

我国北方地区娟姗牛泌乳曲线分析及其与荷斯坦牛的比较

王澳¹ 竹磊¹ 张海亮¹ 师睿¹ 刘登科² 马亚宾²

倪俊卿² 郭刚³ 蒋桂娥^{2*} 王雅春^{1*}

(1. 中国农业大学 动物科技学院/农业农村部动物遗传育种与繁殖(家畜)重点实验室/

畜禽育种国家工程实验室,北京 100193;

2. 河北省畜牧良种工作站,石家庄 050061;

3. 北京首农畜牧发展有限公司,北京 100176)

摘要 为分析娟姗牛泌乳曲线的特征及其 305 d 产奶量的影响因素,并重点比较娟姗牛和荷斯坦牛两品种泌乳曲线间的差异,本研究收集了河北地区某规模化牧场 2017 年 1 月—2021 年 1 月共 1 721 头娟姗牛和 6 093 头荷斯坦牛的日产奶量连续监测记录,利用 Wood 模型对奶牛的个体泌乳曲线进行拟合,并根据曲线特征确定了高峰奶、高峰日、日产奶量变化速率、各泌乳阶段产奶总量等指标对泌乳曲线进行剖析。利用 SAS 9.4 软件的 GLM 过程分析了胎次、产犊季节等因素对娟姗牛 305 d 产奶量的影响及两群体泌乳曲线间的差异。结果表明:1)Wood 模型对娟姗牛泌乳曲线的拟合效果较好,泌乳曲线拟合度(R^2)可达 0.86;2)娟姗牛 305 d 产奶量受胎次、产犊季节等因素影响显著($P<0.05$),较高胎次及春季产犊的娟姗牛 305 d 产奶量更高;3)娟姗牛和荷斯坦牛的泌乳曲线在高峰奶、高峰日及日产奶量变化速率等方面均表现出显著差异($P<0.05$),娟姗牛的高峰日较荷斯坦牛提前了 39.84 天,而高峰奶占总产奶量的比例较荷斯坦牛高 0.036%,且娟姗牛的泌乳主要集中于泌乳前期(1~99 d),在泌乳后期(200~305 d)产奶量显著降低($P<0.05$)。综上,本研究利用连续测定的日产奶量记录全面揭示了娟姗牛的泌乳特征,同时通过与荷斯坦牛泌乳曲线的比较为研究娟姗牛与荷斯坦牛的种间差异提供了有用信息,为今后利用连续监测的日产奶量记录进行奶牛产奶性能的遗传选育和牛群的精准管理提供了参考。

关键词 娟姗牛; 荷斯坦牛; 泌乳曲线; 日产奶量; 305 d 产奶量

中图分类号 S823.9+1

文章编号 1007-4333(2022)08-0149-13

文献标志码 A

Analysis of lactation curve in Jersey cattle in northern China and its comparison with Holstein cattle

WANG Ao¹, ZHU Lei¹, ZHANG Hailiang¹, SHI Rui¹, LIU Dengke², MA Yabin²,

NI Junqing², GUO Gang³, JIANG Guie^{2*}, WANG Yachun^{1*}

(1. Key Laboratory of Animal Genetics, Breeding and Reproduction (MARA), National Engineering Laboratory for Animal Breeding, College of Animal Science and Technology, China Agricultural University, Beijing 100193, China;

2. Hebei Livestock Breeding Station, Shijiazhuang 050061, China;

3. Beijing Sunlon Livestock Development Co. Ltd., Beijing 100176, China)

Abstract The objective of this study was to analyze the characteristics of the lactation curves and the influencing

收稿日期: 2021-09-23

基金项目: 财政部和农业农村部: 国家现代农业产业技术体系资助(CARS-36); 长江学者和创新团队发展计划(IRT_15R62); 北京三元种业科技股份有限公司自立科研课题(SYZYZ20190005); 农业高质量发展关键共性技术攻关专项(20326303D)

第一作者: 王澳, 硕士研究生, E-mail: 2816939006@qq.com

通讯作者: 王雅春, 教授, 主要从事分子数量遗传学研究, E-mail: wangyachun@cau.edu.cn;

