

# 林甸鸡腹部脂肪组织发育规律探究

刘捷<sup>1,2,3</sup>, 周迅<sup>1,2,3</sup>, 韩雪<sup>1,2,3</sup>, 周世杰<sup>1,2,3</sup>,  
李玉茂<sup>1,2,3</sup>, 栾鹏<sup>1,2,3</sup>, 李辉<sup>1,2,3</sup>, 王宇祥<sup>1,2,3</sup>, 冷丽<sup>1,2,3\*</sup>

(1. 农业农村部鸡遗传育种重点实验室, 哈尔滨 150030; 2. 黑龙江省普通高等学校动物遗传育种与繁殖重点实验室, 哈尔滨 150030;  
3. 东北农业大学动物科学技术学院, 哈尔滨 150030)

**摘要:** 肉鸡生产过程中腹脂过度沉积会造成生产效率下降等一系列问题。林甸鸡作为优质地方鸡种之一, 产蛋、产肉性能优良, 肉质鲜美, 深受大众喜爱。为探究林甸鸡腹部脂肪组织发育规律, 测定林甸鸡3~22周龄体重及腹脂重, 观察并统计腹部脂肪细胞大小和数量, 分析脂肪细胞特性与腹脂沉积之间关系。结果表明, 林甸鸡在3~22周龄体重持续增长, 腹脂重先升后降再升, 腹脂率先降后升; 3~10周龄脂肪细胞以增生为主, 10~14周龄脂肪细胞以增大占优, 19周龄后脂肪细胞增大和增生同时进行, 但以增大为主。研究初步确定腹脂重与脂肪细胞特性回归模型, 发现脂肪细胞体积对腹脂重的影响最大。试验结果为选育优质特色林甸鸡新品系提供理论参考。

**关键词:** 林甸鸡; 腹脂; 脂肪细胞; 发育规律

中图分类号: S858.31

文献标志码: A

文章编号: 1005-9369(2024)02-0041-08

刘捷, 周迅, 韩雪, 等. 林甸鸡腹部脂肪组织发育规律探究[J]. 东北农业大学学报, 2024, 55(2): 41-48. DOI: 10.19720/j.cnki.issn.1005-9369.2024.02.005.

Liu Jie, Zhou Xun, Han Xue, et al. Exploration of development characteristics of abdominal adipose tissue in Lindian chickens [J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2024, 55(2): 41-48. (in Chinese with English abstract) DOI: 10.19720/j.cnki.issn.1005-9369.2024.02.005.

Exploration of development characteristics of abdominal adipose tissue in Lindian chickens/LIU Jie<sup>1, 2, 3</sup>, ZHOU Xun<sup>1, 2, 3</sup>, HAN Xue<sup>1, 2, 3</sup>, ZHOU Shijie<sup>1, 2, 3</sup>, LI Yumao<sup>1, 2, 3</sup>, LUAN Peng<sup>1, 2, 3</sup>, LI Hui<sup>1, 2, 3</sup>, WANG Yuxiang<sup>1, 2, 3</sup>, LENG Li<sup>1, 2, 3</sup>(1. Key Laboratory of Chicken Genetics and Breeding, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Harbin 150030, China; 2. Key Laboratory of Animal Genetics, Breeding and Reproduction, Education Department of Heilongjiang Province, Harbin 150030, China; 3. School of Animal Science and Technology, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China)

**Abstract:** In the production of broiler chickens, excessive deposition of abdominal fat can lead to series of problems such as decreased production efficiency. As one of the high-quality native chicken breeds, Lindian chickens due to excellent egg and meat production performance, delicious meat are deeply popular by the public. To explore the developmental characteristics of abdominal fat tissue of Lindian chickens, the body weight and abdominal fat weight of Lindian chickens at 3-22 weeks were measured, the size and quantity of abdominal adipocytes were observed and counted, and the relationship between adipocyte characteristics and abdominal fat deposition was analyzed in present study. The results showed that the weight of Lindian chickens continued to increase from 3 to 22 weeks, and the abdominal fat weight first increased, then decreased, and strengthened again. The abdominal

基金项目: 国家重点研发计划子课题(2021YFD1300100)

作者简介: 刘捷(1999-), 女, 硕士研究生, 研究方向为家禽遗传育种。E-mail: jieliu@neau.edu.cn

\*通信作者: 冷丽, 副教授, 博士, 研究方向为家禽遗传育种。E-mail: lengli@neau.edu.cn

fat percentage first decreased and then increased. At 3-10 weeks, adipocytes were proliferated, while at 10-14 weeks, adipocyte enlargement dominated. After 19 weeks, both adipocyte enlargement and proliferation occurred simultaneously, but mainly enlargement. In addition, a regression model between abdominal fat weight and adipocyte characteristics was preliminarily determined in this study, and it was found that adipocyte volume had the better impact on abdominal fat weight. These results would provide theoretical references for the breeding of high-quality and distinctive new strains of Lidian chicken.

