

闫翹楚, 林清, 冯雪燕, 苏展勤, 吴细波, 司景磊, 张哲, 李加琪. 长白猪群体生长性状的遗传参数及进展分析 [J]. 广东农业科学, 2022, 49 ( 10 ): 112–117.

## 长白猪群体生长性状的遗传参数及进展分析

闫翹楚<sup>1</sup>, 林清<sup>1</sup>, 冯雪燕<sup>1</sup>, 苏展勤<sup>1</sup>, 吴细波<sup>2</sup>, 司景磊<sup>2</sup>, 张哲<sup>1</sup>, 李加琪<sup>1</sup>

(1. 华南农业大学动物科学学院 / 国家生猪种业工程技术研究中心, 广东 广州 510642;

2. 广西农垦永新畜牧集团有限公司, 广西 南宁 530022)

**摘要:**【目的】对长白猪达 100 kg 体重日龄 (DAYS\_100)、达 100 kg 体重日增重 (ADG\_100)、达 100 kg 体重眼肌面积 (LMA\_100) 和达 100 kg 体重背膘厚 (BFT\_100) 4 个性状进行遗传参数估计, 分析性状间的相关性及遗传和表型进展, 为目标群体的遗传改良提供依据。【方法】收集广西某猪场核心育种群长白猪 2002—2020 年的生长性状测定记录, 利用 R 软件对影响长白猪生长性状的因素进行固定效应分析, 运用 DMU 软件和多性状动物模型估计 4 个性状的群体遗传参数, 同时评估这些性状间的遗传相关和表型相关以及遗传进展和表型进展。【结果】长白猪 DAYS\_100、ADG\_100、LMA\_100 和 BFT\_100 的估计遗传力分别为 0.399、0.391、0.433 和 0.421, 均属于中高遗传力。性状 DAYS\_100 和 ADG\_100 的遗传及表型相关呈极度负相关, 相关系数分别为 -0.997 和 -0.992。DAYS\_100 表型趋势总体呈上升趋势, 其余 3 个性状呈下降趋势; ADG\_100 和 BFT\_100 遗传趋势总体呈现上升趋势, DAYS\_100 和 LMA\_100 的遗传趋势总体呈现下降趋势。【结论】长白猪 4 个生长性状均为中高遗传力性状, 可通过直接选择加快遗传进展。DAYS\_100 和 ADG\_100 性状间的相关性较强。猪场的表型测定管理及群体育种目标性状的选择对猪群生长性状的表现有影响。此外, 养殖场生产管理水平的提高和品种品系结构的变化也可能会影响遗传进展。

**关键词:** 长白猪; 生长性状; 遗传进展; 多性状动物模型; 遗传力; 遗传相关; 估计育种值

中图分类号: S828

文献标志码: A

文章编号: 1004-874X (2022) 10-0112-06

## Genetic Parameters and Genetic Progress of Growth Traits in a Landrace Pig Population

YAN Qiaochu<sup>1</sup>, LIN Qing<sup>1</sup>, FENG Xueyan<sup>1</sup>, SU Zhanqin<sup>1</sup>, WU Xibo<sup>2</sup>,

SI Jinglei<sup>2</sup>, ZHANG Zhe<sup>1</sup>, LI Jiaqi<sup>1</sup>

(1. College of Animal Science, South China Agricultural University /

National Engineering Research Center for Breeding Swine Industry, Guangzhou 510642, China;

2. Guangxi State Farms Yongxin Animal Husbandry Group Co., Ltd., Nanning 530022, China)

**Abstract:** 【Objective】Four genetic parameters including days to 100 kg (DAYS\_100), average daily gain (ADG\_100), loin muscle area (LMA\_100) and average back fat thickness (BFT\_100) at 100 kg body weight in a Landrace pig population were estimated, and the correlations between traits as well as genetic and phenotypic progress of the four traits were analyzed, which could provide a basis for the genetic improvement of the target population. 【Method】Records of growth traits of Landrace pigs were collected in a core breeding pig farm in Guangxi from 2002 to 2020. A fixed effect analysis on the factors affecting the growth traits of Landrace pigs was conducted by R software. In addition, the genetic parameters of the four

收稿日期: 2022-07-05

基金项目: 国家现代生猪产业技术体系项目 (CARS-35)