蒋桂娥, 研究员, 主要从事畜禽养殖技术研发与推广, E-mail: 13833127625@163.com

factors of 305 d milk yield in Jersey cattle, and compare the differences of the lactation curves between Jersey and Holstein. The continuous records of daily milk yield from 1 721 Jersey cattle and 6 093 Holstein cattle were collected in a large-scale daily farm in Hebei from January 2017 to January 2021. Wood model was used to fit the individual lactation curves, and peak yield, peak day, rate of change in daily milk yield and milk yield in different lactation stage were determined to analyze the characteristics of the lactation curve. The GLM procedure in SAS 9.4 was used to analyze the impacts of parity and calving season on 305 d milk yield and the differences of the lactation curves between two breeds. The results showed: 1) The Wood model had a good fitting effect on the lactation curve of Jersey cattle, and its R^2 reached 0.86; 2) The 305 d milk yield of Jersey cattle was significantly ($P < 0.05$) influenced by the parity and calving season; the 305 d milk yield of Jersey cattle with higher parity and calving in spring was higher; 3) The lactation curve of Jersey cattle and Holstein cattle was significantly ($P < 0.05$) different in terms of peak yield, peak day and rate of change in daily milk yield. The peak day of Jersey cattle was 39.84 d earlier than that of Holstein cattle, and the proportion of peak yield in total milk yield was 0.036% higher than that of Holstein cattle. The milk production of Jersey cattle was mainly concentrated in the early lactation (1–99 days) and the milk production decreased significantly in the late lactation (200–305 days) ($P < 0.05$). In conclusion, this study comprehensively revealed the lactation characteristics of Jersey cattle using continuous records of daily milk yield, provided information for exploring breed differences between Jersey and Holstein cattle and provided a reference for genetic selection and precise management of dairy farm using continuous records of daily milk yield.

Keywords Jersey; Holstein; lactation curve; daily milk yield; 305 d milk yield

奶牛泌乳曲线是指用于描述奶牛的产奶量随泌乳天数变化趋势的数学模型^[1],对牧场生产及育种实践具有重要的指导意义,例如预测总体产奶量及牧场收益^[2]、动态调整奶牛饲养方案^[3]、制定牧场生产决策^[4]、定制奶牛日常管理系统^[4-5]等。目前,国内外已有大量研究分析了荷斯坦牛日产奶量的变化规律。研究表明,日产奶量随泌乳天数呈规律性、连续性变化,具体表现为奶牛自产犊后开始泌乳,日产奶量逐渐上升至高峰后缓慢下降,直至干奶^[6]。通常可以使用泌乳曲线对泌乳期内日产奶量的变化进行描述,其基本特征包括日产奶量上升阶段的上升速率,高峰奶,高峰奶出现的泌乳天数(高峰日)以及日产奶量的下降速率等。Wood模型(Wood's incomplete gamma function model)、AS模型(Ali-Schaeffer model)、Nelder模型(Nelder quadratic polynomial model)、混合线性模型等大量模型均已被成功应用于荷斯坦牛泌乳曲线拟合^[1-2,4-6]。在各泌乳曲线拟合模型中,应用最广泛且最具代表性是不完全伽马函数模型(Wood模型),该模型由Wood^[7]于1967年提出。研究发现,Wood模型对荷斯坦牛产奶量的拟合度较高,可以有效解释荷斯坦牛产奶量93%~98%的变异^[8],故本研究使用Wood模型进行泌乳曲线拟合。

受奶牛场生产管理智能化水平的限制,获取奶牛连续监测的日产奶量记录较为困难,国内外关于奶牛泌乳曲线的研究多利用测定日DHI(Dairy

herd improvement)记录进行^[6],通过DHI记录可以建立拟合准确度较高的模型对荷斯坦牛日产奶量的变化趋势进行描述与分析,并验证和比较已有模型在不同群体中的拟合能力。然而DHI记录在奶牛的每个泌乳月中只有一个记录,在刻画奶牛的泌乳性能和研究泌乳曲线上存在固有缺陷。随着我国规模化牧场智能化挤奶设备的普及和管理水平的持续提升^[9],部分牧场已可以实现全群奶牛每日产奶量的连续监测,如何有效利用连续监测日产奶量记录进行泌乳曲线拟合,并用于牧场精细化管理和奶牛遗传育种,已成为新的研究热点与挑战。

