代谢组学差异分析

2.3.1 OPLS-DA分析与检验

OPLS-DA模型分析显示,样本全部处于95%置信区间内,见图2(a)。不同比较组血浆的分离情况较为明显,且各组呈现良好的聚合;采用置换检验的方法,横坐标代表置换检验的置换保留度,纵坐标分别显示 R^2Y 和 Q^2 的数值,虚线分别表示 R^2Y 和 Q^2 的回归关系。原模型 R^2Y 均接近1,说明建立的模型符合样本数据的真实情况,原模型具有良好的稳健性,不存在过度拟合现象,见图2(b)。

2.3.2 粗细型绒山羊血浆差异代谢物分析

本研究利用多元变量统计分析方法对数据进行

表1 羊绒相关性状测定结果

Table 1 Test results of related traits of cashmere

群体	样本量/个	产绒量/g	纤维长度/cm	羊绒细度/ μm	直径最大/ μm	直径最小/ μm
I组	200	735.00±49.80	9.57±0.85	17.57±0.56 ^a	19.82	16.33
II组	200	683.00±50.30	9.86±1.23	15.42±0.37 ^b	16.23	14.04

注:同列数据肩标不同小写字母表示差异显著($P<0.05$),无字母表示差异不显著($P>0.05$)。

Note: Different lowercase letters of the shoulder label in the same column indicate significant difference ($P<0.05$), while no letters indicate no significant difference ($P>0.05$).

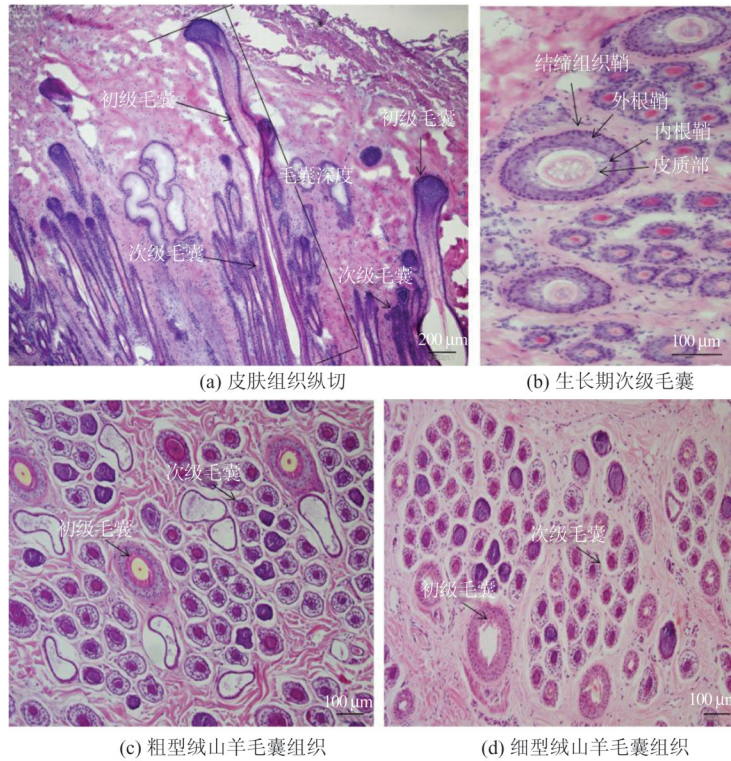


图1 皮肤毛囊组织学观察
Figure 1 Histological observation of skin hair follicles

表2 两种类型绒山羊次级毛囊性征分析

Table 2 Analysis of secondary hair follicle sex characteristics of two types of cashmere goats

类型	数量	毛囊密度/(个数·mm ⁻²)	毛囊比值
I组	10	38.24±4.06	17.07
II组	10	39.03±3.21	18.32

分析, $P < 0.05$, 同时 OPLA-DA 模型第一主成分的 VIP > 1 为标准, 进行差异代谢物的筛选。

结果表明: 粗细型绒山羊血浆中共产生 385 个代谢物, 其中有 38 个差异代谢物, 13 个上调, 25 个下

调, 如图 3(a) 所示。已知的差异代谢物有 25 个, 9 个上调包括赖氨酸、磷酸盐、 α -生育酚、来苏糖和褪黑素等, 16 个下调包括 2-羟基丁酸、延胡索酸、莽草酸、哌啶酸、N-甲基-L-谷氨酸、D-葡萄糖庚糖、甘露醇、N-氨甲酰谷氨酸、氨氧乙酸和天竺葵酸等。部分筛选结果见表 3, 代谢物在不同样本中的表达模型差异如图 3(b) 所示。