**Key words:** Lidian chicken; abdominal fat; adipose cells; development characteristics

肉鸡产业已成为国内外畜牧业不可或缺的一部分,现代商品肉鸡生长速率和肌肉产量经人工选择已显著提高,但选择这些性状的同时也使肉鸡出现体内脂肪过多沉积,特别是腹部脂肪<sup>[1-2]</sup>。适量脂肪有利于肉鸡维持体内能量代谢平衡,过度脂肪沉积可对生产者和消费者造成一定经济损失。多余脂肪在屠宰时被丢弃,大幅降低肉鸡胴体质量,影响消费者接受度<sup>[3]</sup>。肉种鸡腹部脂肪沉积过多,导致饲料转化率、产蛋率和精液质量下降,诱发多种疾病<sup>[4]</sup>。

脂肪组织是拥有多种重要生理功能的器官,可储存脂肪、保护内脏,也是重要的内分泌器官。脂肪组织可产生、整合信号并将其传递给不同组织,通过与其他器官紧密联系,参与脂质代谢、全身能量稳态维持、神经内分泌和免疫等过程<sup>[5]</sup>。脂肪组织与机体健康密不可分,脂肪过度蓄积可引起机体肥胖,发生胰岛素抵抗、高血糖、血脂异常、高血压等代谢综合征<sup>[6]</sup>。脂肪组织生长发育核心基础是脂肪细胞增生和增大,这一过程即为脂肪生成(Adipogenesis)<sup>[7]</sup>。Johnson等开启关于个体正常和异常发育中脂肪组织生长的研究<sup>[8]</sup>,常常利用平均脂肪细胞数量和细胞大小作为评判指标<sup>[9-10]</sup>。脂肪细胞数目增生主要依赖于前脂肪细胞增生,这一过程贯穿于生物体生命始终,为细胞更新、储存多余营养和机体代谢平衡提供物质基础<sup>[11]</sup>。脂肪细胞体积增大主要取决于动物生长过程中成熟脂肪细胞中脂滴积累<sup>[12]</sup>。因此,探究脂肪细胞数量和体积变化有助于了解脂肪组织发育特点。

鸡作为一种具有重要经济价值的家禽,目前被认为是生物医学研究领域的理想实验动物模型<sup>[13]</sup>。禽类脂质合成90%在肝脏中进行,合成后的脂肪通过脂蛋白转运到体内各组织中储存<sup>[14]</sup>。相关研究指出家禽脂肪分布及发育规律可预测其脂肪

沉积程度,有助于提前开展针对性选育,提高其生产性能<sup>[15-16]</sup>。

林甸鸡作为地方优良鸡种,属于蛋肉兼用型品种,具有耐寒、耐粗饲、生命力强等特点。本研究前期曾对林甸鸡绿壳蛋、隐性白、快慢羽、玫瑰冠、鱼腥味等性状展开遗传基础分析<sup>[17-18]</sup>,但未曾对其脂肪组织生长发育规律展开研究。林甸鸡一般于150日龄上市,为预测其在出生后到上市前整个阶段腹脂变化,本研究以3~22周龄林甸鸡为实验动物,以脂肪细胞大小和数量为检测指标,探究林甸鸡脂肪发生规律,旨在揭示林甸鸡生长发育过程中脂肪组织生长特点,为选育优势特色林甸鸡新品系提供一定理论参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 实验动物与组织样采集

本试验选取的林甸鸡来自东北农业大学家禽育种基地,出雏后在相同条件下统一饲养。于3、6、10、14、19和22周龄时随机选取公鸡29~42只,禁食12 h后屠宰。屠宰时测量体重、腹脂重(含肌胃脂)、计算腹脂率(腹脂重:体重),采集腹部脂肪组织,将组织固定于4%多聚甲醛中。

### 1.2 组织学分析

取4%多聚甲醛固定后的脂肪组织进行石蜡切片及HE染色。基本流程简述如下:固定后组织样品用流动自来水冲洗12 h;滤纸擦干后,依次放入系列乙醇30%(1 h)、50%(1 h)、70%(1 h)、80%(1 h)、95%(1 h)、100% I (1 h)、100% II (1.5 h)脱水;脱水后组织放入无水乙醇:二甲苯(1:1)混合液浸泡30 min,再放入二甲苯30 min至完全透明;将组织浸泡于融化的石蜡 I (30 min)、石蜡 II (2 h)、石蜡 III (2.5 h)使石蜡浸入组织中;浸蜡完成后包埋,在包埋框底部注入一薄层石蜡,迅速放入浸蜡后组织块,冷冻数秒,初步固定组