娟姗牛具有良好的乳用性能和对热应激环境的高适应性,对于丰富我国奶业的品种组成具有重要意义^[10]。自20世纪初娟姗牛被引入我国以来,养殖规模不断扩大,娟荷杂交牛已作为优良的新型耐热群体在我国南方高温地区推广养殖^[10]。国际上,一些研究已利用测定日DHI记录对娟姗牛的泌乳曲线进行了分析。例如,Wasike等^[11]研究初步证明了Wood模型对娟姗牛泌乳曲线的拟合能力;Hansen等^[12]、Mohanty等^[13]和Khan等^[14]的研究均表明了荷斯坦牛和娟姗牛的泌乳曲线在产奶量变化速率及高峰奶上表现出较大差异。然而这一方面的研究在我国奶牛群体中仍处于空白阶段,作为娟姗牛品种特征及与荷斯坦牛种间差异研究的重要一环,对娟姗牛泌乳曲线和日产奶量变化规律进行分析并将其与荷斯坦牛的泌乳规律进行比较具有重要

意义。

因此,本研究收集了河北地区某规模化牧场娟姗牛和荷斯坦牛连续监测日产奶量记录,旨在拟合娟姗牛的泌乳曲线,全面分析其305 d产奶量和泌乳曲线相关指标的影响因素,并比较荷斯坦牛和娟姗牛两个群体泌乳曲线之间的差异,以期在两品种奶牛种间差异研究,及有效利用每日连续监测的日产奶量记录进行生产性能选育提供理论依据与参考。

1 材料与方法

1.1 数据来源

1.1.1 日产奶量

本研究使用的数据来源于河北省定州市某规模化奶牛场,该牧场全群存栏约18 000头,同时饲养荷斯坦牛和娟姗牛,采用散栏牛舍进行饲养,实行TMR(Total mixed rations)饲喂、转盘式挤奶台集中挤奶,成母牛全群平均单产达到10 000 kg。该牧场的转盘式挤奶机可以测定并连续记录全群奶牛的每日产奶量。本研究收集了牧场2017年1月—2021年1月7 814头泌乳牛日产奶量记录共1 903 723条,覆盖了10 524个泌乳期,包括荷斯坦牛1 056 155条和娟姗牛847 568条,产奶量记录由奶厅智能监测系统自动导出。

1.1.2 繁殖记录

试验牧场的繁殖记录由牧场管理软件导出的事件信息整理而来,提取试验牛的胎次、产犊日期、配种日期、配种次数、出生日期和初产月龄等用于分析。

1.2 数据质控

对原始数据进行质控时,要求每头奶牛的泌乳天数处于1~305 d、日产奶量处于2.5~100 kg、初产日龄处于600~1 800 d;对每个泌乳期内日产奶量记录的条数进行质控,具体质控过程及每一步骤所对应的个体数、泌乳期数和数据量如表1所示。其中,步骤4剔除异常值时,分别对两个群体每个泌乳天数(Days in milk, DIM)内的日产奶量记录进行一次质控,剔除每个泌乳天数内产奶量低于平均值减3倍标准差的个体记录;步骤5~8保证了日产奶量数据在泌乳早、中、后期均匀分布且拥有充足的数据量用于奶牛个体泌乳曲线拟合。质控完成后,形成数据集1和数据集2;数据集1包括921头娟姗牛的435 836条(覆盖1 517个泌乳期)日产奶量记录;数据集2包括1 067头荷斯坦牛的311 413条

(覆盖1 067个泌乳期)日产奶量记录。数据集1和2中,每个个体每胎次内产奶量记录条数分布如图1所示,两群体奶牛在1~305 d内大多有300条以上产奶量记录,然而,仅有1%的泌乳期包含完整的305条产奶量记录,大量泌乳期内的记录不完整,需要对缺失值进行填充。

1.3 数据分析

1.3.1 泌乳曲线拟合

本研究选取Wood模型进行奶牛个体泌乳曲线拟合,数据集1和2的后续处理及拟合过程如图2所示。首先,步骤a采用简单移动平均法建立4-d窗口对每个泌乳期的日产奶量记录进行预处理,即对于奶牛第 n 天的日产奶量,利用第 $n-3$ 天、第 $n-2$ 天、第 $n-1$ 天和第 n 天数据的平均值进行赋值,第1~3天产奶量记录保持原值,如式(1)所示。使4-d窗口遍历整个泌乳期,完成移动窗口平均平滑。

