

林清, 吴细波, 滕金言, 等. 长期选择的杜洛克猪群体经济性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.
LIN Qing, WU Xibo, TENG Jinyan, et al. 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.

长期选择的杜洛克猪群体经济性性状遗传参数及遗传进展分析

林 清¹, 吴细波², 滕金言¹, 邱小田³, 李加琪¹, 张 哲¹

(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; 3 全国畜牧总站, 北京 100125)

摘要:【目的】对受长期选择的实际杜洛克猪育种群体 3 个重要经济性性状进行遗传参数估计, 分析各性状取得的遗传进展, 并探讨实际育种群体中长期选择等因素对群体遗传参数的影响。【方法】收集广西某猪场核心育种群杜洛克猪 2003—2018 年共计 15 760 条生长性能测定记录。运用 DMU 软件的 DMUAI 模块和 DMU4 模块, 利用多性状动物模型估计 3 个重要经济性性状的群体遗传参数和个体育种值。并通过估计该群体的年度累计群体遗传参数以评估该群体在长期选择过程中遗传参数的变化情况。【结果】杜洛克猪 3 个重要经济性性状 (达 100 kg 体质量日龄、背膘厚和眼肌面积) 的估计遗传力分别为 0.354、0.477 和 0.479, 均属中高遗传力性状。3 个性状间的遗传相关范围为-0.110~0.039, 表型相关范围为-0.076~0.082, 均属于弱相关。性状达 100 kg 体质量日龄在长期选择中取得了较大的遗传进展, 而性状达 100 kg 体质量背膘厚和达 100 kg 体质量眼肌面积取得的遗传进展较小。分析年度累积群体估计的遗传参数发现, 3 个经济性性状的加性遗传方差出现了不同程度的变化。【结论】杜洛克猪群体 3 个重要经济性性状均为中高遗传力性状且性状间相关性较弱。在实际育种群体中, 长期选择及引种等因素会导致群体遗传参数发生变化, 育种实践中应及时开展遗传参数估计, 以获得准确的遗传评估结果, 加速群体遗传改良。

关键词: 杜洛克猪; 长期选择; 多性状动物模型; 遗传参数; 遗传进展

中图分类号: S828.2

文献标志码: A

文章编号: 1001-411X(2021)05-0001-07

Genetic parameters and genetic progress of economically important traits in a long-term selected Duroc pig population

LIN Qing¹, WU Xibo², TENG Jinyan¹, QIU Xiaotian³, LI Jiaqi¹, ZHANG Zhe¹

(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 Livestock Husbandry Group Co., Ltd., Nanning 530022, China; 3 National Animal Husbandry Service, Beijing 100125, China)

Abstract: 【Objective】To estimate the genetic parameters of three economic traits in a long-term selection population, analyze their genetic progress, and investigate the factors including long-term selection affecting the genetic parameters in the practical breeding population. 【Method】A total of 15 760 growth performance

收稿日期: 2021-01-10 网络首发时间: 2021-07-06 10:06:56

网络首发地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/44.1110.S.20210706.0923.002.html>

作者简介: 林 清 (1996—), 男, 硕士研究生, E-mail: qing_lin1996@126.com; 通信作者: 张 哲 (1984—), 男, 教授, 博士, E-mail: zhezhang@scau.edu.cn

基金项目: 国家现代农业产业技术体系资助 (CARS-35); 广东省重点领域研发计划 (2018B020203002)