织，继续注入足量石蜡，移至冷冻台，待组织完全固定后于4 ℃保存；待蜡块凝固后进行切片，厚度6 μm，将切片置于37 ℃固定6~12 h。

将组织切片置于玻片架，60 ℃烘箱放置1 h后，使用苏木素-伊红染色试剂盒(北京索莱宝科技有限公司)进行HE染色，中性树胶封片，具体流程参照李辉等方法<sup>[19]</sup>。利用荧光正置显微镜(目镜10×，物镜20×，Eclipse 80i，日本尼康公司)拍照。

1.3 测定脂肪细胞大小和数量

每周龄选5个个体，每个个体选3张切片，每张切片选5个视野，先用Adipo Count软件分割HE染色后的脂肪细胞图片，输出清晰分割图像，利用Image J软件对分割图像进行阈值设置和量化分析<sup>[20]</sup>，测量脂肪细胞面积。将脂肪细胞视为球形，由面积计算出脂肪细胞直径，根据公式 $\bar{V} = \frac{1}{6}\pi(3s^2\bar{d} + \bar{d}^3)$ <sup>[21]</sup>，计算脂肪细胞平均体积( $\bar{V}$ )，其中， $d$ 为平均直径， $s$ 为标准差， $\pi$ 为圆周率；计算腹部脂肪组织中脂

肪细胞数量 $N = W/\rho\bar{V}$ <sup>[22]</sup>，其中： $W$ 为腹脂重量， $\bar{V}$ 为脂肪细胞平均体积， $\rho$ 为脂质密度(0.915)。

1.4 统计分析

使用Excel 2019整理数据，计算平均值与标准误；使用SPSS 27.0进行单因素方差分析、多重比较、回归分析；结果以平均值±标准误表示， $P<0.05$ 表示差异显著， $P<0.01$ 表示差异极显著。

2 结果与分析

2.1 林甸鸡体重及腹脂性状变化趋势

比较分析林甸鸡3~22周龄的体重、腹脂重、腹脂率。结果如表1、图1所示，体重在3~22周龄始终呈极显著增长趋势( $P<0.01$ )；腹脂重在3~10周龄呈增长趋势，14周龄下降，而后又持续增长，整体呈增长趋势，多个周龄间达到显著或极显著差异( $P<0.05$ 或 $P<0.01$ )；腹脂率在3~14周龄持续下降，14周龄后呈上升趋势，多个周龄间达到显著或极显著差异( $P<0.05$ 或 $P<0.01$ )。

表 1 林甸鸡 3~22 周龄体重、腹脂重、腹脂率变化规律

Table 1 Changes in body weight, abdominal fat weight, and abdominal fat percentage in 3~22 weeks Lindian chickens

| 周龄<br>Weeks | 体重(g)<br>Weight | 腹脂重(g)<br>Abdominal fat weight | 腹脂率(%)<br>Abdominal fat percentage |
|-------------|-----------------|--------------------------------|------------------------------------|
| 3           | 174.10±3.75F    | 1.60±0.14Ee                    | 0.90±0.07Aa                        |
| 6           | 382.48±8.25E    | 2.70±0.25Dd                    | 0.69±0.06ABabc                     |
| 10          | 851.82±12.34D   | 4.95±0.55BCc                   | 0.58±0.06ABbc                      |
| 14          | 1 164.26±19.18C | 2.99±0.28CDd                   | 0.26±0.02Cd                        |
| 19          | 1 569.76±13.88B | 7.98±0.78Bb                    | 0.51±0.05Bc                        |
| 22          | 1 738.07±23.47A | 13.92±1.00Aa                   | 0.81±0.06Aab                       |

注：同列不同小写字母表示差异显著( $P<0.05$ )，不同大写字母表示差异极显著( $P<0.01$ )。

Note: Different lowercase letters in the same column indicate significant differences ( $P<0.05$ ), while different uppercase letters indicate extremely significant differences ( $P<0.01$ ).

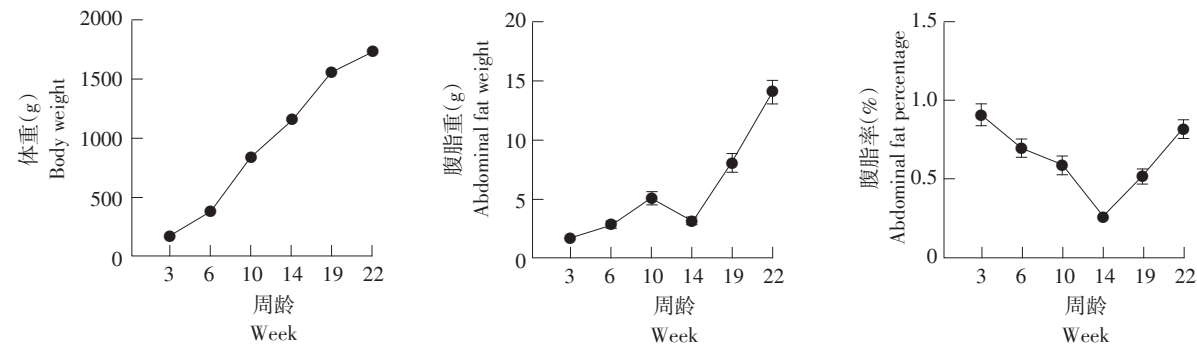


图 1 林甸鸡 3~22 周龄体重、腹脂重、腹脂率变化趋势

Fig. 1 Trend of changes in body weight, abdominal fat weight and abdominal fat percentage of 3~22 weeks Lindian chickens

