

陶志云, 宋卫涛, 徐文娟, 等. 成年鸭睾丸发育差异分析[J]. 山西农业科学, 2025, 53(1): 160-166.

TAO Z Y, SONG W T, XU W J, et al. Differential analysis of testicular development in adult ducks[J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2025, 53(1): 160-166.

doi:10.3969/j.issn.1002-2481.2025.01.18

成年鸭睾丸发育差异分析

陶志云, 宋卫涛, 徐文娟, 朱春红, 刘宏祥, 王志成, 顾昊天, 王逸飞, 李慧芳

(江苏省家禽科学研究所, 江苏 扬州 225125)

摘要:为探讨不同精液量鸭的睾丸发育差异,以成年高邮鸭为研究对象,根据个体精液量体积分为精液量多和精液量少组,分别称量2组鸭的体质量和睾丸总质量;采用ELISA法检测2组血液中的睾酮含量;对2组鸭睾丸组织石蜡切片后显微观察并测量睾丸曲精小管面积、单位面积间质细胞数量,比较2组间的差异,并进行相关性分析;最后利用荧光定量PCR技术检测2组鸭睾丸组织中 $FSHR$ 、 LHR 、 AMH 、 $StAR$ 的表达水平。结果表明,精液量多组的睾丸总质量、睾丸体积和睾酮含量显著高于精液量少组的睾丸总质量、睾丸体积和睾酮含量;体质量、睾丸指数、曲精小管面积和单位面积间质细胞数量在2组间无显著差异。相关性分析结果表明,精液量与睾丸体积呈显著正相关,睾酮含量与睾丸总质量和睾丸体积呈显著正相关。精液量多组中睾丸发育相关基因 $FSHR$ 、 LHR 、 AMH 、 $StAR$ 的mRNA表达水平均显著高于精液量少组。综上所述,公鸭的精液量多少与睾丸总质量和睾酮含量有关,而且睾丸发育相关基因 $FSHR$ 、 LHR 、 AMH 、 $StAR$ 在鸭睾丸发育和精子生成过程中可能发挥了重要作用。

关键词:高邮鸭;睾丸;发育;ELISA法;相关性分析

中图分类号:S834 **文献标识码:**A **文章编号:**1002-2481(2025)01-0160-07

Differential Analysis of Testicular Development in Adult Ducks

TAO Zhiyun, SONG Weitao, XU Wenjuan, ZHU Chunhong, LIU Hongxiang,

WANG Zhicheng, GU Haotian, WANG Yifei, LI Huifang

(Jiangsu Institute of Poultry Science, Yangzhou 225125, China)

Abstract: In order to explore the differences in testicular development in ducks with different semen volumes, in this study, adult Gaoyou ducks were taken as the research object. These ducks were divided into two groups: high semen volume and low semen volume groups. The weight and testicular weight of the two groups of ducks were measured, respectively. ELISA method was used to detect testosterone levels in the blood of the two groups. Microscopic observation and measurement of the area of the seminiferous tubules and the number of interstitial cells per unit area were performed after paraffin sectioning on the two groups of duck testicular tissue. The differences between the two groups were compared and correlation analysis was conducted. Finally, fluorescence quantitative PCR was used to detect the expression levels of $FSHR$, LHR , AMH , and $StAR$ in the two groups of duck testicular tissues. The results showed that the testicular weight, testicular volume, and testosterone levels in the high semen volume group were significantly higher than those in the low semen volume group. There was no significant difference in body weight, testicular index, seminiferous tubule area, and number of interstitial cells per unit field between the two groups. Correlation analysis showed that semen volume was significantly positively correlated with testicular volume. While testosterone content was significantly positively correlated with testicular weight and volume. The expression levels of testicular development related genes $FSHR$, LHR , AMH , and $StAR$ were significantly higher in the high semen volume group than those in the low semen volume group. These results indicated that the semen volume in male ducks was related to testicular weight and testosterone content. And testicular development related genes $FSHR$, LHR , AMH and $StAR$

收稿日期: 2024-05-31

基金项目: “十四五”重点研发专项(2022YFD1300100); 扬州市科技计划项目(YZ2022050); 江苏省现代农业(水禽)产业技术体系(JATS [2023]365); 国家家养动物物种质资源库(2024)

作者简介: 陶志云, 副研究员, 博士, 主要从事家禽免疫及遗传育种研究, E-mail: zhiyun2@126.com

通信作者: 李慧芳, 研究员, 博士, 主要从事家禽遗传育种与家禽资源保护研究, E-mail: lhxf_002@aliyun.com.cn

may play important roles in duck testicular development and spermatogenesis.