records of Duroc pigs were collected in a core breeding field from 2003 to 2018. Using DMUAI module and DMU4 module of DMU software, a multi-trait animal model was used to estimate the genetic parameters and breeding values of three important economic traits. We estimated the genetic parameters of annual accumulative population to evaluate the change of genetic parameters during the long-term selection. 【Result】 The estimates of heritability for three important economic traits including age, backfat thickness and loin muscle area at 100 kg body weight were 0.354, 0.477 and 0.479, respectively. All three traits had medium-high heritability. There were low correlations among three economic traits. The genetic and phenotypic correlations ranged from -0.110 to 0.039 and from -0.076 to 0.082, respectively. Among three traits, age at 100 kg body weight had relatively greater genetic progress in long-term selection, while backfat thickness at 100 kg body weight and loin muscle area at 100 kg body weight had relatively less genetic progress. Furthermore, the additive genetic variance changed in different degrees for three economic traits by estimating the genetic parameters of the annual accumulative population. 【Conclusion】 These traits of this Duroc pig population had the medium-high estimates of heritability and low correlations. Moreover, long-term selection and introduction could lead to the changing of genetic parameters. Therefore, genetic parameters should be estimated timely to obtain accurate genetic evaluation for accelerating the genetic improvement in breeding practice.

Key words: Duroc pig; long-term selection; multi-trait animal model; genetic parameter; genetic progress

在猪育种中,重要的经济性状多为复杂的数量性状,难以直接通过表型判断个体的种用价值。群体遗传参数通过方差组分割分说明数量性状遗传规律,在估计个体育种值、制定育种方案中起到十分重要的作用^[1]。前人研究表明,遗传参数估计的准确性受多种因素影响,包括统计模型^[2-3]、估计方法^[4-6]、所估计群体大小^[7-9]等。

由于遗传参数具有群体特异性,即使同一性状,在不同群体中遗传参数也有所不同,如猪达 100 kg 体质量背膘厚^[10-13]。因此,估计特定群体遗传参数是育种的基本工作,是开展群体遗传评估的基础。此外,经济性状的遗传进展主要受群体遗传变异性、育种值估计准确性等因素的影响^[14]。有研究表明,对于多数经济性状,长期选择会导致群体遗传参数发生变化^[15],但在猪群体中还鲜有报道。特别是对于开放的育种群体,其遗传参数如何变化是一个值得探讨的问题。

因此,本研究基于某种猪场核心育种群杜洛克猪长达 15 年的性能测定记录进行分析,利用多性状动物模型估计 3 个经济性状的遗传参数和个体育种值,评估该群体在长期选择过程中遗传参数的变化情况,旨在为实际生产育种工作提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 数据来源

数据为 2003—2018 年广西某种猪场核心育种群共计 15 760 头杜洛克猪的性能测定记录。测定性

状包括:达 100 kg 体质量时的日龄、背膘厚和眼肌面积。

公、母猪实测体质量介于 85~120 kg,实测日龄介于 120~200 d,通过校正公式转换得到校正日龄,校正公式如下所示:

校正日龄 = 测定日龄 - (实测体质量 - 100)/CF,

式中,CF 为校正因子:CF_{公猪}=(实测体质量/测定日龄)×1.826 040;CF_{母猪}=(实测体质量/测定日龄)×1.714 615。

背膘厚前期采用 A 超测定背膘厚,测定胸腰结合部、腰荐结合部沿背中左侧 5 cm 处 2 点背膘厚,取平均值;后期采用 B 超测定倒数第 3~4 肋间处的背膘厚。背膘厚通过以下校正公式转换得到:

校正背膘厚 = 实测背膘厚 × CF,

式中,CF 为校正因子:CF=A/[A+B×(实测体质量-100)],A_{公猪}=13.468,B_{公猪}=0.111 528;A_{母猪}=15.654,B_{母猪}=0.156 646。

1.2 固定效应划分

采用 R 软件^[16]剔除表型记录严重偏离生理极限的个体。通过拟合线性模型,确定影响性状表型的固定效应。分析模型如下:

$$y_{ijklm} = H_i + Y_j + S_k + Sex_l + e_{ijklm},$$

式中,y_{ijklm}为各性状表型值(达 100 kg 体质量日龄、背膘厚和眼肌面积);H_i为测定场;Y_j为测定年份;S_k为测定季;Sex_l为测定个体性别;e_{ijklm}为残差;i、j、k、l 分别为不同固定效应的水平数,m 为个体水平数。