$$x_n = \frac{x_{n-3} + x_{n-2} + x_{n-1} + x_n}{4} \quad (1)$$

基于步骤a平滑后的数据,步骤b采用Wood模型拟合每个个体每胎的泌乳曲线,并计算决定系数(R^2)和均方根误差(Root mean squared error, RMSE)作为拟合准确度的判断标准。Wood模型如式(2)所示,其求导函数形式表示了泌乳期内日产奶量的变化速率,如式(3)所示。其中, t 表示泌乳天数; Y_t 表示该泌乳天数的日产奶量; a 表示奶牛的泌乳潜力, b 表示泌乳曲线下降阶段的速率, c 表示曲线达到高峰的速率^[2]; e 表示自然常数。

$$Y_t = at^b e^{-at} \quad (2)$$

$$Y'_t = abt^{b-1} e^{-at} - act^b e^{-at} \quad (3)$$

为了降低少数偏离数据点对拟合曲线的影响,在步骤c中计算了每一条泌乳曲线实际记录点与曲线拟合值间的离差,并利用四分位法去除极端低于泌乳曲线的数据点(负偏离点),再次进行Wood模型拟合,反复执行曲线拟合和偏离点判定直至不再产生新的负偏离点,得到个体最终Wood曲线。

为了保证后续分析的准确性,在步骤d中对曲线的拟合程度进行了二次质控,质控条件为日产奶量拟合值处于0~100 kg、 $R^2 > 0.7$ 、RMSE < 3。步骤e中利用泌乳曲线拟合值对相应泌乳期内日产奶量记录中的缺失值进行填充,最终得到1 607头奶牛共490 135条日产奶量数据,共计1 607个泌乳期,用于计算305 d产奶量。其中,娟姗牛有1 001个泌乳期,荷斯坦牛有606个泌乳期。

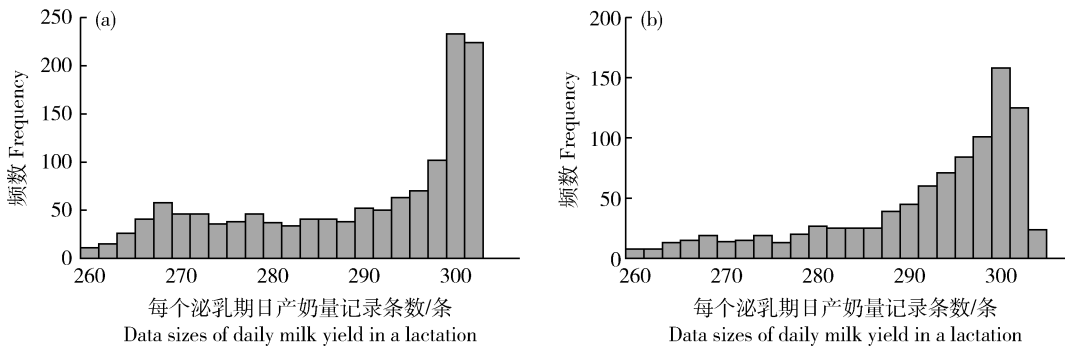
表1 数据质控过程
Table 1 Process control of the data quality

步骤 Step	质控项目 Item	质控条件 Condition	娟姗牛 Jersey			荷斯坦牛 Holstein		
			个体数/ 头 Number of cows	泌乳期/ 个 Number of lactations	数据量/ 条 Data size	个体数/ 头 Number of cows	泌乳期/ 个 Number of lactations	数据量/ 条 Data size
0	原始数据 Raw data		1 721	3 850	847 568	6 093	6 674	1 056 155
1	泌乳天数 Days in milk	1~305 d	1 662	3 680	735 740	5 803	6 150	876 372
2	日产奶量 Daily milk yield	2.5~100 kg	1 657	3 672	721 669	5 781	6 122	863 549
3	初产日龄 Age at first calving	600~1800 d	1 657	3 672	721 669	5 781	6 122	863 549
4	异常值 Outliers	按 DIM 对数据进行 分组,利用 3 倍标准 差去除下侧异常值	1 657	3 672	721 669	5 781	6 122	863 549
5	305 d 内记录条数 Number of records within 305 d	>220 条	1 135	2 100	574 166	1 634	1 634	448 528
6	305 d 内记录的时间 跨度 Time span of records within 305 d	>260 d	954	1 629	465 384	1 125	1 125	326 662
7	首次记录 DIM DIM with the first record within a lactation	<30 d	950	1 616	461 932	1 103	1 103	320 857
8	末次记录 DIM DIM with the last record within a lactation	>270 d	921	1 517	435 836	1 067	1 067	311 413