Keywords: Gaoyou ducks; testis; development; ELISA method; correlation analysis

随着人们生活水平的提高,对家禽产品(肉和蛋)的消费量逐渐增加,提高家禽亲本的生育能力以产生更多的后代,从而生产出更多的禽产品以满足消费需求是有效手段之一。家禽亲本的生育能力包括雄性和雌性的生育能力,但用于自然或人工授精的雄性数量较少,通过提高雄性家禽的精液量、精子浓度、活力等是提高雄性生育能力的有效手段。

睾丸是雄性动物的生殖器官,具有产生雄激素和雄性生殖细胞的功能,同时具有产生精子、储存精子的重要作用^[2]。研究表明,绝大多数哺乳动物的睾丸大小与繁殖能力密切相关,繁殖能力差常常与睾丸小有关^[3]。模式动物粪蝇上的一项研究表明,睾丸较大组的精子竞争能力明显高于小睾丸组^[4]。因此,动物睾丸大小的研究对于发育生物学和繁殖学有重要意义。

研究表明,采用组织学观察不同发育时期的绍兴麻鸭睾丸形态,绍兴麻鸭睾丸及曲细精管的发育具有阶段性^[5]。利用形态学和组织学的方法,初步探讨了连城白鸭睾丸胚后发育和性成熟特点,结果表明,睾丸大小、质量、睾丸指数及睾丸曲精小管组织结构均呈明显的日龄变化^[6]。在鸭的生产过程中,发现不同成年鸭的精液量差异较大,推测这可能与睾丸的大小有关。江苏省家禽科学研究所水禽育种与生产研究组前期在苏邮1号蛋鸭中的研究也表明,睾丸重量与精液量呈极显著正相关^[7]。

为了进一步明确精液量与睾丸大小以及相关因素的相关性,本研究以成年高邮鸭为对象,探讨了精液量差异显著的2组鸭的睾丸质量、睾丸组织形态学、血清睾酮以及基因表达差异,旨在分析成年鸭精液量差异的相关机制。

1 材料和方法

1.1 试验动物

300日龄的高邮鸭公鸭40只,来自江苏高邮鸭发展集团有限公司。同一阶梯笼养鸭舍单个笼养,正常光照和饲养条件。

1.2 试验方法

1.2.1 分组与样品采集

通过人工按摩+诱导的

方法,采集各鸭的精液于小烧杯中,测量精液量。采集所有个体的血液,分离血清,用于睾酮含量检测。经测量,精液量分布在0.023~0.672 mL,平均精液量为0.299 mL,其中,精液量在0.2 mL以下的鸭为精液量少组,0.35 mL以上的鸭为精液量多组,具体鸭的精液量分布情况见图1。每组各取10只称量体质量,采集血液,屠宰后采集睾丸并称质量,测量睾丸的横径、纵径及宽度。一侧睾丸取部分组织进行RNA提取,另一侧睾丸整个置入4%多聚甲醛中固定,用于石蜡切片。

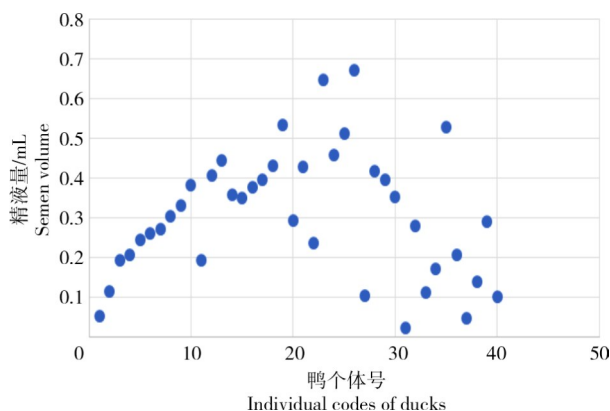


图1 鸭的精液量分布情况

Fig.1 Distribution of semen volume in ducks

1.2.2 睾丸体积计算 采用Lamber公式计算睾丸体积。

$$\text{睾丸体积}(\text{mm}^3) = \text{长度} \times \text{宽度} \times \text{厚度} \times 0.71 \quad (1)$$