采用多因素方差分析, 利用 R 软件 ANOVA 函数^[16]进行固定效应分析, 最终确定性别、测定场、测定年份、测定季节 4 个固定效应。其中, 该群体有 3 个育种群, 考虑不同群体环境对 3 个性状的影响, 根据不同群体将测定场划分为 3 个水平; 测定年份划分为 14 个水平: 2003—2018 年, 其中 2003—2005 年因数据量较少合并为 1 个水平; 测定季根据当地的环境情况划分为 4 个水平: 春 (3—5 月)、夏 (6—8 月)、秋 (9—11 月)、冬 (12—次年 2 月); 性别划分为 2 个水平: 公、母。数据格式根据 DMU 软件要求进行整理。

1.3 遗传参数、育种值估计模型

本研究采用多性状动物模型进行遗传参数估计并预测育种值, 其模型如下:

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_1 & 0 & 0 \\ 0 & X_2 & 0 \\ 0 & 0 & X_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} Z_1 & 0 & 0 \\ 0 & Z_2 & 0 \\ 0 & 0 & Z_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ e_3 \end{bmatrix},$$

式中, y_1 、 y_2 和 y_3 分别是达 100 kg 体质量日龄、背膘厚和眼肌面积的表型观测值向量; X_1 、 X_2 和 X_3 分别为固定效应 b_1 、 b_2 和 b_3 的关联矩阵; b_1 、 b_2 和 b_3 为固定效应向量 (均包含测定场、测定年份、测定季节、性别); Z_1 、 Z_2 和 Z_3 分别是加性遗传效应 a_1 、 a_2 和 a_3 的关联矩阵; a_1 、 a_2 和 a_3 为个体的加性遗传效应向量, 服从多元正态分布 $a \sim N(0, A_0 \otimes A)$, 其中 $A_0 = \begin{bmatrix} \sigma_{a_1}^2 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{a_2}^2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{a_3}^2 \end{bmatrix}$, $\sigma_{a_1}^2$ 、 $\sigma_{a_2}^2$ 和 $\sigma_{a_3}^2$ 分别是达 100 kg 体质量日龄、背膘厚和眼肌面积的加性遗传方差, A 为个体间分子亲缘关系矩阵; e_1 、 e_2 和 e_3 为残差向量, 服从多重正态分布 $e \sim N(0, R_0 \otimes I)$, 其中 $R_0 = \begin{bmatrix} \sigma_{e_1}^2 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{e_2}^2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{e_3}^2 \end{bmatrix}$, $\sigma_{e_1}^2$ 、 $\sigma_{e_2}^2$ 和

$\sigma_{e_3}^2$ 分别是达 100 kg 体质量日龄、背膘厚和眼肌面积的残差方差, I 为单位矩阵。

通过 DMU 软件^[17]对该模型进行方差组分和育种值估计, 采用 DMUAI 模块中平均信息算法 (Average information, AI) 和期望最大化算法 (Expectation maximisation, EM) 相结合的约束性最大似然法 (Restricted maximum likelihood, REML) 估计方差组分, 利用 DMU4 模块估计个体育种值。

2 结果与分析

2.1 表型数据统计分析

该杜洛克猪群体达 100 kg 体质量时的日龄、背膘厚和眼肌面积 3 个性状的表型描述性统计结果见表 1。该群体性能测定记录较为完整, 背膘厚剔除了 3 条表型严重偏离生理极限的记录。眼肌面积于 2009 年开始进行测定并记录, 因此记录数相对少于其他 2 个性状。

对 3 个性状的 4 个固定效应进行方差分析, 结果 (表 2) 表明, 测定场、测定年份、测定季节和性别对 3 个重要经济性状均有极显著影响。因此, 在进行方差组分和育种值估计时, 应将其作为固定效应纳入统计模型中。

2.2 性状的遗传参数

本研究采用多性状动物模型进行方差组分估计, 结果见表 3。结果显示, 杜洛克猪达 100 kg 体质量时的日龄、背膘厚和眼肌面积的遗传力分别为 0.354、0.477 和 0.479, 均属于中高遗传力性状。