2.3.3 差异代谢物 KEGG 通路富集分析

血浆中 25 个已知差异代谢物分别富集于 6 条代谢途径, 分别是 (见表 7) ABC 转运蛋白、赖氨酸降

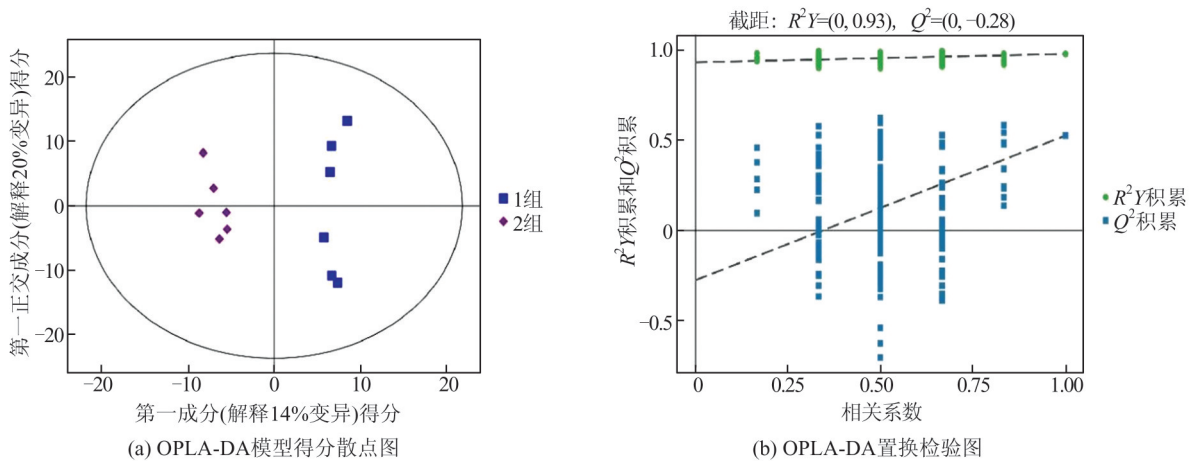


图2 粗、细型绒山羊血浆代谢组 OPLS-DA 分析检验

Figure 2 Analysis of OPLS-DA in plasma metabolome of coarse and fine cashmere goats