作者简介: 闫翹楚 (2000—), 女, 在读本科生, 研究方向为动物科学, E-mail: 963489302@qq.com

通信作者: 李加琪 (1965—), 男, 博士, 教授, 研究方向为动物遗传育种与繁殖, E-mail: jqli@scau.edu.cn

traits were estimated with DMU software and a multi-trait animal model. Furthermore, the genetic correlations and phenotypic correlations between these traits, genetic progress and phenotypic progress were evaluated. 【Result】 The estimated heritability for the four growth traits of Landrace pigs, including DAYS\_100, ADG\_100, LMA\_100 and BFT\_100 were 0.399, 0.391, 0.433 and 0.421, respectively, and all of them had medium to high heritability. Both genetic correlation and phenotypic correlation between DAYS\_100 and ADG\_100 were significantly negative, with correlation coefficient  $-0.997$  and  $-0.992$ , respectively. In general, the phenotypic trend of DAYS\_100 was rising while the phenotypic trends of ADG\_100, LMA\_100 and BFT\_100 were declining; the genetic trends of ADG\_100 and BFT\_100 showed an overall upward trend while the trends of DAYS\_100 and LMA\_100 were generally downward. 【Conclusion】 The four growth traits of Landrace pigs are medium-high heritability traits, therefore, their genetic progress can be accelerated through direct selection. There is a strong correlation between DAYS\_100 and ADG\_100. The management of phenotypic measurement of pig farms and the selection of target traits for pig population breeding have an important impact on the performance of growth traits. In addition, the improvements in farm production management and changes in breed structure may influence genetic progress.

**Key words:** Landrace pig; growth trait; genetic progress; multi-trait animal model; heritability; genetic correlation; estimated breeding value

【研究意义】遗传评估是猪遗传育种工作的重要环节, 是对种猪进行准确选择的依据<sup>[1]</sup>。遗传参数估计作为遗传评估工作的重要依据之一<sup>[2]</sup>, 在育种规划决策和育种目标规划、育种值估计中具有重大意义<sup>[3-4]</sup>。遗传参数是反映群体总体遗传特征的参数, 描述数量性状的3个基本遗传参数分别是遗传力、重复力和遗传相关。猪的数量性状包括繁殖性状、胴体性状、肉质性状和生长性状等, 其中生长性状包括达目标体重日龄、平均日增重、活体背膘厚和眼肌面积等性状。作为一类重要的经济性性状, 猪生长性状的表达对企业的经济效益影响较大<sup>[5]</sup>。平均日增重和达目标体重日龄反映了猪的发育情况和生长速度, 影响企业的养殖成本和经济收益。在种猪生产性能的测定方面, 达100 kg体重背膘厚和达100 kg体重眼肌面积已被纳入全国种猪遗传评估方案的生长性能测定项目。背膘厚和眼肌面积能够较为客观地反映种猪肌肉的生长发育情况, 此外, 背膘厚还能反映母猪体况, 为饲养阶段的划分和饲料营养的调控提供参考<sup>[6]</sup>。【前人研究进展】当前在猪遗传繁育体系中, 长白猪因其良好的繁殖性能常用作二元杂母本。作为瘦肉型种猪, 长白猪生长性能优异, 与地方猪种杂交能发挥杂种优势<sup>[7]</sup>。如以长白猪为父本、金华猪为母本杂交育成的长金猪背膘厚明显小于以巴克夏猪为父本、金华猪为母本杂交育成的巴金猪<sup>[8]</sup>。大白猪和长白猪遗传力的相关研究<sup>[9]</sup>结果显示, 达100 kg体重日龄、日增重和背膘厚性状属于中高遗传力性状。在对猪生长性

状遗传相关研究中, 长白猪达目标体重日龄和达目标体重平均日增重遗传相关性较强且为负遗传相关<sup>[2,9]</sup>。【本研究切入点】目前, 在对长白猪生长性状遗传参数的研究中, 有关达100 kg体重日龄、日增重和背膘厚的研究<sup>[9]</sup>较多, 但对与产肉性能密切相关的性状, 如达100 kg体重眼肌面积的研究较少。因此, 对长白猪关键生长性状, 如达100 kg体重日龄、达100 kg体重眼肌面积等进行遗传参数评估, 有利于为实施精准选种选育、开展准确的遗传评估提供参考。

【拟解决的关键问题】本研究基于2002—2020年间广西某猪场核心育种群长白猪的性能测定记录, 利用R软件<sup>[10]</sup>分析与生长性状有关的固定效应, 利用DMU软件<sup>[11-12]</sup>估计相关性状的遗传参数和育种值, 同时评估性状的表型进展和遗传进展趋势, 以期为长白猪后续育种工作提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 数据来源及处理

选取来自广西某猪场核心育种群长白猪2002—2020年间共计41 490条生长性能测定记录, 性状包括达100 kg体重日龄(DAYS\_100)、达100 kg体重日增重(ADG\_100)、达100 kg体重眼肌面积(LMA\_100)和达100 kg体重背膘厚(BFT\_100), 以及测定场、出生日期、性别、出生胎次和系谱等信息。