3 个性状之间的遗传相关和表型相关如表 4 所示。杜洛克猪 3 个经济性状间遗传相关和表型相关的变化范围分别为-0.110~0.039 和-0.076~0.082, 均属于弱相关。其中, 日龄和背膘厚之间的遗传相关和表型相关均为负相关。

表 1 杜洛克猪群体达 100 kg 体质量时 3 个经济性状表型的描述性统计

Table 1 The descriptive statistics of the phenotype for three economic traits of Duroc pig population at 100 kg body weight			
指标 Index	日龄/d Age	背膘厚/mm Backfat thickness	眼肌面积/cm ² Loin muscle area
平均值 Mean	170.38	11.49	40.29
标准差 Standard deviation	15.50	1.94	3.54
最小值 Minimum	115.91	4.65	23.22
中位数 Median	168.70	11.33	40.53
最大值 Maximum	248.16	23.43	56.42
记录数 No. of records	15 754	15 757	13 233

表 2 杜洛克猪群体达 100 kg 体质量时 3 个经济性状的方差分析 F 值¹⁾

因素 Factor	日龄 Age	背膘厚 Backfat thickness	眼肌面积 Loin muscle area
场 Farm	4 929.15**	203.41**	815.35**
年份 Year	117.74**	79.63**	228.13**
季节 Season	31.46**	96.55**	33.56**
性别 Sex	849.87**	357.13**	453.14**

1) “**” 表示影响达到0.01的显著水平
1) “**” indicates the effect at 0.01 significance level

表 3 杜洛克猪群体达 100 kg 体质量时 3 个经济性状估计方差组分及估计遗传力¹⁾

Table 3 The variance components and estimated heritability for three economic traits of Duroc pig population at 100 kg body weight

指标 Index	日龄 Age	背膘厚 Backfat thickness	眼肌面积 Loin muscle area
σ_a^2	50.761	1.686	4.900
σ_e^2	92.584	1.850	5.329
σ_p^2	143.345	3.536	10.229
$h^2 \pm SE$	0.354 $\pm$ 0.018	0.477 $\pm$ 0.018	0.479 $\pm$ 0.021

1) σ_a^2 : 加性遗传方差, σ_e^2 : 残差方差, σ_p^2 : 表型方差, h^2 : 遗传力, SE: 标准误
1) σ_a^2 : Additive genetic variance, σ_e^2 : Residual variance, σ_p^2 : Phenotypic variance, h^2 : Heritability, SE: Standard error

表 4 杜洛克猪群体达 100 kg 体质量时 3 个经济性状的遗传相关与表型相关¹⁾

Table 4 The genetic correlations and phenotypic correlations for three economic traits of Duroc pig population at 100 kg body weight

性状 Trait	日龄 Age	背膘厚 Backfat thickness	眼肌面积 Loin muscle area
日龄 Age		-0.076	0.032
背膘厚 Backfat thickness	-0.110(0.038)		0.082
眼肌面积 Loin muscle area	0.031(0.043)	0.039(0.038)	

1) 右上角数字为性状间的表型相关, 左下角数字为性状间的遗传相关(括号中为遗传相关标准误)
1) Numbers at above diagonal are phenotypic correlations between traits, and the ones at below diagonal are genetic correlations between traits (the standard error of genetic correlation in bracket)

2.3 群体表型均值与遗传进展

3 个性状的表型均值和遗传进展分别通过计算不同年份的性状表型和估计育种值均值得到, 结果如图 1 所示。该群体 2003—2018 年, 达 100 kg 体质量时日龄的育种值均值缩短了 10 d 左右; 而背膘厚的育种值均值在-0.3~0.2 mm 范围波动; 眼肌面积的育种值均值在 2008—2012 年增加了约 2 cm², 2012 年以后基本保持稳定。

2.4 年度累积群体遗传参数

年度累积遗传参数利用截至某年度所累积的群体进行遗传参数估计获得, 结果如表 5 所示。对不同年份的年度累积群体加性遗传方差和遗传力变化作进一步分析, 结果见图 2。达 100 kg 体质量时日龄的年度累积群体遗传参数波动较大, 背膘厚和眼肌面积的年度累积群体加性遗传方差呈现逐年递增的趋势 (图 2)。随着年度累积群体记录数的