式中,0.71为矫正系数。

1.2.3 睾丸组织切片制作 2组各取5个样本进行睾丸组织切片的制作,睾丸样本经4%多聚甲醛固定,状态良好后,对组织进行修剪、脱水、包埋、切片、染色、封片等,正置白光拍照显微镜(Nikon, Japan)拍照,Image-Pro Plus 6.0分析软件测量曲精小管面积,每个个体拍摄5张图片,每张图片测量20个曲精小管(40×),同时对每张切片的间质细胞进行计数(200×)。

1.2.4 血清睾酮含量测定 将采集的抗凝血在离心机中1 000 r/min离心10 min,吸取上层血清,采用Elabscience® QuicKey Pro鸡睾酮酶联免疫吸附测定试剂盒测定睾酮含量。

1.2.5 引物设计 以 β -actin 为内参,鸭 *FSHR*、*LHR*、*AMH*、*StAR* 以及 β -actin 的 mRNA 引物序

表 1 试验用引物
Tab.1 List of primers used in the experiment

引物名称 Primer name	引物序列(5'—3') Sequence of primer(5'—3')	Gen Bank 登录号 Gen Bank number	产物长度/bp Product length
<i>FSHR</i> -F	GCAAGCCCAGATTTACAGAACAGACA	XM_021267212.2	130
<i>FSHR</i> -R	CAAGTGATTTAGAGGAACCACTGA		
<i>LHR</i> -F	ACAACAGAAACCTCAAGCGGAT	EU049613	113
<i>LHR</i> -R	CTCGAGCCCGTAACTAGGCA		
<i>StAR</i> -F	GCCGAAGACGATCATCAAC	XM_027443533.1	181
<i>StAR</i> -R	TCCCTACTTTTACCCCTGA		
<i>AMH</i> -F	CTCGGATGACAAATGCTTCA	NM_001310362.1	111
<i>AMH</i> -R	ACTCCATCAGCGGAGAGGTA		
β -actin-F	TGAGAGTAGCCCCTGAGGAGCAC	EF667345.1	203
β -actin-R	TAACACATCACCAGAGTCCATCAC		

1.2.6 RNA 提取和反转录 采用 RNA EasyFast 动物组织/细胞总 RNA 提取试剂盒(TIANGEN, DP451)提取 RNA, RNA 经质量检测合格后,用 Fastking cDNA 第 1 链试剂盒(去基因组)(KR116)将 RNA 反转录成 cDNA。

1.2.7 荧光定量 PCR 检测 采用 SuperReal 荧光定量预混试剂(TIANGEN, FP215),检测睾丸中 *FSHR*、*LHR*、*AMH* 及 *StAR* 的表达。反应体系为 20 μ L, 包括 2 $\times$ SuperReal Color PreMix 10 μ L, 正反向引物共 0.8 μ L, cDNA 模版 2 μ L, 50 $\times$ ROX Reference Dye 0.4 μ L, ddH₂O 6.8 μ L。反应条件为: 95 $^{\circ}$ C 5 min; 95 $^{\circ}$ C 25 s, 60 $^{\circ}$ C 25 s, 72 $^{\circ}$ C 25 s, 40 个循环; 95 $^{\circ}$ C 30 s, 60 $^{\circ}$ C 30 s, 72 $^{\circ}$ C 30 s。

1.3 数据分析

按照 $2^{-\Delta\Delta Ct}$ 的方法计算所测基因的相对表达量。所有试验数据用 SPASS 20.0 软件处理,进行单因素方差分析, $P < 0.05$ 表示差异显著。

2 结果与分析

2.1 成年鸭睾丸发育差异

从表 2 可以看出,成年公鸭的睾丸质量、睾丸体积、精液量在精液量少和精液量多组间差异显著($P < 0.05$);精液量多组的鸭体质量和睾丸指数均略高于精液量少组,但均无显著差异;精液量多组的血清中睾酮含量显著大于精液量少组($P < 0.05$)。