为确保后续分析的可靠性, 剔除原始数据的异常值, 包括系谱中胎次为0记录的异常个

体、表型均值  $\mu \pm 3\sigma^2$  之外的个体、测定场小于 1 500 条记录的个体。为确定出生年份和季度对表型的影响,将出生季节分为春季(3—5月)、夏季(6—8月)、秋季(9—11月)和冬季(12月至次年2月),出生胎次分为1、2、3、4、5、6胎及6胎以上。

1.2 统计模型

1.2.1 固定效应显著性检验 利用 R 软件<sup>[10]</sup>的 aov 函数对测定场、出生年份、出生季节、性别和出生胎次 5 个因素分别进行方差分析,确定各生长性状的固定效应和随机效应。分析模型如下:

$$y_{ijklmn} = \mu + H_i + Y_j + S_k + SEX_l + P_m + e_{ijklmn}$$

式中,  $y_{ijklmn}$  为第  $n$  个种猪生长性状表型值,  $\mu$  为群体均值,  $H_i$  为测定场次效应,  $Y_j$  为出生年份效应,  $S_k$  为出生季节效应,  $SEX_l$  为性别效应,  $P_m$  为出生胎次效应,  $e_{ijklmn}$  为个体随机残差;  $i$ 、 $j$ 、 $k$ 、 $l$ 、 $m$ 、 $n$  分别为不同固定因素的水平。

1.2.2 遗传参数和育种值估计模型 利用 DMU 软件<sup>[11-12]</sup>的多性状动物模型,通过平均信息法估计遗传参数和育种值。分析模型如下:

$$y = Xb + Za + e$$

式中,  $y$  为种猪个体生长性状的观测值向量,  $b$  为种猪个体固定效应向量(测定场、出生年份、出生季节、性别、出生胎次),  $a$  为种猪个体加性遗传值向量,  $e$  为随机残差向量,  $X$ 、 $Z$  分别为对应于  $b$ 、 $a$  的结构矩阵。其中,  $a \sim N(0, A\sigma_a^2)$ ,  $e \sim N(0, I\sigma_e^2)$ ,  $A$  为基于系谱的个体间亲缘关系矩阵,  $\sigma_a^2$  为个体加性遗传方差,  $I$  为单位矩阵,  $\sigma_e^2$  为残差方差。

2 结果与分析

2.1 表型数据描述性统计

本研究对长白猪种猪共 41 490 条原始记录经过数据质控处理,性状 DAYS\_100、ADG\_100、LMA\_100 和 BFT\_100 的记录数均达到 30 000 条以上,表型平均值分别为 169.43 d、584.49 g、38.16 cm<sup>2</sup> 和 11.42 mm(表 1)。性状 DAYS\_100 和 ADG\_100 的变异系数较小,在 7.97%~8.02% 之间, BFT\_100 的变异系数较大,为 18.21%。

对各固定效应进行方差分析,结果(表 2)发现测定场、出生年份、出生季节、性别和出生胎次均对性状 DAYS\_100、ADG\_100、LMA\_100 和 BFT\_100 存在极显著影响( $P < 0.01$ )。

表 1 长白猪群体达 100 kg 体重生长性状表型统计性描述  
Table 1 Descriptive statistics of the phenotype for growth traits of Landrace pigs population at 100 kg body weight

性状 Trait	平均值 Mean	标准差 SD	最小值 Min.	最大值 Max.	变异系数 CV (%)	记录数 Number of records
DAYS_100 (d)	169.43	13.58	127.82	211.77	8.02	34 699
ADG_100 (g)	584.49	46.60	443.78	725.74	7.97	34 828
LMA_100 (cm <sup>2</sup> )	38.16	4.91	23.27	52.93	12.87	30 609
BFT_100 (mm)	11.42	2.08	4.87	18.12	18.21	34 610

表 2 长白猪群体达 100 kg 体重生长性状方差分析  $F$  值  
Table 2  $F$  value in the variance analysis for growth traits of Landrace pigs population at 100 kg body weight

因素 Factor	自由度 $df$	DAYS_100	ADG_100	LMA_100	BFT_100
测定场 Farm	4	1 563.68**	1 646.72**	7 396.57**	282.29**
出生年份 Birth year	18	210.26**	208.33**	464.23**	127.03**
出生季节 Birth season	3	49.53**	57.63**	129.63**	47.72**
性别 Sex	1	2 631.24**	2 807.81**	856.08**	420.02**
出生胎次 Parity	6	94.85**	93.48**	51.16**	19.89**

注: “\*\*” “\*” 分别表示固定效应达到极显著( $P < 0.01$ )、显著( $P < 0.05$ )水平。

Note: “\*\*” and “\*” indicate an extremely significant fixed effect at  $P < 0.01$  and a significant fixed effect at  $P < 0.05$ , respectively.