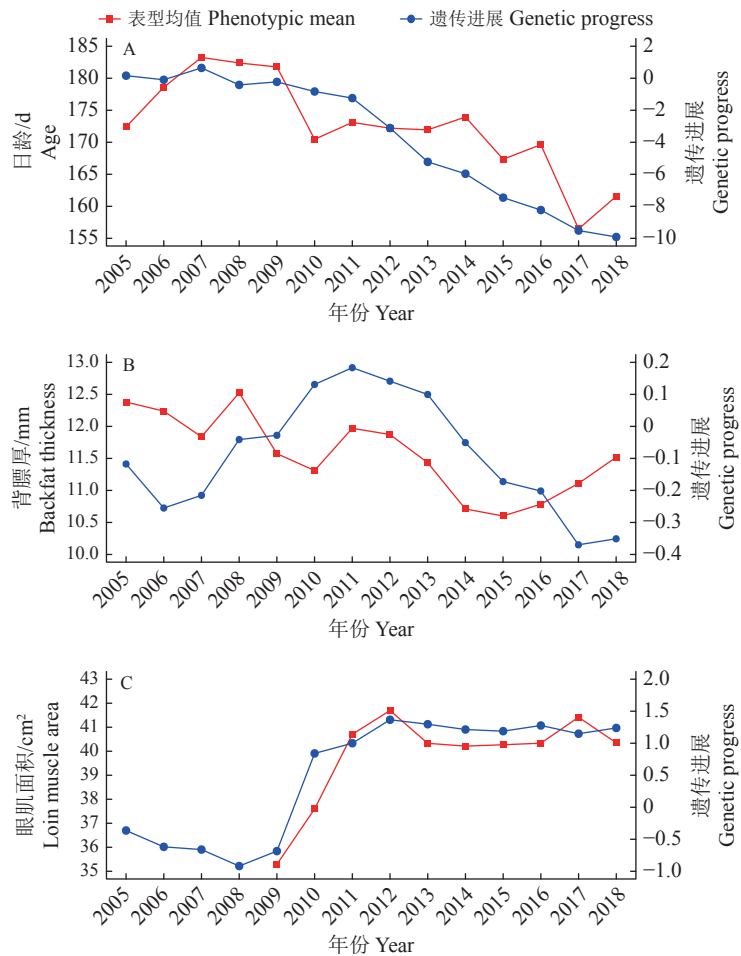


图 1 杜洛克猪群体达 100 kg 体质量时 3 个重要经济性状表型均值和遗传进展

Fig. 1 Phenotypic mean and genetic gain for three economic traits of Duroc pig population at 100 kg body weight

表 5 杜洛克猪达 100 kg 体质量时 3 个经济性状的年度累积群体遗传参数¹⁾

Table 5 The genetic parameters of annual cumulative population for three economic traits of Duroc pigs at 100 kg body weight

年份 Year	日龄 Age			背膘厚 Backfat thickness			眼肌面积 Loin muscle area		
	σ_a^2	σ_e^2	$h^2 \pm SE$	σ_a^2	σ_e^2	$h^2 \pm SE$	σ_a^2	σ_e^2	$h^2 \pm SE$
2009	47.191	106.179	0.308±0.039	1.075	1.997	0.350±0.039	3.602	5.866	0.380±0.107
2010	50.847	109.264	0.318±0.036	1.055	2.158	0.328±0.034	4.009	6.604	0.378±0.067
2011	57.602	99.554	0.367±0.029	1.463	2.109	0.410±0.028	3.822	5.983	0.390±0.039
2012	47.727	97.014	0.330±0.025	1.519	2.003	0.431±0.024	4.047	5.614	0.419±0.031
2013	45.969	96.388	0.323±0.023	1.480	1.931	0.434±0.023	3.911	5.385	0.421±0.027
2014	46.494	96.699	0.325±0.022	1.437	1.839	0.439±0.022	3.903	5.202	0.429±0.026
2015	48.689	94.439	0.340±0.021	1.442	1.766	0.450±0.021	3.899	4.982	0.439±0.025
2016	57.533	97.974	0.370±0.020	1.464	1.724	0.459±0.020	4.456	4.933	0.475±0.023
2017	54.674	93.961	0.368±0.019	1.458	1.693	0.463±0.019	4.528	4.984	0.476±0.022
2018	50.761	92.584	0.354±0.018	1.686	1.850	0.477±0.018	4.900	5.329	0.479±0.021