## 2.2 林甸鸡脂肪细胞形态学分析及直径分布

林甸鸡3~22周龄腹部脂肪组织中脂肪细胞形态学结果如图2所示。3周龄时,腹部脂肪组织中小脂肪细胞成簇、密集分布;6周龄时,脂肪细胞迅速增大,数量减少;10周龄时,脂肪细胞体积明显变

小,与3周龄时持平,单位面积内的脂肪细胞数量显著增多;14~22周龄脂肪细胞体积明显增大,单位面积内脂肪细胞数量减少。为探究脂肪细胞大小分布规律,本研究统计不同周龄不同直径脂肪细胞数量占总脂肪细胞数比例,结果如图3所示。

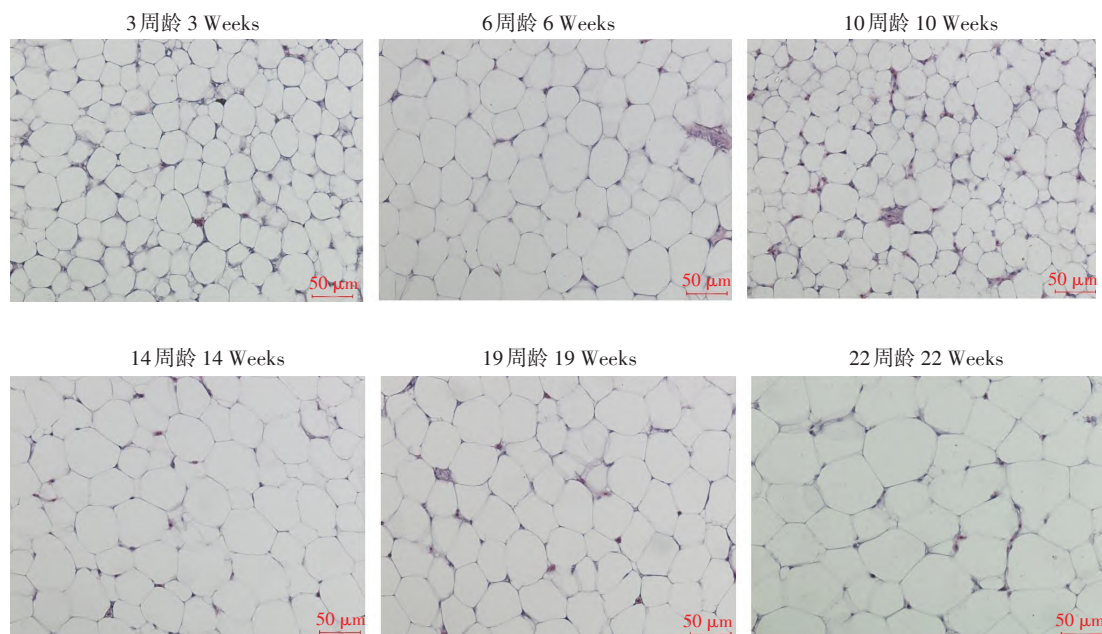


图2 不同周龄脂肪细胞形态学变化

Fig.2 Morphological changes of adipocytes at different weeks

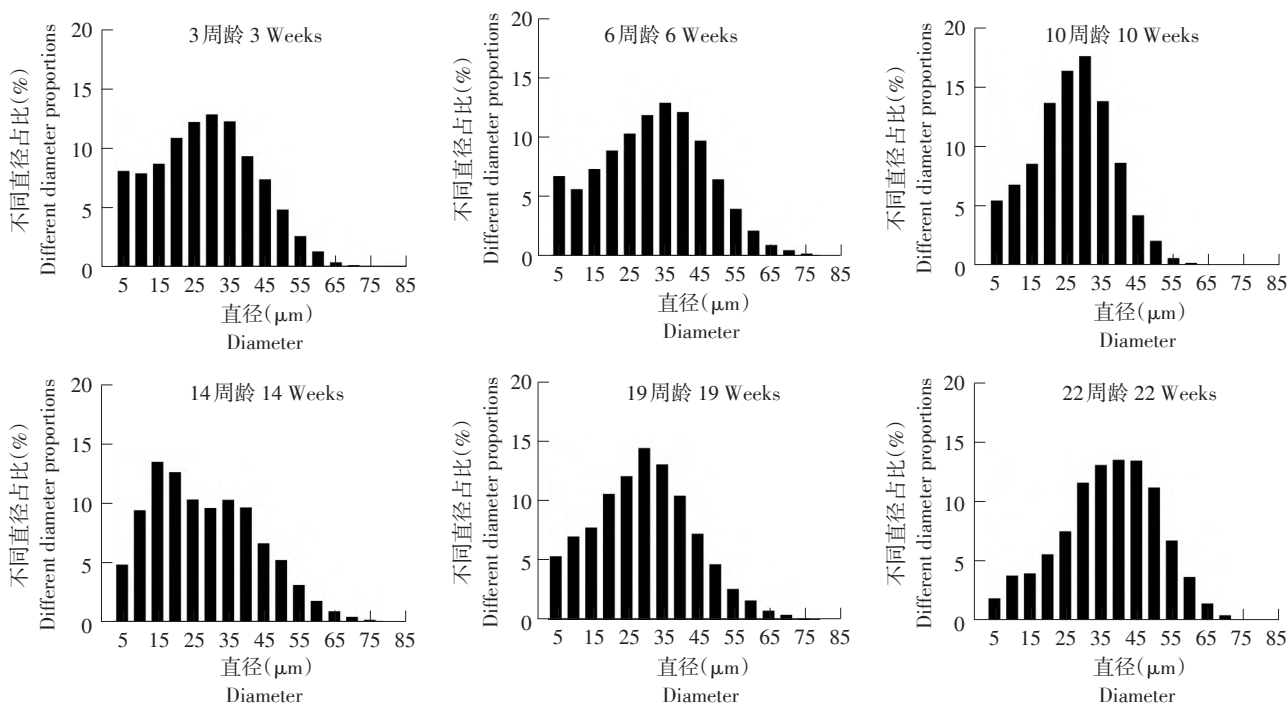


图3 不同周龄脂肪细胞直径分布规律

Fig. 3 Distribution pattern of adipocyte diameter at different weeks

由图3可知, 3周龄时, 直径25  $\mu\text{m}$ 以下脂肪细胞占比48.26%, 65  $\mu\text{m}$ 以上脂肪细胞占比0.63%; 6周龄时, 直径25  $\mu\text{m}$ 以下脂肪细胞占比38.96%, 65  $\mu\text{m}$ 以上脂肪细胞占比1.76%; 10周龄时, 直径25  $\mu\text{m}$ 以下脂肪细胞占比51.79%, 65  $\mu\text{m}$ 以上脂肪细胞占比0.07%; 14周龄时, 直径25  $\mu\text{m}$ 以下脂肪细胞占比51.28%, 65  $\mu\text{m}$ 以上脂肪细胞占比1.71%; 