2.2 遗传参数估计

由表 3 可知,长白猪生长性状均在正常范围内, DAYS\_100、ADG\_100、LMA\_100 和 BFT\_100 的遗传力分别为 0.399、0.391、0.433 和 0.421,均为中高遗传力性状。由表 4 可知,性状 DAYS\_100 和 ADG\_100 的遗传相关系数为 -0.997,表型相关系数为 -0.992。其他生长性状之间的遗传相关系数和表型相关系数均很小。

表 3 长白猪群体达 100 kg 体重生长性状方差组分及估计遗传力  
Table 3 Variance components and estimated heritability for growth traits of Landrace pigs population at 100 kg body weight

项目 Item	DAYS_100	ADG_100	LMA_100	BFT_100
$\sigma_a^2$	58.865 (2.308)	652.813 (25.571)	5.016 (0.201)	1.692 (0.065)
$\sigma_e^2$	88.648 (1.477)	1 018.821 (16.516)	6.556 (0.124)	2.325 (0.041)
$\sigma_p^2$	147.513	1671.634	11.572	4.017
$h^2$	0.399 (0.013)	0.391 (0.013)	0.433 (0.014)	0.421 (0.013)

注:  $\sigma_a^2$ : 加性效应方差,  $\sigma_e^2$ : 残差方差,  $\sigma_p^2$ : 表型方差,  $h^2$ : 遗传力。括号内数据为标准误。

Note:  $\sigma_a^2$ : Additive effect variance,  $\sigma_e^2$ : Residual variance,  $\sigma_p^2$ : Phenotypic variance,  $h^2$ : Heritability. The standard error is in bracket.



表 4 长白猪群体达 100 kg 体重生长性状遗传相关与表型相关分析

性状 Trait	DAYS_100	ADG_100	LMA_100	BFT_100
DAYS_100		-0.992 (0.001)	0.000 (0.005)	-0.097 (0.005)
ADG_100	-0.997 (0.000)		-0.008 (0.005)	0.099 (0.005)
LMA_100	0.026 (0.029)	-0.041 (0.029)		-0.032 (0.005)
BFT_100	-0.056 (0.027)	0.060 (0.027)	-0.056 (0.028)	

注：上三角部分为性状间的表型相关系数，下三角部分为性状间的遗传相关系数。括号内数据为标准误。

Note: Numbers above diagonal are phenotypic correlations between traits, and numbers below diagonal are genetic correlations between traits. The standard error is in bracket.

2.3 表型进展与遗传进展

4 个性状的表型均值和遗传进展分别通过计

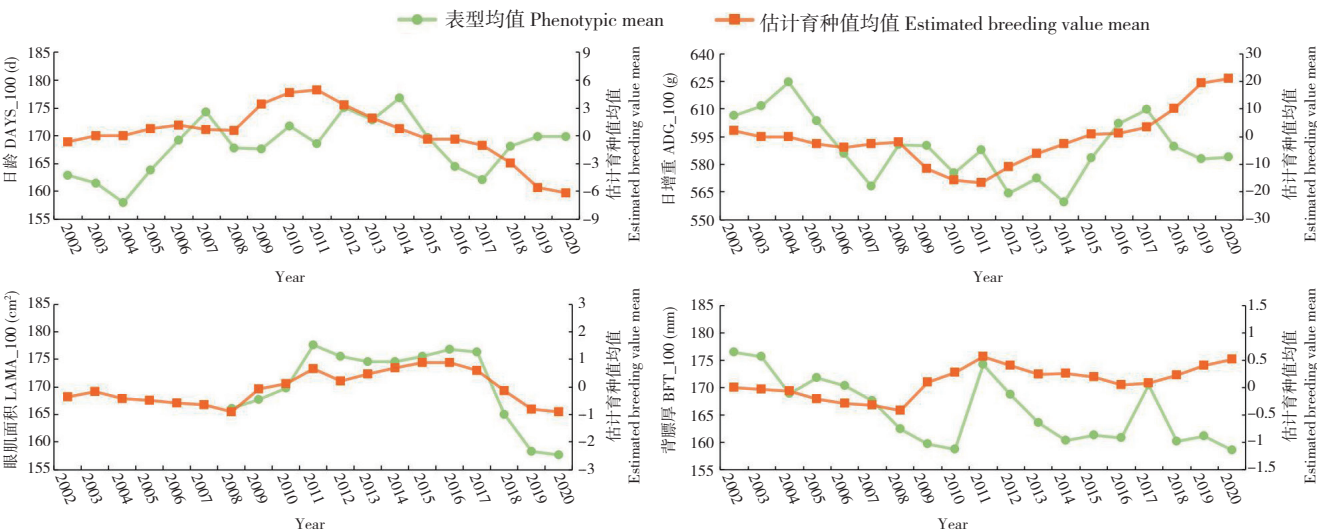


图 1 长白猪群体达 100 kg 体重生长性状表型进展和遗传进展

Fig. 1 Phenotypic progress and genetic progress for growth traits of Landrace pigs population at 100 kg body weight