表 2 成年鸭体质量、睾丸总质量、精液量和血清睾酮浓度差异

Tab.2 Differences analysis in body weight, testicular weight, semen volume, and serum testosterone concentration in adult ducks

组别 Group	精液量/mL Semen volume	体质量/g Body weight	睾丸总质量/g Testicular weight	睾丸指数/% Testicular index	睾丸体积/mm ³ Testicular volume	睾酮含量/(ng/mL) Testosterone content
精液量少组 Low semen volume group	0.108 $\pm$ 0.143a	2 102.000 $\pm$ 268.844a	79.013 $\pm$ 19.477a	3.777 $\pm$ 0.891a	39 249.652 $\pm$ 3 812.127a	5.272 $\pm$ 1.189a
精液量多组 High semen volume group	0.409 $\pm$ 0.148b	2 322.667 $\pm$ 288.316a	143.777 $\pm$ 11.693b	6.303 $\pm$ 1.359a	83 008.321 $\pm$ 14 547.792b	10.682 $\pm$ 2.833b

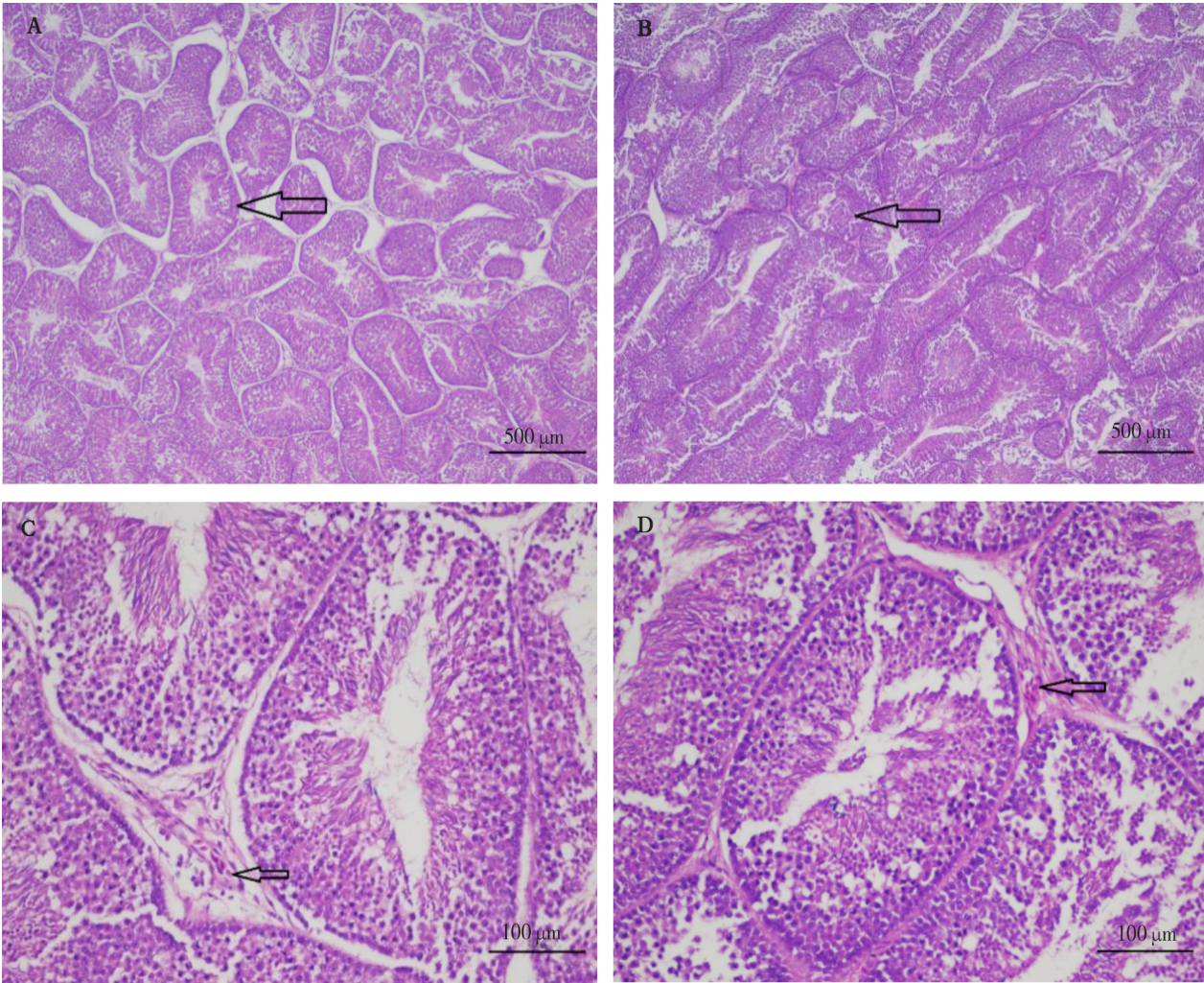
注:不同小写字母表示 0.05 水平下处理间差异显著。下表同。

Note: Different lowercase letters indicated significant differences($P < 0.05$) between treatment. The same as below.

2.2 成年鸭睾丸组织学差异

成年鸭睾丸组织切片观察和统计发现(图 2, 表 3),成年鸭精液量少组、精液量多组睾丸组织的

曲精小管面积、单位面积间质细胞数量差异均未达显著水平。



A. 精液量少组睾丸组织切片,箭头所示为曲精小管(40×);B. 精液量多组睾丸组织切片,箭头所示为曲精小管(40×);C. 精液量少组睾丸组织切片,箭头所示为间质细胞(200×);D. 精液量多组睾丸组织切片,箭头所示为间质细胞(200×)

A. Slices of testicular tissue in the group with low semen volume, the arrow indicated the seminiferous tubules(40×); B.Slices of testicular tissue in the group with high semen volume, the arrow indicated the seminiferous tubules(40×); C. Slices of testicular tissue in the group with low semen volume, the arrow indicated interstitial cells(200×); D.Slices of testicular tissue in the group with high semen volume, the arrow indicated interstitial cells(200×)

图2 成年鸭睾丸组织切片示意
Fig.2 Schematic diagram of adult duck testicular tissue slices