19周龄时, 直径25  $\mu\text{m}$ 以下脂肪细胞占比43.45%, 65  $\mu\text{m}$ 以上脂肪细胞占比1.53%; 22周龄时, 直径25  $\mu\text{m}$ 以下脂肪细胞占比23.25%, 65  $\mu\text{m}$ 以上脂肪细胞占比2.28%。

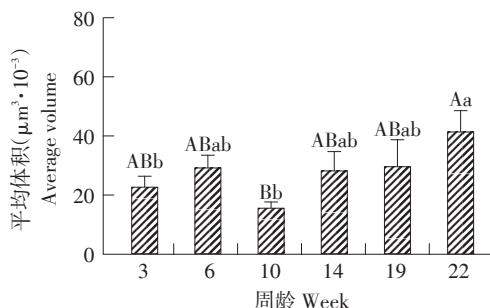
### 2.3 林甸鸡脂肪细胞大小变化规律

平均体积是衡量细胞大小常用指标, 本研究

利用脂肪细胞平均直径计算3~22周龄林甸鸡脂肪细胞平均体积。结果显示, 除10周龄外, 随周龄增加脂肪细胞的平均体积逐渐增大。其中3周龄与22周龄平均体积差异显著( $P<0.05$ ), 10周龄与22周龄平均体积差异极显著( $P<0.01$ , 见图4)。

### 2.4 林甸鸡脂肪细胞数量的变化规律分析

为更好分析脂肪细胞发育对腹脂沉积的影响, 本研究利用脂肪细胞平均体积及腹部脂肪重量计算3~22周龄林甸鸡脂肪细胞数量。结果显示, 随周龄增加脂肪细胞数量逐渐增加, 其中10周龄脂肪细胞数量增加最明显, 并且多个时间点间脂肪细胞数量差异显著或极显著( $P<0.05$ 或 $P<0.01$ ), 结果如图5所示。



不同小写字母表示差异显著( $P<0.05$ ), 不同大写字母表示差异极显著( $P<0.01$ )。下同。

Different lowercase letters indicate significant differences ( $P<0.05$ ), while different uppercase letters indicate extremely significant differences ( $P<0.01$ ). The same as below.