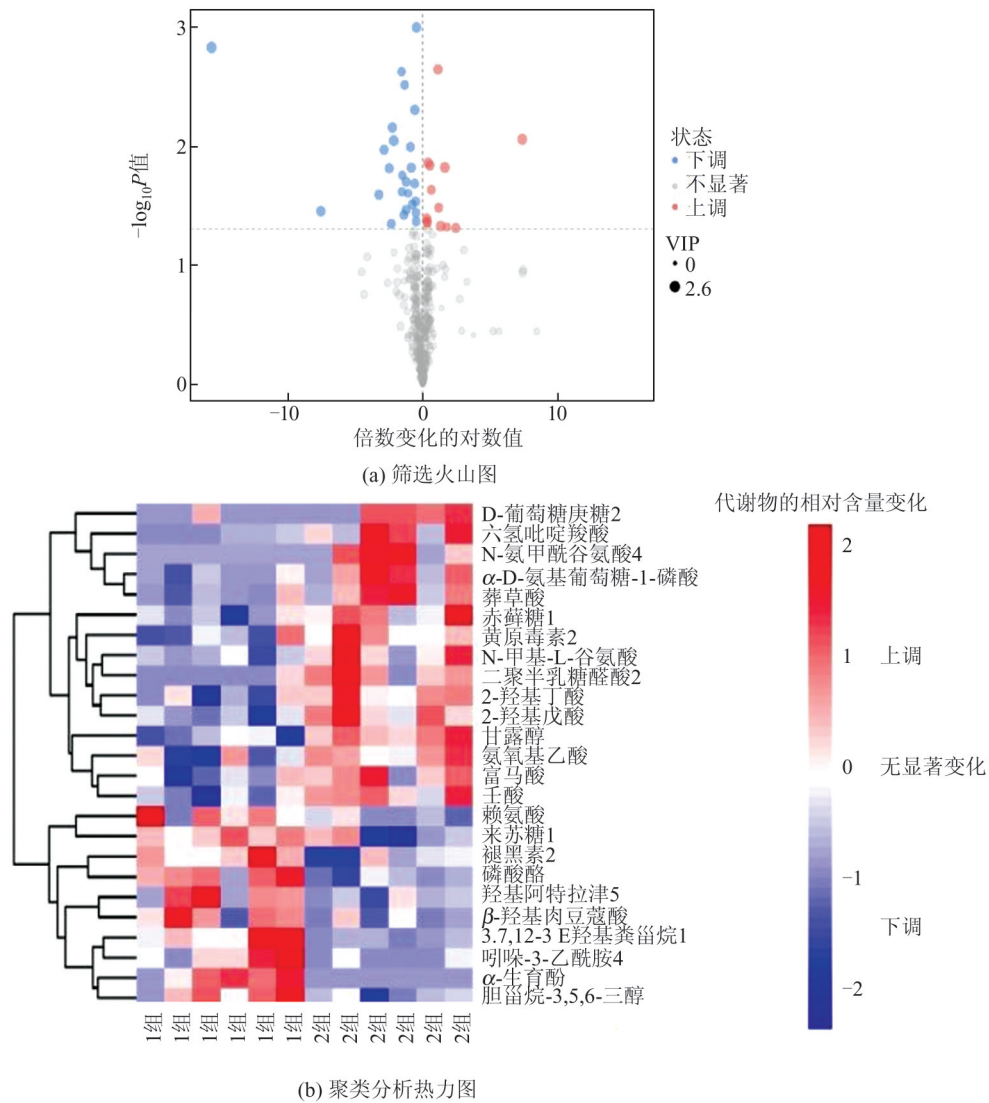


图3 粗、细型绒山羊血浆差异代谢物

Figure 3 Plasma differential metabolites of coarse and fine cashmere goats

表3 血浆中影响羊绒粗细的潜在生物标志物

Table 3 Potential biomarkers affecting cashmere thickness in plasma

物质	VIP	P值	倍数变化值
α-生育酚	2.288 5	0.008 8	4.126 7
甘露醇	2.041 6	0.001 0	0.723 6
N-氨基甲酰谷氨酸4	1.920 5	0.035 4	0.005 3
壬酸	1.876 3	0.005 0	0.665 2
褪黑素	1.872 5	0.002 3	2.195 3
来苏糖	1.806 9	0.043 1	1.271 4
赖氨酸	1.665 0	0.033 0	2.279 7
莽草酸	1.327 5	0.024 3	0.343 0

表4 血浆中差异代谢物富集通路及名称

Table 4 Differential metabolite enrichment pathways and their names in plasma

通路	物质
代谢途径	L-赖氨酸
	富马酸
	α-生育酚
	莽草酸
ABC转运蛋白	L-赖氨酸
	褪黑素
氧化磷酸化	富马酸
	L-赖氨酸
	褪黑素
氨基酸生物合成	L-赖氨酸
	莽草酸

解、氧化磷酸化、戊糖和葡萄糖醛酸相互转化、色氨酸代谢、氨基酸生物合成和代谢途径通路。表4为该通路精确匹配到的差异代谢物,其中褪黑素、L-赖氨酸出现于多条通路。

3 讨 论

辽宁绒山羊皮肤毛囊类型和结构与其他品种绒山羊的皮肤毛囊类型和结构相同,毛囊类型分为初级毛囊和次级毛囊,毛囊的组成结构包括连接组织鞘、外根鞘、内根鞘、毛干和毛球(毛乳头和毛母质)等^[13]。产绒量是羊绒生产价值的一项重要经济指标^[14]。有研究发现,绒毛细度与产绒量呈正相关,产绒量越高,细度越粗^[15]。本实验研究发现 I 组(粗型)绒的平均细度显著高于 II 组(细型),I 组产绒量略高于 II 组($P>0.05$),这可能是由于实验误差造成的,与其他文献结果基本一致。