3 讨论

大量研究表明，测定场、出生年份、出生季节、性别和出生胎次会影响猪生长性状的表达<sup>[9, 13-15]</sup>。贺婕好等<sup>[9]</sup>发现出生年份和出生季节对长白猪 DAYS\_100、ADG\_100 和 BFT\_100 均有极显著影响 ( $P<0.001$ )；林清等<sup>[13]</sup>发现测定场、性别对杜洛克猪的 DAYS\_100、BFT\_100 和 LMA\_100 均有极显著影响 ( $P<0.01$ )；张蕾<sup>[14]</sup>发现性别对长白后备猪的 DAYS\_100 和 BFT\_100 有显著影响 ( $P<0.05$ )；陈海龙<sup>[15]</sup>也发现性别对长白后备猪的 BFT\_100 有显著影响 ( $P<0.05$ )。本研究结果表明，测定场、出生年份、出生季节、

算不同年份的性状表型和估计育种值均值得到。由图 1 可知，2011 年性状 DAYS\_100 和 ADG\_100 的估计育种值均值分别达到 4.991 d 的最高值和 -16.817 g 的最低值；2020 年二者又达到各自的最低值和最高值，分别超过 -6 d 和 20 g；LMA\_100 的遗传进展和表型进展趋势基本一致，在 2008—2011 年快速上升，之后小范围波动，2017—2020 年一直呈下降趋势；BFT\_100 的估计育种值均值在 2002—2008 年稍有下降，随后 3 年上升，总体呈略微上升趋势。

从遗传进展变化幅度看，ADG\_100 和 DAYS\_100 的遗传进展变化较大，ADG\_100 从 2002 年的 2.006 g 增加到 2020 年 20.931 g，平均每年增加 1.051 g；DAYS\_100 从 2002 年的 -0.600 d 下降到 2020 年的 -6.108 d，平均每年下降 0.306 d。

性别和出生胎次对性状 DAYS\_100、ADG\_100、LMA\_100 和 BFT\_100 均存在极显著影响 ( $P<0.01$ )，与前人研究结果<sup>[9, 13-15]</sup>一致。测定场对性状值影响显著，说明场间的饲养管理水平和条件差异较大，可能是导致长白猪 LMA\_100 和 BFT\_100 的变异系数较大的原因之一。

前人研究发现 DAYS\_100、ADG\_100、LMA\_100 和 BFT\_100 遗传力的估计值多接近或超过 0.3<sup>[9, 16-17]</sup>，本研究结果与之一致，长白猪上述 4 个性状的遗传力在 0.391~0.433 之间，属于高遗传力性状，可以通过个体直接选择加快遗传进展<sup>[18]</sup>；但也有些研究对上述性状遗传力的估计值较低，如张蕾<sup>[14]</sup>估计 ADG\_100 遗传力为 0.02、DAYS\_100

为 0.03、BFT\_100 为 0.01；曹建新等<sup>[19]</sup>估计 DAYS\_100 遗传力为 0.210~0.310、BFT\_100 为 0.140~0.160；张婧<sup>[20]</sup>估计 DAYS\_100 遗传力为 0.08、BFT\_100 为 0.06。这可能与有效记录数据条数偏少<sup>[14]</sup>、数据标准差较大<sup>[20]</sup>、种猪遗传背景和环境不同<sup>[19]</sup>、估计方法差异<sup>[21]</sup>等因素有关。此外，本研究没有考虑窝效应<sup>[22]</sup>，可能会导致估计遗传力偏大<sup>[23-25]</sup>。

本研究结果表明，长白猪 DAYS\_100 与 ADG\_100 的表型相关系数和遗传相关系数分别为 -0.992 和 -0.997，呈现较强的负相关，其他性状的相关性均较小，这与前人研究结论一致。如王青来等<sup>[2]</sup>报道长白猪 30~100 kg 平均日增重与 DAYS\_100 的遗传相关系数为 -0.941，表型相关系数为 -0.829。本研究中长白猪 DAYS\_100 与 BFT\_100 的遗传相关系数为 -0.056，与贺婕好等<sup>[9]</sup>的研究结果 -0.027 接近；但本研究中上述两性状的表型相关为负相关，而贺婕好等<sup>[9]</sup>的研究结果为正相关，证明环境效应会影响性状的表型相关系数。