表3 成年鸭睾丸组织学差异
Tab.3 Histological differences in testicles of adult ducks

组别 Group	曲精小管面积/mm ² Area of seminiferous tubules	单位面积间质细胞数/(个/mm ²) Number of interstitial cells per unit area
精液量少组 High semen volume group	0.082±0.041a	402.695±86.737a
精液量多组 Low semen volume group	0.127±0.055a	290.881±103.176a

2.3 成年鸭睾丸各指标相关性分析

对成年公鸭各指标进行相关性分析,结果如表4所示,体质量与所有指标差异均不显著;睾丸

总质量与睾丸体积、睾丸指数和睾酮含量呈显著正相关($P<0.05$);睾丸体积与睾丸总质量、睾酮含量和精液体积呈显著正相关($P<0.05$);睾丸指

数与睾丸总质量、曲精小管面积呈显著正相关($P<0.05$);曲精小管面积与睾丸指数呈显著正相关($P<0.05$);单位视野内间质细胞数量与所有指标

均无显著相关性;精液量与睾丸体积显著相关($P<0.05$);睾酮含量与睾丸总质量、睾丸体积显著相关($P<0.05$)。

表 4 公鸭睾丸性状各指标相关性分析

Tab.4 Correlation analysis of various indicators of testicular traits in male ducks

指标 Index	体质量 Body weight	睾丸总质量 Testicular weight	睾丸体积 Testicular volume	睾丸指数 Testicular index	曲精小管面积 Area of seminiferous tubules	单位面积间质细胞数 Number of interstitial cells per unit area	精液量 Semen volume	睾酮含量 Testosterone content
体质量 Body weight		0.519	0.476	0.967	0.575	0.357	0.801	0.381
睾丸总质量 Testicular weight	0.324		0.012	0.007	0.707	0.390	0.823	0.070
睾丸体积 Testicular volume	0.356	0.907*		0.059	0.143	0.816	0.043	0.021
睾丸指数 Testicular index	-0.025	0.946*	1		0.007	0.241	0.074	0.158
曲精小管面积 Area of seminiferous tubules	-0.372	0.723	0.530	0.910*		0.691	0.207	0.472
单位面积间质细胞数量 Number of interstitial cells per unit area	0.197	-0.574	-0.367	-0.658	-0.635		0.241	0.150
精液量 Semen volume	-0.133	0.701	0.810*	0.770	0.601	-0.566		0.658
睾酮含量 Testosterone content	0.536	0.869*	0.826*	1.000	0.381	0.385	0.628	

注:*表示不同指标之间显著相关($P<0.05$)。

Note: * indicated significant correlation among different indicators($P<0.05$).