血浆代谢组可以在动物的生物代谢过程中检测生物信号,在很短时间内,可以反映出机体的代谢状况。血浆中的代谢物质可以描述动物的全部代谢变化,在人类疾病的诊断和动物营养的研究中被广泛使用。皮肤作为覆盖机体的屏障,其具有丰富的酶系统及一些代谢活动,如氧化、还原、水解等^[16]。皮肤的附属器官也具有代谢能力,如皮脂腺、汗腺及毛囊等。在对粗细型绒山羊血浆代谢物差异分析中发现,上调代谢物中褪黑素和 α -生育酚的VIP值较高。下调代谢物中N-氨基甲酰谷氨酸的VIP值较高。

α -生育酚是维生素E的主要活性成分,被认为是抗氧化能力、生物学活性最强的形式^[17]。高生物利用度是因为 α -生育酚转运蛋白和 ω -羟化酶是 α -生育酚吸收的重要组成部分^[18]。人们早就认识到, α -生育酚是活组织中发现的主要亲脂性抗氧化剂,它是一种自由基清除抗氧化剂,通过将其酚氢提供给氧自由基来抑制链增殖, α -生育酚保护皮肤免受脂质过氧化和氧化性皮肤损伤以及紫外线诱导的损伤,甚至抑制了中波紫外线诱导的肿瘤的增殖^[19]。在国外学者的研究中发现,琥珀酸 α -生育酚可以作为视黄醛(retinal, RAL)进入皮肤的有效载体,琥珀酸 α -生育酚创建了一个RAL有效渗透的递送平台,其研究结果表明,添加琥珀酸 α -生育酚可以提高脂质物质稳定性,且不会对皮肤产生刺激^[20]。 α -生育酚对角化细胞中谷胱甘肽(glutathione, GSH)的表达水平有一定的调节作用,影响细胞内GSH的生物合成,主要是通过调节谷氨酰半胱氨酸合成酶的表达水平来加速GSH的细胞内生物合成。在真核细胞和大多数革兰氏阴性细菌中,GSH的生物合成主要通过两步,依赖于ATP的酶催化反应完成,即L-谷氨酸、L-半胱氨酸在 γ -谷氨酰半胱氨酸合成酶催化下,消耗ATP生成 γ -谷氨酰半胱氨酸(γ -glutamylcysteine, γ -GC); γ -GC和甘氨酸在GSH合成酶的催化下消耗ATP生成GSH。GSH能够与还原糖反

应生成多种含硫化合物,可以作为一种调节物质影响糖类、蛋白质和脂肪代谢^[21]。本研究发现 α -生育酚在粗型组血浆代谢物含量中显著上调,增加GSH含量,加快ATP转运,引起能量升高。

褪黑素主要是由哺乳动物的松果体合成的一种神经内分泌激素,其他合成部位包括皮肤、视网膜、血小板、胃肠道、哈德氏腺、皮肤眼眶腔的副泪腺、唾液腺、肠的嗜铬细胞瘤以及红细胞^[22-23]。大量研究表明,褪黑素具有广泛的生理作用,如镇痛、保护心血管细胞、保护胃肠道、防止病变、调节昼夜节律、调节免疫作用、降低血压、抗衰老及抗肿瘤等多种功能^[24]。皮肤中褪黑素的存在对皮肤起保护作用^[25]。哺乳动物皮肤表达褪黑素合成相关酶,是具有褪黑素内在合成能力的外周器官,包含将色氨酸转化为褪黑素所必需的整个通路^[26]。有研究表明,在休止期及绒生长期对陇东绒山羊母羊皮下埋植褪黑素后发现褪黑素对毛囊直径、毛囊深度、毛囊密度、毛囊比无影响,但毛囊成活率将有提高,表明外源褪黑素可提高绒山羊产绒量是由于提前且持续激活次级毛囊生长发育,从而延长了绒生长期,增加了羊绒长度与数量^[27]。本研究发现,褪黑素在粗型组血浆代谢物含量中显著上调,粗型绒山羊产绒量高于细型绒山羊,由此推测,褪黑素的增加可以诱导产绒量的增加。