1) σ_a^2 : 加性遗传方差, σ_e^2 : 残差方差, h^2 : 遗传力, SE: 标准误
1) σ_a^2 : Additive genetic variance, σ_e^2 : Residual variance, h^2 : Heritability, SE: Standard error

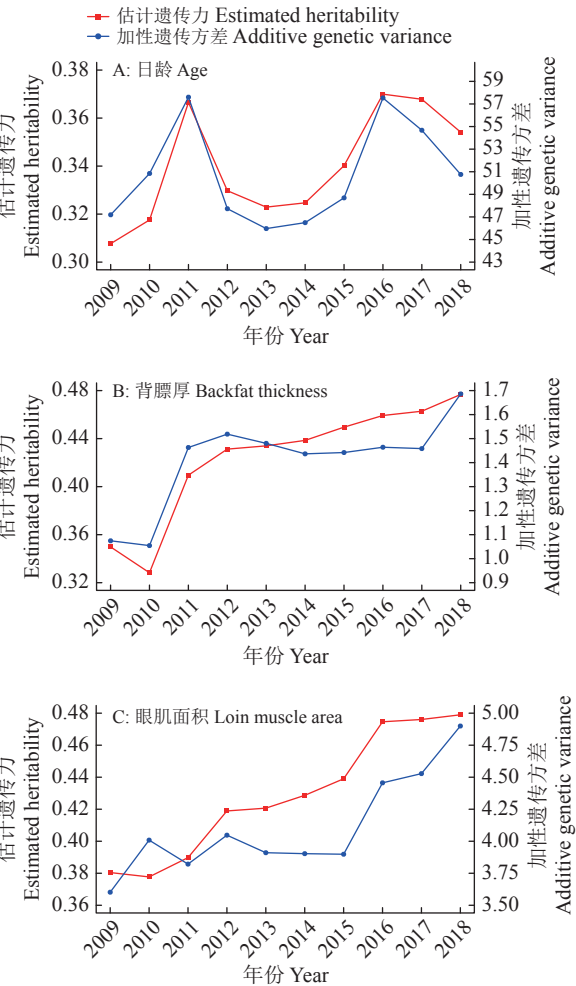


图2 杜洛克猪达 100 kg 体重时 3 个重要经济性状的年度累积群体估计遗传力和加性遗传方差

Fig. 2 The estimated heritability and additive genetic variance of annual accumulative population for three economic traits of Duroc pigs at 100 kg body weight

增加, 各性状的遗传力标准误呈现逐渐减低的趋势。

3 讨论与结论

3.1 杜洛克猪性状表型与遗传参数分析

通过分析, 最终确定测定场、测定年份、测定季节和性别作为固定效应加入多性状动物模型中, 与前人的研究结果^[18-19]相类似。大量研究表明, 猪生长发育相关性状多为中高遗传力性状^[20-21]。本研究所分析群体的 3 个重要经济性状也均为中高遗传力性状, 且 3 个性状间的遗传相关和表型相关均呈现弱相关。庄站伟等^[22]研究发现杜洛克种猪群体性状达 100 kg 体重质量日龄和达 100 kg 体重质量背膘厚的遗传相关为-0.091; 曹建新等^[23]在大白猪和长白猪群体中研究也发现 2 个性状间的遗传相关较低, 与本研究的结果相一致。前人研究表明, 对于中