2.4 公鸭精液量多少组基因表达差异分析

公鸭精液量多组和精液量少组睾丸发育相关基因表达结果如表 5 所示, *FSHR*、*LHR*、*AMH* 及

StAR 的表达量在精液量多组均显著高于精液量少组($P<0.05$)。

表 5 精液量不同组见睾丸发育相关基因表达差异分析

Tab.5 Differential analysis of testicular development related genes in the groups with different semen volume

组别 Group	<i>FSHR</i>	<i>LHR</i>	<i>AMH</i>	<i>StAR</i>
精液量少组 Low semen volume group	1.012±0.124a	0.988±0.135a	1.015±0.091a	0.994±0.106a
精液量多组 High semen volume group	1.679±0.215b	2.478±0.425b	1.798±0.321b	1.548±0.265b

3 结论与讨论

精子量的多少是评价精液质量好坏的一个重要指标。研究表明,杜洛克、长白和大白 3 个品种的公猪大小均与精子数和有效精子数呈正相关^[10]。本课题组在苏邮 1 号蛋鸭的研究表明,睾丸质量与精液量呈极显著正相关^[7]。本研究结果表明,精液量多组睾丸质量更大,体积更大,睾丸质量和睾丸体积与精液量呈正相关,与上述研究结果一致。研究表明,睾丸过小的公鸡($<6\text{ g}$)基本上不产生任何精液,没有受精能力,且种公鸡的体质量与睾丸质量呈正相关^[11]。鸭的体质量在精液量多组略

高于精液量少组,二者间无显著相关性,这一研究结果与鸡的研究结果略有不同,但总得来说,体质量大的鸭精液量要高于体质量小的鸭精液量,趋势基本一致。

睾酮是雄性动物体内主要的性激素,具有促进和维持雄性第二性征发育的功能。在赤鹿群中的研究表明,睾酮与精液质量之间无显著相关性,主要与精子产量有关^[12]。但最新在斑雀中的研究却表明,睾酮水平与精子速度和活动精子比例呈正相关^[13]。公猪的研究表明,睾酮含量与精液品质呈弱相关,睾酮含量与睾丸体积不相关,精液品质与睾丸体积不相关^[14]。这些研究结果表明,不同物

种中的结果差异较大,这可能与品种、生殖激素睾酮的个体含量差异较大有关,也有可能与睾酮的检测方法不同等有关。因此,针对不同物种,仍需对睾酮含量与睾丸发育及精液品质的关系进行更多研究,以进一步确定三者间的关系。研究表明,公鸡生长期的睾丸迅速发育,血浆中的主要生殖激素含量增加^[15]。本研究表明,成年高邮鸭的睾丸水平高低与鸭睾丸质量呈显著正相关,说明睾酮含量可以促进睾丸发育,同时睾丸的生长也是睾酮含量升高的重要条件。

FSH(促卵泡素)和LH(促黄体素)分别通过与其受体FSHR和LHR的结合,在卵泡发育和精子发生中发挥着重要作用,早期在大鼠中的研究表明,出生后的小鼠睾丸FSHR mRNA的水平呈动态变化,在青春期和成年期均有一次分泌高峰^[16]。FSHR和LHR在不同年龄牦牛睾丸发育中呈先上升后下降的趋势,5岁时表达量最高^[17]。AMH(抗苗勒管激素)由睾丸间质细胞表达,参与睾丸的分化和发育^[18-19]。StAR类固醇激素合成急性调节蛋白,介导类固醇激素底物胆固醇从线粒体外膜转运到线粒体内膜中的限速步骤^[20],而类固醇激素是一类重要调节分子,在肾上腺、卵巢、胎盘、大脑和皮肤的类固醇生成细胞中合成,并影响一系列发育和生理过程^[21]。StAR的表达与活化在机体生殖功能的正常维持中发挥重要调控作用,在禽类中的研究表明,StAR的转录和翻译对于排卵前血清孕酮的激增是必要的,而且StAR的表达受到FSH和LH的调控^[22]。在雄性脊椎动物中,StAR在睾丸间质细胞中表达,并发挥重要作用^[23-24]。在不同阶段樱桃谷公鸭基因表达检测中发现,从75日龄到165日龄,随着日龄的增加,FSHR、LHR、AMH及StAR等4种基因的表达也快速增加^[9]。本研究在高邮鸭公鸭中发现,FSHR、LHR、AMH及StAR的基因表达在精液量多组均显著高于精液量少组,表明其在睾丸功能的维持中也发挥重要作用。