从整体来看，DAYS\_100、ADG\_100、BFT\_100 的表型均值和估计育种值均值呈现相反趋势，说明存在测定误差，即猪活重和 BFT\_100 的测定值存在偏差，推测可能由于表型测定时未严格遵守测定规范及存在系统误差引起。本研究中，2018 年前 DAYS\_100、ADG\_100 和 BFT\_100 的表型均值和遗传进展趋势基本一致，虽然遗传进展在 2018 年后取得一定进步，但 3 个性状在表型均值方面的变化并不明显，初步分析表明可能与该群体作为母系猪进行的育种目标性状选择相关；此外，BFT\_100 性状的表型均值及遗传进展在 2009 年前后出现较大波动，推测可能由于该场生产管理对场间设备进行升级更新有关，也可能与该群体的品种品系结构发生变动相关。LMA\_100 的表型趋势和遗传趋势变化高度一致，说明该性状测定值较准确。

## 4 结论

本研究中长白猪 4 个生长性状（DAYS\_100、ADG\_100、LMA\_100 和 BFT\_100）均属于中高遗传力性状。DAYS\_100 和 ADG\_100 间的遗传相关和表型相关均呈现强相关。整体来看，DAYS\_100、ADG\_100 和 BFT\_100 性状的表型进

展及遗传进展呈相反趋势，且 2018 年后取得一定的遗传进展，表明猪场的表型测定管理及群体育种目标性状的选择对猪群生长性状的表现有影响。LMA\_100 的遗传趋势和表型趋势变化高度一致，说明该性状测定值较准确。同时，养殖场生产管理水平的提高和品种品系结构的变化也可能会影响遗传进展。

## 参考文献 (References) :

- [1] 张勤. 遗传评估与种猪选留[J]. 北方牧业, 2018(11): 13-14.  
ZHANG Q. Genetic evaluation and selection of swine [J]. *Northern Animal Husbandry*, 2018(11): 13-14.
- [2] 王青来, 王爱国, 张豪, 罗旭芳, 吴珍芳. 应用 VCE4.0 估计长白猪生长性状的遗传参数[J]. 遗传, 2004(6): 811-814. DOI:10.16288/j.ycz.2004.06.007.  
WANG Q L, WANG A G, ZHANG H, LUO X F, WU Z F. Using VCE4.0 package to estimate genetic parameters on growth traits in Landrace [J]. *Hereditas (Beijing)*, 2004(6): 811-814. DOI:10.16288/j.ycz.2004.06.007.
- [3] 姚天雄, 陈冬, 吴珍芳, 肖石军, 张志燕, 杨明. 大白和长白猪大样本群体的繁殖性状遗传参数估计及影响因素分析[J]. 畜牧兽医学报, 2019, 50(11): 2195-2207. DOI:10.11843/j.issn.0366-6964.2019.11.003.  
YAO T X, CHEN D, WU Z F, XIAO S J, ZHANG Z Y, YANG M. Estimation of genetic parameters of reproductive traits and analysis of its influencing factors in large sample populations of Large White and Landrace pigs [J]. *Acta Veterinaria et Zootechnica Sinica*, 2019, 50(11): 2195-2207. DOI:10.11843/j.issn.0366-6964.2019.11.003.
- [4] OGAWA S, KIMATA M, TOMIYAMA M, SATOH M. Heritability and genetic correlation estimates of semen production traits with litter traits and pork production traits in purebred Duroc pigs [J]. *Journal of Animal Science*, 2022: e55. DOI:10.1093/jas/skac055.
- [5] 庄站伟, 付帝生, 丁荣荣, 杨明, 李绍云, 吴珍芳, 杨杰, 郑恩琴. 美系杜洛克种猪体尺性状遗传参数估计及其与生长性状的关系研究[J]. 广东农业科学, 2018, 45(7): 121-125. DOI:10.16768/j.issn.1004-874X.2018.07.020.  
ZHUANG Z W, FU D S, DING R R, YANG M, LI S Y, WU Z F, YANG J, ZHENG E Q. Estimation of genetic parameters of body measurements traits and the relationship with growth traits in an American Duroc population [J]. *Guangdong Agricultural Sciences*, 2018, 45(7): 121-125. DOI:10.16768/j.issn.1004-874X.2018.07.020.
- [6] 刘强, 郑梓. 测量猪背膘厚度的研究综述[J]. 猪业科学, 2017, 34(7): 122-123.  
LIU Q, ZHENG Z. A review on the measurement of pig backfat thickness [J]. *Swine Industry Science*, 2017, 34(7): 122-123.
- [7] 王塑天, 孟繁明, 李剑豪. 广东猪种质资源利用与育种生物技术创新[J]. 广东农业科学, 2020, 47(12): 134-143. DOI:10.16768/j.issn.1004-874X.2020.12.014.  
WANG S T, MENG F M, LI J H. Utilization of porcine germplasm resources in Guangdong and innovation of breeding biotechnology [J]. *Guangdong Agricultural Sciences*, 2020, 47(12): 134-143. DOI:10.16768/j.issn.1004-874X.2020.12.014.
- [8] 路伏增, 徐如海, 褚晓红, 戴丽荷, 杨娜娜, 沈安余, 蒋义权, 郭勇.