N-氨基甲酰谷氨酸(N-carbamylglutamic acid, NCG)是一类性质稳定的可作为食用添加的活性物质,其化学结构与N-乙酰谷氨酸(N-acetylglutamic acid, NAG)相似,NCG是NAG类似物,在动物体内能够像NAG一样参与二氢吡咯-5-羧酸合成酶和氨甲酰磷酸合成酶I的激活,促进谷氨酰胺或脯氨酸合成瓜氨酸,进而促进精氨酸的合成^[28]。而精氨酸在机体内代谢产生的一氧化氮和多胺对妊娠期雌性动物胎盘血管生成和发育、胎盘和胎儿生长有积极影响^[29]。研究发现血管内皮生长因子(vascular endothelial growth factor, VEGF)及其受体的表达与毛细血管形成相关,而精氨酸可以通过刺激VEGF的合成和释放明显促进血管形成^[30]。VEGF可能通过诱导毛囊周围的血管形成而调控毛囊的生长周期和促进毛发生长^[31],并建立了一株基因工程小鼠,该小鼠的毛囊能持续产生VEGF,结果这些小鼠毛囊的血管体积、毛球和毛干直径均明显大于野生型小鼠,临床上表现为毛发变粗,拔毛后毛发很快长出。VEGF对次级毛囊外根鞘细胞中成纤维细胞生长因子5(fibroblast growth factor 5, FGF5)基因的表达有抑制作用,随着浓度的增加,FGF5 mRNA在100

ng/mL组时表达量最低,并推测 VEGF 可以通过抑制 FGF5 的表达促进毛囊生长。本课题组前期研究发现,在辽宁绒山羊饲料中添加 NCG 后,其血液中 VEGF 浓度显著提高且绒毛细度下降。本研究中发现 NCG 在粗型组血浆代谢物含量中显著下调,由此推测 NCG 可以上调 VEGF 浓度,进而促进绒毛细度提高。

山羊绒主要由角蛋白组成,绒毛生长需要较高的蛋白。关于毛囊干细胞,许多细胞分子的研究都关注于褪黑素对其影响,研究绒毛生长的作用,而缺少氨基酸等一类营养素对绒山羊皮肤细胞的进一步研究。研究报道毛囊可以利用不同的氨基酸组成和数量极大地限制绵羊毛的生长^[32]。本实验研究发现,粗细型绒山羊绒毛细度的血浆的差异代谢物 VIP 值较高的包括褪黑素、 α -生育酚和 N-氨基甲酰谷氨酸。这些物质对于毛囊发育和绒毛生长都具有显著的调节作用。