高遗传力性状, 直接进行个体选择能够加快遗传进展^[22]; 而低遗传力性状可通过不同性状间的遗传相关进行间接选择, 从而加快遗传进展^[24]。从研究结果可知, 3 个重要经济性状可通过直接选择加速群体遗传改良。

3.2 杜洛克猪性状遗传进展分析

相关研究表明, 达 100 kg 体重质量日龄、达 100 kg 体重质量背膘厚和达 100 kg 体重质量眼肌面积性状经过选择, 均取得一定的遗传进展^[24-26]。在本群体中, 达 100 kg 体重质量日龄性状经过十余年的选择取得了较大的遗传进展, 初步表明该性状在该群体中受到的选择强度较大, 显著缩短达 100 kg 体重质量日龄能够降低饲养成本、提升经济效益。达 100 kg 体重质量背膘厚和达 100 kg 体重质量眼肌面积长期选择取得的遗传进展较小, 初步分析表明可能与该群体的育种目标性状的选择有关。2010 年前后, 性状达 100 kg 体重质量背膘厚和达 100 kg 体重质量眼肌面积的方差组分发生了较大波动, 经分析发现可能与该群体的品种品系结构发生变动有关。

3.3 3 个性状年度累积群体遗传参数

研究表明, 长期选择会导致群体的加性遗传方差降低^[27]。达 100 kg 体重质量日龄在过去十余年的长期选择中方差组分发生了较大波动, 特别是 2011 年和 2016 年前后群体加性遗传方差增大, 这与前人的研究结果^[27]存在差别。通过对群体来源进行分析发现, 该群体在以上 2 个年份前后均有外源种猪的引进, 这可能是导致群体遗传变异度增大的主要原因。群体的加性遗传方差在育种过程中不仅受到选择的作用, 还受到引种等其他因素的影响。此外, 群体遗传改良速率不仅受到选择强度的影响, 还与群体遗传变异度有关^[14]。优质种质资源的引入, 能够提高群体的遗传变异度, 加快遗传改良。达 100 kg 体重质量背膘厚和达 100 kg 体重质量眼肌面积的加性遗传方差呈现逐年递增的趋势, 初步表明 2 个性状受到的选择强度较小, 且存在其他因素导致遗传变异度逐渐增大。随着年度累积群体的规模不断增大, 遗传参数估计的准确性提高, 与前人的报道相一致^[7, 28]。综合本研究结果可得, 在实际育种群体中, 群体常常不只受到长期选择的影响, 引种等因素也会导致遗传参数发生变化。因此, 及时开展群体遗传参数估计, 有利于提高群体遗传评估的准确性。

参考文献:

[1] 李学武, 王瑞军, 王志英, 等. 家畜遗传评估方法研究进展[J]. 中国农业大学学报, 2020, 25(2): 54-60.