- 金华猪、六白猪、长白猪、巴克夏猪的四种杂交组合配套研究[J]. 浙江农业学报, 2019, 31(1): 69–73. DOI:10.3969/j.issn.1004-1524.2019.01.09.
- LIU F Z, XU R H, CHU X H, DAI L H, YANG N N, SHEN A Y, JIANG Y Q, GUO Y. Study on four cross combinations based on Jinhua pigs, six white pigs, Landrace pigs and Berkshire pigs [J]. *Acta Agriculturae Zhejiangensis*, 2019, 31(1): 69–73. DOI:10.3969/j.issn.1004-1524.2019.01.09.
- [9] 贺婕妤, 王斌虎, 廖柱, 谢红涛, 易国强, 刘毓文, 敖红, 唐中林. 长白和大白猪主要生长性状的遗传参数估计[J]. 畜牧兽医学报, 2021, 52(8): 2115–2123. DOI:10.11843/j.issn.0366-6964.2021.08.005.
- HE J Y, WANG B H, LIAO Z, XIE H T, YI G Q, LIU Y W, AO H, TANG Z L. Estimation of genetic parameters of main growth traits in Landrace and Large White pigs [J]. *Acta Veterinaria et Zootechnica Sinica*, 2021, 52(8): 2115–2123. DOI:10.11843/j.issn.0366-6964.2021.08.005.
- [10] R Core Team. R: a language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing [P/OL]. Vienna, Austria, 2011. [2022-04-01]. <https://www.r-project.org/>.
- [11] 张越, 杨宇泽, 张金鑫, 张锁宇, 邱小田, 唐韶青, 丁向东. DMU、GBS 和 Herdman 3 个软件育种值估计的比较[J]. 中国畜牧杂志, 2017, 53(7): 29–35. DOI: 10.19556/j.0258-7033.2017-07-029.
- ZHANG Y, YANG Y Z, ZHANG J X, ZHANG S Y, QIU X T, TANG S Q, DING X D. Comparison of breeding value estimation by DMU, GBS and Herdman [J]. *Chinese Journal of Animal Science*, 2017, 53(7): 29–35. DOI: 10.19556/j.0258-7033.2017-07-029.
- [12] MADSON P, JENSEN J. A user's guide to DMU [M/OL]. Denmark: University of Aarhus, Faculty Agricultural Sciences(DJF)Dept of Genetics and Biotechnology, Research Centre Foulum, 2013. [2022-04-01]. [https://www.researchgate.net/publication/291444592\\_A\\_user's\\_guide\\_to\\_DMU](https://www.researchgate.net/publication/291444592_A_user's_guide_to_DMU).
- [13] 林清, 吴细波, 滕金言, 邱小田, 李加琪, 张哲. 长期选择的杜洛克猪群体经济性状遗传参数及遗传进展分析[J]. 华南农业大学学报, 2021, 42(5): 1–7. DOI:10.7671/j.issn.1001-411X.202101016.
- LIN Q, WU X B, TENG J Y, QIU X T, LI J Q, ZHANG Z. Genetic parameters and genetic progress of economically important traits in a long-term selected Duroc pig population [J]. *Journal of South China Agricultural University*, 2021, 42(5): 1–7. DOI:10.7671/j.issn.1001-411X.202101016.
- [14] 张蕾. 种猪繁殖与生长性状的遗传参数估计及影响因素分析[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2021. DOI:10.27409/d.cnki.gxbnu.2021.000305.
- ZHANG L. Estimation of genetic parameters and analysis of influencing factors for reproductive and growth traits of breeding pigs [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2021. DOI:10.27409/d.cnki.gxbnu.2021.000305.
- [15] 陈海龙. 美系猪群繁殖和生长性状影响因素分析及遗传参数估计[D]. 泰安: 山东农业大学, 2020. DOI:10.27277/d.cnki.gsdnu.2020.000247.
- CHEN H L. Analysis of factors influencing reproductive and growth traits and estimation of genetic parameters of American swinery [D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2020. DOI:10.27277/d.cnki.gsdnu.2020.000247.
- [16] 叶健, 傅金奎, 张锁宇, 叶道武, 李庆岗, 陈景明, 金娉婷, 张士媛, 王爱国. 安徽省猪育种核心群场间联系性和遗传参数估计[J]. 中国畜牧杂志, 2015, 51(18): 62–67. DOI:10.3969/j.issn.0258-7033.2015.18.013.