4 结 论

血浆代谢组学分析结果表明,褪黑激素、 α -生育酚及氨基酸等脂代谢及能量代谢物存在显著性差异,以上代谢物是影响羊绒绒毛细度的潜在标志物。

参考文献

- [1] 孙亚波,刘颖,徐晓江,等. 岫岩县辽宁绒山羊产业发展调查报告与建议[J]. 现代畜牧兽医, 2024(1): 54-59.
Sun Y B, Liu Y, Xu X J, et al. Investigation report and recommendations on the development of Liaoning cashmere goat industry in Xiuyan County [J]. Modern Journal of Animal Husbandry and Veterinary Medicine, 2024(1): 54-59.
- [2] Li W, Lu Z F, Man X Y, et al. VEGF upregulates VEGF receptor-2 on human outer root sheath cells and stimulates proliferation through ERK pathway [J]. Molecular Biology Reports, 2012, 39(9): 8687-8694.
- [3] Clemmons B A, Mihelic R I, Beckford R C, et al. Serum metabolites associated with feed efficiency in black Angus steers [J]. Metabolomics, 2017, 13(12): 147.
- [4] Lindon J C, Holmes E, Nicholson J K. Metabonomics techniques and applications to pharmaceutical research & development [J]. Pharmaceutical Research, 2006, 23(6): 1075-1088.
- [5] Oliver M J, Guo L N, Alexander D C, et al. A sister group contrast using untargeted global metabolomic analysis delineates the biochemical regulation underlying desiccation tolerance in *Sporobolus stapfianus* [J]. The Plant Cell, 2011, 23(4): 1231-1248.
- [6] 代丛姗,种玉飞,夏文广,等. 代谢组学视角下的轻度认知障碍生物标志物研究进展 [J]. 生物资源, 2024, 46(6): 517-528.
- Dai C S, Chong Y F, Xia W G, et al. Progress on biomarkers of mild cognitive impairment from the perspective of metabolomics [J]. Biotic Resources, 2024, 46(6): 517-528.
- [7] Fontanesi L. Merging metabolomics, genetics, and genomics in livestock to dissect complex production traits [M]//Systems Biology in Animal Production and Health: Springer International Publishing, 2016.
- [8] 张文武,童金凤,彭甫蕾,等. 基于非靶代谢组学的多花黄精沙藏种子萌发过程差异代谢物分析 [J]. 生物资源, 2023, 45(2): 164-176.
Zhang W W, Tong J F, Peng F L, et al. Analysis of differential metabolites during germination process of *Polygonatum cyrtoneuma* Hua seeds in sand storage based on untargeted metabolomics [J]. Biotic Resources, 2023, 45(2): 164-176.
- [9] Nishiumi S, Suzuki M, Kobayashi T, et al. Differences in metabolite profiles caused by pre-analytical blood processing procedures [J]. Journal of Bioscience and Bioengineering, 2018, 125(5): 613-618.
- [10] Jin M, Cao M, Cao Q, et al. Long noncoding RNA and gene expression analysis of melatonin-exposed Liaoning cashmere goat fibroblasts indicating cashmere growth [J]. Die Naturwissenschaften, 2018, 105(9/10): 60.
- [11] Kind T, Wohlgemuth G, Lee D Y, et al. FiehnLib: mass spectral and retention index libraries for metabolomics based on quadrupole and time-of-flight gas chromatography/mass spectrometry [J]. Analytical Chemistry, 2009, 81(24): 10038-10048.
- [12] Dunn W B, Broadhurst D, Begley P, et al. Procedures for large-scale metabolic profiling of serum and plasma using gas chromatography and liquid chromatography coupled to mass spectrometry [J]. Nature Protocols, 2011, 6(7): 1060-1083.
- [13] 史雷,屈雷,刘锦旺,等. 陕北白绒山羊皮肤毛囊形态结构及其特征参数与产绒性状的相关性分析 [J]. 中国畜牧兽医, 2018, 45(10): 2814-2822.
Shi L, Qu L, Liu J W, et al. Hair follicle structure and the correlation analysis between characteristic parameters and cashmere production traits in Shanbei white cashmere goat [J]. China Animal Husbandry & Veterinary Medicine, 2018, 45(10): 2814-2822.
- [14] 邱宁宁. 褪黑激素不同埋植模式对内蒙古绒山羊产绒性能及毛囊生长周期的影响 [D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学, 2023.
Qiu N N. Effects of different melatonin implantation modes on cashmere production performance and hair fol-