- [2] 乔国艳,袁超,郭婷婷,等.不同数据结构和动物模型对高山美利奴羊经济性状遗传参数估计的比较[J].中国畜牧兽医,2020,47(2):531-543.
- [3] DONG L, TAN C, CAI G, et al. 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*, 2020, 100(2): 330-336.
- [4] 张胜利,杨秀文,靳明武,等.遗传参数不同估计方法的比较[J].遗传,1995,17(6):21-23.
- [5] ALENCARIANO J D S F, ELIAS N M, CLAUDIO N C, et al. Effects of the number of animals in the numerator relationship matrix on variance components for milk yield using restricted maximum likelihood and Bayesian methods[J]. *Revista Brasileira de Zootecnia*, 2009, 38(8): 1468-1477.
- [6] BEERLI P. Comparison of Bayesian and maximum-likelihood inference of population genetic parameters[J]. *Bioinformatics*, 2006, 22(3): 341-345.
- [7] 高虹,邱小田,王长存,等.我国杜洛克、长白、大白猪区域性联合遗传评估研究[J].畜牧兽医学报,2018,49(12):2567-2575.
- [8] SU H, GOLDEN B, HYDE L, et al. Genetic parameters for carcass and ultrasound traits in Hereford and admixed Simmental beef cattle: Accuracy of evaluating carcass traits[J]. *Journal of Animal Science*, 2017, 95(11): 4718-4727.
- [9] 姚天雄,陈冬,吴珍芳,等.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.
- [10] HOLM B, BAKKEN M, KLEMETSDAL G, et al. Genetic correlations between reproduction and production traits in swine[J]. *Journal of Animal Science*, 2004, 82(12): 3458-3464.
- [11] WOLF J, ZAKOVA E, GROENEVELD E. Genetic parameters for a joint genetic evaluation of production and reproduction traits in pigs[J]. *Czech Journal of Animal Science*, 2005, 50(3): 96-103.
- [12] LOPEZ B I M, SONG C, SEO K. Genetic parameters and trends for production traits and their relationship with litter traits in Landrace and Yorkshire pigs[J]. *Animal Science Journal*, 2018, 89(10): 1381-1388.
- [13] HOQUE M A, KADOWAKI H, SHIBATA T, et al. Maternal and direct genetic parameters for production traits and maternal correlations among production and feed efficiency traits in Duroc pigs[J]. *Asian-Australasian Journal of Animal Sciences*, 2008, 21(7): 961-966.
- [14] 张勤.我国猪育种现状与挑战[J].北方牧业,2019(10):12-13.
- [15] SHARMA D, JOHARI D C, KATARIA M C, et al. Factors affecting direct and correlated responses in a White Leghorn population under long term selection for egg number[J]. *British Poultry Science*, 1998, 39(1): 31-38.
- [16] R CORE TEAM. R: A language and environment for statistical computing[DB/CD]. R Foundation for Statistical Computing, 2019.
- [17] MADSEN P, JENSEN J, LABOURIAU R, et al. DMU: A package for analyzing multivariate mixed models in quantitative genetics and genomics[C]//ASAS. 10th World Congress on Genetics Applied to Livestock Production, Vancouver: American Society of Animal Science, 2014.
- [18] 曹洪战,吴常信,师守堃.利用MTDFREML估计大约克双肌臀种猪活体背膘厚遗传力时固定效应及水平数的确定[J].中国畜牧杂志,2004,40(3):34-36.
- [19] DARFOUR-ODURO K A, NAAZIE A, AHUNU B K, et al. Genetic parameter estimates of growth traits of indigenous pigs in Northern Ghana[J]. *Livestock Science*, 2009, 125(2): 187-191.
- [20] JIAO S, MALTECCA C, GRAY K A, et al. Feed intake, average daily gain, feed efficiency, and real-time ultrasound traits in Duroc pigs: I: Genetic parameter estimation and accuracy of genomic prediction[J]. *Journal of Animal Science*, 2014, 92(6): 2377-2386.
- [21] LOPEZ B I M, SEO K S, SONG C W, et al. Estimation of genetic parameters and accuracy of genomic prediction for production traits in Duroc pigs[J]. *Czech Journal of Animal Science*, 2019, 64(4): 160-165.
- [22] 庄站伟,付帝生,丁荣荣,等.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.
- [23] 曹建新,齐莹莹,王钰龙,等.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.
- [24] ZHANG Z, ZHANG H, PAN R, et al. Genetic parameters and trends for production and reproduction traits of a Landrace herd in China[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2016, 15(5): 1069-1075.
- [25] 刘榜,蒋腾飞,樊斌,等.外种猪遗传改良进展与发展趋势[J].猪业科学,2011,28(9):106-108.
- [26] 楼平儿,华坚青.应用BLUP法选择加系约克夏种猪的遗传进展分析[J].畜牧与兽医,2002,34(10):16-17.
- [27] CHATTERJEE R N, MISRA B S, SINGH H N. Time trends of genetic parameters in a White Leghorn population subjected to long term single trait selection[J]. *Indian Journal of Animal Sciences*, 2002, 72(6): 465-468.
- [28] 丁向东,王长存,周子文,等.生猪遗传改良计划实施以来我国猪主要经济性状进展分析[J].中国畜牧杂志,2021,57(1):224-230.