图4 不同周龄脂肪细胞平均体积变化

Fig. 4 Changes in average volume of adipocytes at different weeks

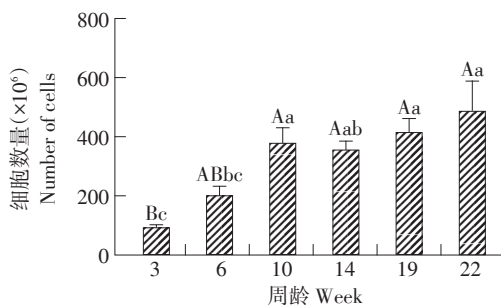


图5 不同周龄脂肪细胞数量变化

Fig. 5 Changes in the number of adipocytes at different weeks

### 2.5 林甸鸡脂肪细胞特性与腹脂重回归分析

为探究林甸鸡脂肪细胞特性与腹脂性状关系, 本研究针对脂肪细胞体积、数量、腹脂重进行回归分析。结果如表2所示, 腹脂重与脂肪细胞体积和数量回归方程可表示为腹脂重=0.346×体积+0.023×数量-8.964。回归方程拟合度 $R^2$ 为0.935, 对回归方程进行 $F$ 检验, 达极显著水平( $P<0.01$ ), 说

明模型可靠。共线性诊断结果显示, 膨胀系数(Variance inflation factor, VIF)小于5, 说明变量间不存在共线性。对回归系数进行 $t$ 检验发现同样为极显著水平( $P<0.01$ ), 说明脂肪细胞体积和数量对腹脂重确实存在一定影响。其中脂肪细胞体积的回归系数高于脂肪细胞数量, 说明脂肪细胞体积对腹脂重的影响要高于脂肪细胞数量。

表2 林甸鸡腹脂重回归分析

Table 2 Regression analysis of abdominal fat weight in Lindian chickens

| 项目<br>Item  | 参数±标准误<br>Parameter±SE | <i>t</i>                   | <i>P</i> | VIF   |
|-------------|------------------------|----------------------------|----------|-------|
| 常数 Constant | -8.964±0.925           | -9.693                     | 0.000**  | —     |
| 体积 Volume   | 0.346±0.022            | 15.994                     | 0.000**  | 1.005 |
| 数量 Number   | 0.023±0.002            | 12.569                     | 0.000**  | 1.005 |
| $R^2$       |                        | 0.935                      |          |       |
| $F$         |                        | $F(2,27)=194.078, P=0.000$ |          |       |

注: \*\*表示  $P<0.01$ 。

Note: \*\*indicates  $P<0.01$ .

### 3 讨 论

人工选择有效提高肉鸡体重、生长速度和饲料转化率,同时也导致脂肪沉积过量,尤其是腹部脂肪。较白羽肉鸡而言,黄羽肉鸡腹脂率更高,一般可达4%~8%<sup>[23]</sup>。探究脂肪组织发育规律有助于解决脂肪过度沉积问题。脂肪组织具有异质性,除占比较多的脂肪细胞外还包括前脂肪细胞、成纤维细胞、内皮细胞等多种细胞类型<sup>[24]</sup>,脂肪细胞增殖分化及细胞内脂滴合成导致脂肪沉积。为更好探究黄羽肉鸡脂肪组织发育规律,本研究以3~22周龄林甸鸡腹部脂肪组织为研究对象,利用组织学方法分析脂肪细胞大小和数量变化规律,推测林甸鸡腹部脂肪发育特点。

本研究通过收集3~22周龄林甸鸡体重、腹脂重、腹脂率表型数据发现,体重随生长持续上升;腹脂重在3~10周龄前上升,14周龄降低,之后持续上升;腹脂率在3~14周龄前下降,之后持续上升。张颖等测定文昌鸡母鸡腹脂率发现,其腹脂率持续上升<sup>[25]</sup>;Simon等对高低脂系肉鸡研究报道,9周龄后母鸡腹脂重和腹脂率一直增加,公鸡则有下降趋势<sup>[15]</sup>。与本研究结果不同,推测品种差异可能是导致林甸鸡与其他品种脂肪沉积规律不同的主要原因,公鸡腹脂性状伴随周龄增加出现下降可能与雄性激素分泌有关。

为了解林甸鸡脂肪细胞分布特点,本研究统计3~22周龄不同直径脂肪细胞占比。结果显示,3和10周龄时,25  $\mu\text{m}$ 以下脂肪细胞占比较多,65  $\mu\text{m}$ 以上占比少,说明此阶段脂肪细胞增生占主导地位;14周龄时,25  $\mu\text{m}$ 以下和65  $\mu\text{m}$ 脂肪细胞数占比同时增多,说明此阶段脂肪细胞增生的同