- YE J, FU J L, ZHANG S Y, YE D W, LI Q G, CHEN J M, JIN P T, ZHANG S Y, WANG A G. Estimation of genetic parameters and connectedness in pig breeding nucleus herds of Anhui Province [J]. *Chinese Journal of Animal Science*, 2015, 51(18): 62–67. DOI:10.3969/j.issn.0258-7033.2015.18.013.
- [17] 黄叶. 大白猪胴体性状全基因组关联分析及遗传参数估计[D]. 南宁: 广西大学, 2020. DOI:10.27034/d.cnki.ggxu.2020.002290.
- HUANG Y. Genome wide association analysis and genetic parameter estimation of carcass traits in Yorkshire pigs [D]. Nanning: Guangxi University, 2020. DOI:10.27034/d.cnki.ggxu.2020.002290.
- [18] KUMAR A, KAKANUR Y, BIRADAR S, DESAI S A, TN S, PATEL B N, DEEPAK D A, TIGGA A. Studies on genetic variability parameter under artificial epiphytotic condition for leaf rust in bread wheat (*Triticum aestivum* L.) [J]. *Current Journal of Applied Science and Technology*, 2019, 38(6): 1–7. DOI:10.9734/CJAST/2019/v38i630389.
- [19] 曹建新, 齐莹莹, 王钰龙, 王源. 基于多性状动物模型估计大白猪、长白猪生长性状的遗传参数[J]. 畜牧与兽医, 2017, 49(11): 154–156.
- CAO J X, QI Y Y, WANG Y L, WANG Y. Genetic parameter estimates for growth traits of Large White and Landrace pigs in multi-trait animal model [J]. *Animal Husbandry & Veterinary Medicine*, 2017, 49(11): 154–156.
- [20] 张婧. 猪重要经济性状遗传参数估计[D]. 保定: 河北农业大学, 2020. DOI:10.27109/d.cnki.ghbnu.2020.000277.
- ZHANG J. Estimation of genetic parameters of important economic traits in pigs [D]. Baoding: Hebei Agricultural University, 2020. DOI:10.27109/d.cnki.ghbnu.2020.000277.
- [21] DONG L S, TAN C, CAI G Y, LI Y L, WU D, WU Z F. Estimates of variance components and heritability using different animal models for growth, backfat, litter size, and healthy birth ratio in Large White pigs [J]. *Canadian Journal of Animal Science*, 2019, 100(1): 1–7. DOI:10.1139/cjas-2019-0136.
- [22] JIMENEZ J A, ZYLKA M J. Controlling litter effects to enhance rigor and reproducibility with rodent models of neurodevelopmental disorders [J]. *Journal of Neurodevelopmental Disorders*, 2021, 13(1): 2. DOI:10.1186/s11689-020-09353-y.
- [23] KERR J C, CAMERON N D. Genetic and phenotypic relationships between performance test and reproduction traits in Large White pigs [J]. *Animal Science*, 1996, 62(3): 531–540. DOI:10.1017/S1357729800015071.
- [24] BONFATTI V, ROSTELLATO R, CARNIER P. Estimation of additive and dominance genetic effects on body weight, carcass and ham quality traits in heavy pigs [J]. *Animals*, 2021, 11(2): 481. DOI:10.3390/ani11020481.
- [25] 梁耀文, 舒会友, 黄新全, 陈玲, 刘燊, 张辉华. 重组人乳铁蛋白对断奶仔猪生产性能及血清生化指标的影响[J]. 广东农业科学, 2019, 46(9): 128–134. DOI: 10.16768/j.issn.1004-874X.2019.09.018.
- LIANG Y W, SHU H Y, HUANG X Q, CHEN L, LIU S, ZHANG H H. Effects of recombinant human lactoferrin on growth performance and serum biochemical index of weaned piglets [J]. *Guangdong Agricultural Sciences*, 2019, 46(9): 128–134. DOI: 10.16768/j.issn.1004-874X.2019.09.018.x