- lice growth cycle of inner mongolia cashmere goats[D]. Huhehaote: Inner Mongolia Agricultural University, 2023.
- [15] 刘桂莲,王睦生,雷春林,等. 内蒙古白绒山羊优质高产新品系选育基础羊绒毛品质的分析[J]. 内蒙古畜牧科学, 1994, 15(2): 37-39, 41.
Liu G L, Wang M S, Lei C L, et al. Analysis of wool quality of basic cashmere for breeding new strains of Inner Mongolia white cashmere goat with high quality and high yield [J]. Animal Husbandry and Feed Science, 1994, 15(2): 37-39, 41.
- [16] 沈琦,胡晋红,赵素娟,等. 水杨酸甲酯的皮肤渗透和代谢特性[J]. 中国医院药学杂志, 2001, 21(8): 451-453.
Shen Q, Hu J H, Zhao S J, et al. Simultaneous transport and metabolism of methyl salicylate in pig skin [J]. Chinese Journal of Hospital Pharmacy, 2001, 21(8): 451-453.
- [17] Peh H, Daniel Tan W, Liao W P, et al. Vitamin E therapy beyond cancer: tocopherol versus tocotrienol [J]. Pharmacology & Therapeutics, 2016, 162: 152-169.
- [18] Sontag T J, Parker R S. Cytochrome P450 omega-hydroxylase pathway of tocopherol catabolism. Novel mechanism of regulation of vitamin E status [J]. The Journal of Biological Chemistry, 2002, 277(28): 25290-25296.
- [19] Ben-Shabat S, Kazdan Y, Beit-Yannai E, et al. Use of alpha-tocopherol esters for topical vitamin E treatment: evaluation of their skin permeation and metabolism [J]. Journal of Pharmacy and Pharmacology, 2013, 65(5): 652-658.
- [20] Singpanna K, Jiratananan P, Paiboonwasin S, et al. Alpha-tocopherol-infused flexible liposomal nanocomposite pressure-sensitive adhesive: enhancing skin permeation of retinaldehyde [J]. Polymers, 2024, 16(20): 2930.
- [21] Wan W T, Jiang B P, Sun L, et al. Metabolomics reveals that vine tea (*Ampelopsis grossedentata*) prevents high-fat-diet-induced metabolism disorder by improving glucose homeostasis in rats [J]. PLoS One, 2017, 12(8): e0182830.
- [22] Fernandes P A, Tamura E K, D'Argenio-Garcia L, et al. Dual effect of catecholamines and corticosterone crosstalk on pineal gland melatonin synthesis [J]. Neuroendocrinology, 2017, 104(2): 126-134.
- [23] 廖聆孜,杨冰,樊静,等. 外源褪黑素对盐胁迫下盐肤木幼苗生长和生理特性的影响[J]. 生物资源, 2024, 46(4): 324-333.
Liao L Z, Yang B, Fan J, et al. Effects of exogenous melatonin on the growth and physiological characteristics of *Rhus chinensis* seedlings under salt stress [J]. Biotic Resources, 2024, 46(4): 324-333.
- [24] 梅花,丽春. 褪黑素在动物中的作用研究进展[J]. 饲料工业, 2017, 38(1): 62-64.
Mei H, Li C. Research progress of the effect of melatonin in animal [J]. Feed Industry, 2017, 38(1): 62-64.
- [25] 贾纯琰,付绍印,丽春,等. 褪黑素在哺乳动物皮肤中的生物学功能及对山羊绒生长的调控作用[J]. 生命科学, 2022, 34(11): 1359-1367.
Jia C Y, Fu S Y, Li C, et al. Biological function of melatonin in mammal skin and regulatory effect on cashmere growth [J]. Chinese Bulletin of Life Sciences, 2022, 34(11): 1359-1367.
- [26] Zhao D K, Yu Y, Shen Y, et al. Melatonin synthesis and function: evolutionary history in animals and plants [J]. Frontiers in Endocrinology, 2019, 10: 249.
- [27] 何茂昌,何钊,赵成余,等. 皮下埋植褪黑激素对陇东绒山羊皮肤毛囊生长发育的影响[J]. 畜牧兽医杂志, 2011, 30(2): 21-23, 26.
He M C, He Z, Zhao C Y, et al. Effect of injecting melatonin capsules on growth of skin follicle of Longdong cashmere goats [J]. Journal of Animal Science and Veterinary Medicine, 2011, 30(2): 21-23, 26.
- [28] 闫辰,彭凯,曹俊明,等. N-氨甲酰谷氨酸的生物学功能及其在动物生产中的应用[J]. 动物营养学报, 2024, 36(10): 6212-6222.
Yan C, Peng K, Cao J M, et al. Biological functions of N-carbamylglutamate and its application in animal production [J]. Chinese Journal of Animal Nutrition, 2024, 36(10): 6212-6222.
- [29] 韦仕南. NCG对山羊妊娠前期受胎率的影响及机制研究[D]. 贵阳:贵州大学, 2020.
Wei S N. Study on the Effect and Mechanism of NCG on Fertility Rate in Early Pregnancy of Goats [D]. Guiyang: Guizhou University, 2020.
- [30] 葛奎,陆树良,青春,等. 左旋精氨酸对糖尿病大鼠烧伤创面血管形成的影响[J]. 中华烧伤杂志, 2004, 20(4): 210-213.
Ge K, Lu S L, Qing C, et al. The influence of L-arginine on angiogenesis in burn wounds in diabetic rats [J]. Chinese Journal of Burns, 2004, 20(4): 210-213.
- [31] Yano K, Brown L F, Detmar M. Control of hair growth and follicle size by VEGF-mediated angiogenesis [J]. The Journal of Clinical Investigation, 2001, 107(4): 409-417.
- [32] Reis P J, Sahl T. The nutritional control of the growth and properties of mohair and wool fibers: a comparative review [J]. Journal of Animal Science, 1994, 72(7): 1899-1907.