时,原有脂肪细胞也在增大;19和22周龄时,25  $\mu\text{m}$ 以下脂肪细胞数量减少,65  $\mu\text{m}$ 以上脂肪细胞占比多,说明脂肪细胞在此阶段以增大为主。这一现象说明,脂肪细胞存在不均一性,随个体脂肪组织发育,脂肪细胞在不断增大增多,Covera的研究也证明这一现象<sup>[26]</sup>。Sinnott等在统计小鼠附睾脂肪细胞分布时发现双峰分布现象,认为这种双峰分布可能是由现有脂肪细胞增大和新生小脂肪细胞增多同时出现导致,在低脂个体中这种现象并不明显<sup>[27]</sup>。本研究在14周龄时发现类似现象,在15和35  $\mu\text{m}$ 均出现峰值,推测此阶段在现有脂肪细胞增大同时,出现新一轮脂肪细胞增生。

为进一步探究林甸鸡脂肪组织发育规律,统计脂肪细胞体积和数量。整体看,随林甸鸡生长发育,脂肪细胞体积和数量也随之增加。其中,脂肪细胞数量在3~10周龄增长显著,脂肪细胞平均体积在10周龄时下降,说明脂肪细胞3~10周龄期间以增生为主;14周龄时,脂肪细胞数量略有下降,但脂肪细胞体积增加,说明此阶段以增大为主;14~22周龄脂肪细胞数量和体积均在增长,脂肪细胞体积在22周龄增长明显,说明19周龄后脂肪细胞增大和增生同时进行,以增大为主。这一规律与前人研究有所差异,Hood发现,Tegel TM70白羽肉鸡14周龄前脂肪组织生成主要因脂肪细胞增生和体积增大,14周龄后以体积增大为主<sup>[28]</sup>。本研究中,14周龄前脂肪细胞增生和体积增大交替进行,甚至在6~10周龄脂肪细胞体积和10~14周龄脂肪细胞数量出现下降。Guo等在高低脂系肉鸡脂肪组织发育比较研究中发现,高脂系肉鸡成熟脂肪细胞增大主要发生于5周龄之前,5周龄后成熟脂肪细胞大小不变,腹脂量增多主要是

因为脂肪细胞数目增生; 低脂系肉鸡成熟脂肪细胞数目增生主要发生于5周龄前, 5周龄后脂肪细胞数目不再变化, 腹脂量增多主要是因为细胞体积增大<sup>[29]</sup>。可见, 脂肪组织发育特征与品种、饲养环境以及遗传选择均有较大关系。

为探究脂肪细胞特性与腹脂重间关系, 本研究确定脂肪细胞特性与腹脂重回归模型。其中, 脂肪细胞体积回归系数高于脂肪细胞数量, 说明脂肪细胞体积变化对腹脂重的影响大于脂肪细胞数量。研究结果表明, 在生长发育阶段, 脂肪细胞大小和数量均在增长, 未出现平台期, 说明二者可能共同影响脂肪组织发育; 但后期脂肪细胞体积增长更快, 暗示22周龄后脂肪细胞数量可能会趋于不变, 以脂肪细胞体积增大为主。

## 4 结 论

林甸鸡随着生长发育, 体重呈增长趋势, 腹脂重呈先升后降再升趋势, 腹脂率先降后升。腹部脂肪组织中脂肪细胞体积和数量整体呈增长趋势。其中, 3~10周龄脂肪细胞以增生为主, 10~14周龄以脂肪细胞增大占优, 19周龄后脂肪细胞增大和增生同时进行, 但以增大为主。此外, 脂肪细胞体积对腹脂重的影响要大于脂肪细胞数量。