综上所述,本研究发现不同精液量组的高邮鸭睾丸质量、睾丸体积和睾酮含量均有显著差异,而且精液量的多少与睾丸体积显著正相关,睾酮含量与睾丸质量和睾丸体积显著正相关,睾丸发育相关基因FSHR、LHR、AMH、StAR在不同精液量组间差异显著,该研究结果为鸭睾丸发育的

分子机理研究奠定了理论基础。

参考文献:

- [1] FOUAD A M, EL-SENOUSEY H K, RUAN D, et al. Nutritional modulation of fertility in male poultry[J]. Poultry Science, 2020, 99(11): 5637-5646.
- [2] ALMEIDA F F L, LEAL M C, FRANÇA L R. Testis morphometry, duration of spermatogenesis, and spermatogenic efficiency in the wild boar (*Sus scrofa scrofa*) [J]. Biology of Reproduction, 2006, 75(5): 792-799.
- [3] 孙武, 马世科, 孙永刚, 等. 睾丸发育过程概述及生殖生物学研究意义[J]. 青海畜牧兽医杂志, 2022, 52(3): 40-43.
SUN W, MA S K, SUN Y G, et al. Overview of testicular development process and significance of reproductive biology research[J]. Chinese Qinghai Journal of Animal and Veterinary Sciences, 2022, 52(3): 40-43.
- [4] HOSKEN D J, WARD P I. Experimental evidence for testis size evolution *via* sperm competition[J]. Ecology Letters, 2001, 4(1): 10-13.
- [5] 沈元新, 童莲芳. 绍兴麻鸭睾丸发育形态学的研究[J]. 浙江农业大学学报, 1991, 17(3): 283-289.
SHEN Y X, TONG L F. The histological development of the testes of Shaoxing pockmark ducks[J]. Journal of Zhejiang Agricultural University, 1991, 17(3): 283-289.
- [6] 姚远, 匡伟, 郗正林, 等. 连城白鸭睾丸胚后生长发育的初步研究[J]. 中国家禽, 2018, 40(2): 50-54.
YAO Y, KUANG W, XI Z L, et al. A Preliminary study on the postembryonic growth and development of testis in Liancheng White ducks[J]. China Poultry, 2018, 40(2): 50-54.
- [7] 薛敏开, 宋卫涛, 朱春红, 等. “苏邮1号”成年公鸭睾丸发育与精液品质的相关性分析[J]. 中国家禽, 2017, 39(14): 68-70.
XUE M K, SONG W T, ZHU C H, et al. Correlation analysis between testicular development and semen quality in adult male ducks of "Suyou 1" [J]. China Poultry, 2017, 39(14): 68-70.
- [8] 徐文娟, 陶志云, 朱春红, 等. 氨气对蛋鸭产蛋性能、蛋品质及产蛋相关基因影响分析[J]. 中国家禽, 2020, 42(12): 75-80.
XU W J, TAO Z Y, ZHU C H, et al. Effect of ammonia on production performance, egg quality and egg production related genes of laying duck[J]. China Poultry, 2020, 42(12): 75-80.
- [9] 陈蓉, 雷明明, 何宗亮, 等. 樱桃谷鸭种公鸭睾丸发育和生殖轴基因表达[J]. 江苏农业学报, 2021, 37(2): 405-411.
CHEN R, LEI M M, HE Z L, et al. Testicular development and expression of reproductive axis genes in Cherry Valley breeding drakes[J]. Jiangsu Journal of Agricultural Sciences, 2021, 37(2): 405-411.
- [10] 赵云翔, 高广雄, 方程, 等. 不同品种公猪睾丸、精液品质发育规律及相关性研究[J]. 中国农业科技导报, 2020, 22(7): 61-68.
ZHAO Y X, GAO G X, FANG C, et al. Developmental rule and correlation of testicular and Semen quality in different breeds of boars[J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2020, 22(7): 61-68.
- [11] 韩枫. 睾丸重量、受精率与体重[J]. 家禽科学, 2005(4): 39-40.