## [ 参 考 文 献 ]

- [1] Guo L, Huang W, Zhang S, et al. Chicken protein S gene regulates adipogenesis and affects abdominal fat deposition[J]. *Animals*, 2022, 12(16): 2046.
- [2] 李辉, 陈冲, 冷丽, 等. 肉鸡屠体脂肪含量间接选择方法及其效果评估[J]. *东北农业大学学报*, 2020, 51(8): 39–46.
- [3] Fouad A M, El-Senousey H K. Nutritional factors affecting abdominal fat deposition in poultry: A review[J]. *Asian-Australasian Journal of Animal Sciences*, 2014, 27(7): 1057–1068.
- [4] Zhu Y, Liu X, Wang Y, et al. Genome-wide association study revealed the effect of rs312715211 in ZNF652 gene on abdominal fat percentage of chickens[J]. *Biology*, 2022, 11(12): 1849.
- [5] Murawska-Ciałowicz E. Adipose tissue-morphological and biochemical characteristic of different depots[J]. *Postępy Higieny i Medycyny Doswiadczalnej*, 2017, 71: 466–484.
- [6] Grundy S M, Brewer H B, Cleeman J I, et al. Definition of metabolic syndrome: Report of the national heart, lung, and blood institute/American heart association conference on scientific issues related to definition[J]. *Circulation*, 2004, 109(3): 433–438.
- [7] Cartwright A L. Adipose cellularity in gallus domesticus: Investigations to control body composition in growing chickens[J]. *The Journal of Nutrition*, 1991, 121(9): 1486–1497.
- [8] Johnson P R, Hirsch J. Cellularity of adipose depots in six strains of genetically obese mice[J]. *Journal of Lipid Research*, 1972, 13(1): 2–11.
- [9] Spalding K L, Arner E, Westermark P O, et al. Dynamics of fat cell turnover in humans[J]. *Nature*, 2008, 453(7196): 783–787.
- [10] McLaughlin T, Sherman A, Tsao P, et al. Enhanced proportion of small adipose cells in insulin-resistant vs insulin-sensitive obese individuals implicates impaired adipogenesis[J]. *Diabetologia*, 2007, 50(8): 1707–1715.
- [11] Avram M M, Avram A S, James W D. Subcutaneous fat in normal and diseased states 3. Adipogenesis: From stem cell to fat cell[J]. *Journal of the American Academy of Dermatology*, 2007, 56(3): 472–492.
- [12] Ali A T, Hochfeld W E, Myburgh R, et al. Adipocyte and adipogenesis[J]. *European Journal of Cell Biology*, 2013, 92(6–7): 229–236.
- [13] Resnyk C W, Carré W, Wang X, et al. Transcriptional analysis of abdominal fat in genetically fat and lean chickens reveals adipokines, lipogenic genes and a link between hemostasis and leanness[J]. *BMC Genomics*, 2013, 14: 557.
- [14] Cui H, Zheng M, Zhao G, et al. Identification of differentially expressed genes and pathways for intramuscular fat metabolism between breast and thigh tissues of chickens[J]. *BMC Genomics*, 2018, 19(1): 55.
- [15] Simon J, Leclercq B. Longitudinal study of adiposity in chickens selected for high or low abdominal fat content: Further evidence of a glucose-insulin imbalance in the fat line[J]. *The Journal of Nutrition*, 1982, 112(10): 1961–1973.
- [16] 顾志良, 赵万里, 周勤宜. 肉鸡脂肪沉积规律的研究[J]. *中国家禽*, 1993(1): 24–27.
- [17] 张元良, 王志鹏, 邱家维, 等. 林甸鸡绿壳蛋、隐性白、快慢羽性状的遗传基础分析[J]. *中国家禽*, 2015, 37(17): 5–11.
- [18] 邱家维, 王志鹏, 张元良, 等. 林甸鸡玫瑰冠、鱼腥味和矮小性状的遗传基础分析[J]. *中国家禽*, 2015, 37(14): 7–12.
- [19] 李辉, 李叶宁, 周思彤, 等. 高、低脂系肉鸡睾丸组织形态和氧化应激水平比较分析[J]. *东北农业大学学报*, 2023, 54(6): 35–41, 96.

- [20] Hu Y, Yu J, Cui X, et al. Combination usage of AdipoCount and Image-Pro Plus/ImageJ software for quantification of adipocyte sizes[J]. *Frontiers in Endocrinology*, 2021, 12: 642000.
- [21] Sjöström L, Björntorp P, Vråna J. Microscopic fat cellsize measurements on frozen-cut adipose tissue in comparison with automatic determinations of osmium-fixed fat cells[J]. *Journal of Lipid Research*, 1971, 12(5): 521-530.
- [22] 李琳, 刘丽婷, 段艳宇, 等. 猪腹脂脂肪细胞大小、数量及其与脂肪沉积能力和脂肪酸组成的相关性研究[J]. *中国畜牧杂志*, 2010, 46(21): 16-19.
- [23] 郎倩倩, 肖昊, 王丽, 等. 优质鸡腹脂选择方法研究进展[J]. *广东农业科学*, 2019, 46(9): 120-127.
- [24] Hauner H. Secretory factors from human adipose tissue and their functional role[J]. *Proceedings of the Nutrition Society*, 2005, 64(2): 163-169.
- [25] 张颖, 王颖, 吴红芬, 等. 文昌鸡体脂分布及沉积规律的研究[J]. *热带生物学报*, 2022, 13(3): 297-299.
- [26] Corvera S. Cellular heterogeneity in adipose tissues[J]. *Annual Review of Physiology*, 2021, 83: 257-278.
- [27] Sinnott-Smith P A, Waddington D. Size distribution of adipocytes and variation in adipocyte number in lines of mice selected for high or low body fat[J]. *Comparative Biochemistry and Physiology*, 1992, 102(3): 573-578.
- [28] Hood R L. The cellular basis for growth of the abdominal fat pad in broiler-type chickens[J]. *Poultry Science*, 1982, 61(1): 117-121.
- [29] Guo L, Sun B, Shang Z, et al. Comparison of adipose tissue cellularity in chicken lines divergently selected for fatness[J]. *Poultry Science*, 2011, 90(9): 2024-2034.