- HAN F. Testicular weight, fertilization rate, and body weight [J]. *Shandong Poultry*, 2005(4):39-40.
- [12] GOMENDIO M, MALO A F, GARDE J, et al. Sperm traits and male fertility in natural populations[J]. *Reproduction*, 2007, 134(1):19-29.
- [13] HURLEY L L, TON R, ROWE M, et al. Longitudinal co-variation of testosterone and sperm quality across reproductive stages in the *Zebra* finch[J]. *Hormones and Behavior*, 2023, 153:105388.
- [14] 陈东峰, 范晓明, 覃永长, 等. 不同品种公猪睾丸体积、精液中睾酮水平及其与精液品质关系的初步研究[J]. *养猪*, 2011(4):39-40.
- CHEN D F, FAN X M, QIN Y C, et al. Preliminary study on relationship among testicular volume, testosterone levels in semen and semen Quality indifferent breeds of boars[J]. *Swine Production*, 2011(4):39-40.
- [15] DU X X, QIN F, AMEVOR F K, et al. Rearing system influences the testicular development, *Semen* quality and spermatogenic cell apoptosis of layer roosters[J]. *Poultry Science*, 2021, 100(8):101158.
- [16] 丁允闽, 叶世隽, 陈咏梅, 等. 大鼠支持细胞生后发育过程中卵泡刺激素受体 mRNA 水平的动态观察[J]. *中国医学科学院学报*, 1996, 18(2):99-103.
- DING Y M, YE S J, CHEN Y M, et al. The postnatal changes of follicle-stimulating hormone receptor mRNA level in rat testis[J]. *Acta Academiae Medicinae Sinicae*, 1996, 18(2):99-103.
- [17] 龙亚丽, 王军乾, 潘阳阳, 等. 牦牛睾丸发育过程中 INH β B、FSHR 和 LHR 的表达差异性分析[J]. *动物医学进展*, 2022, 43(12):43-49.
- LONG Y L, WANG J Q, PAN Y Y, et al. Differential analysis of expressions of INH β B, FSHR and LHR during development of testes in yaks[J]. *Progress in Veterinary Medicine*, 2022, 43(12):43-49.
- [18] EDELSZTEIN N Y, VALERI C, LOVAISA M M, et al. AMH regulation by steroids in the mammalian testis: underlying mechanisms and clinical implications[J]. *Frontiers in Endocrinology*, 2022, 13:906381.
- [19] ESTERMANN M A, MAJOR A T, SMITH C A. Genetic regulation of avian testis development[J]. *Genes*, 2021, 12(9):1459.
- [20] TUGAEVA K V, SLUCHANKO N N. Steroidogenic acute regulatory protein: structure, functioning, and regulation[J]. *Biochemistry. Biokhimiia*, 2019, 84(Suppl 1):233-253.
- [21] MANNA P R, STETSON C L, SLOMINSKI A T, et al. Role of the steroidogenic acute regulatory protein in health and disease[J]. *Endocrine*, 2016, 51(1):7-21.
- [22] JOHNSON A L, SOLOVIEVA E V, BRIDGHAM J T. Relationship between steroidogenic acute regulatory protein expression and progesterone production in hen granulosa cells during follicle development[J]. *Biology of Reproduction*, 2002, 67(4):1313-1320.
- [23] BAUER M P, BRIDGHAM J T, LANGENAU D M, et al. Conservation of steroidogenic acute regulatory (StAR) protein structure and expression in vertebrates[J]. *Molecular and Cellular Endocrinology*, 2000, 168(1-2):119-125.
- [24] TERADA N, NAGASE T, KAYOOKA H, et al. α -Tocotrienol in rice bran enhances steroidogenesis in mouse Leydig cell *via* increased gene expression of steroidogenic acute regulatory protein and induction of its mitochondrial translocation [J]. *Bioscience, Biotechnology, and Biochemistry*, 2024, 88(2):189-195.