1.3.2 泌乳曲线相关指标定义

本研究中,共定义了 305 d 产奶量(MY_{305})、高峰奶(PY)、高峰日(t_{PY})、日产奶量变化速率(v)、日产奶量最高提升速率(v_{max})、日产奶量下降阶段平均速率(v_{down})、各泌乳阶段产奶量占比比值(r_{lac})等 7 个泌乳曲线相关指标用于分析娟姗牛的泌乳曲线特征;在比较荷斯坦牛和娟姗牛泌乳曲线差异时,定

义了高峰奶占比(p_{PY})、日产奶量最高提升速率占比(p_{max})和日产奶量下降阶段平均速率占比(p_{down}) 3 个指标。其中, MY_{305} 指奶牛产犊后第 1 天至第 305 天的累计产奶量;PY 指奶牛产犊后第 1 天至第 305 天日最高产奶量^[15]; t_{PY} 指奶牛高峰奶时的泌乳天数^[15]; v 指奶牛日产奶量随泌乳天数的变化速率; v_{max} 指奶牛日产奶量变化速率的最大值,利用式(3)



(a)数据集 1, 娟姗牛; (b)数据集 2, 荷斯坦牛

(a) Dataset 1 (Jersey cattle); (b) Dataset 2 (Holstein cattle)

图 1 数据集 1 和 2 中每个泌乳期内日产奶量记录条数分布

Fig. 1 Distribution of record number within a lactation in dataset 1 and 2

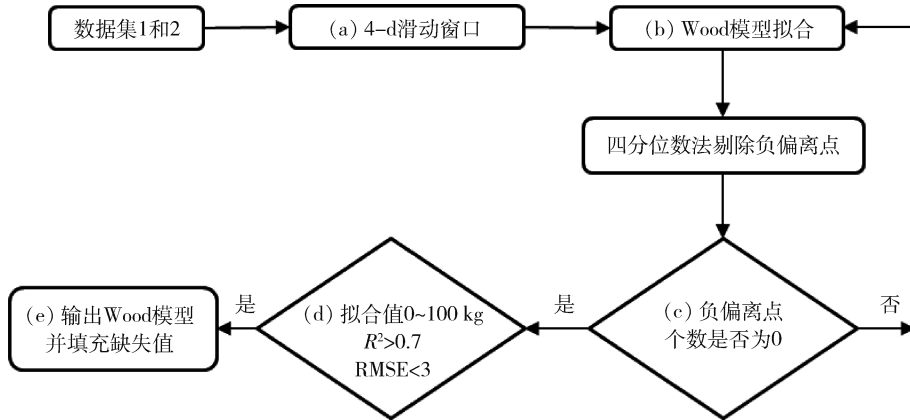


图 2 奶牛个体泌乳曲线拟合过程

Fig. 2 The fitting process of individual lactation curve

进行计算, 即 $t = 1 \sim 305$ d 时, Y'_t 的最大值; v_{down} 指奶牛高峰日后日产奶量变化速率的平均值, 利用式(3)进行计算, 即 $t = t_{PY} \sim 305$ d 内, Y'_t 的平均值; r_{lac} 指奶牛在泌乳早期(1~99 d)、泌乳中期(100~199 d)和泌乳后期(200~305 d)产奶总量占 MY_{305} 的比值; p_{PY} 指 PY 对 MY_{305} 的比值; p_{max} 指 v_{max} 对 MY_{305} 的比值; p_{down} 指 v_{down} 对 MY_{305} 的比值。

1.3.3 统计分析

基于 SAS 9.4 软件的 GLM 过程, 采用一般线性模型进行影响因素分析, 多重比较采用 Bonferroni t 检验, 显著水平设为 0.05。基于数据集 1 利用模型(1)分析娟姗牛 305 d 产奶量及泌乳曲线相关指标的影响因素, 基于数据集 1 和数据集 2 的并集利用模型(2)分析娟姗牛和荷斯坦牛泌乳曲线之间的差异。此外, 采用 SAS 9.4 软件的 CORR 过程分析娟姗牛 MY_{305} 、 PY 、 t_{PY} 、 v_{max} 和 v_{down}

等指标之间的相关。

$$Y_{ijkmn} = \mu + P_i + S_j + N_k + A_m + e_{ijkmn} \quad (1)$$

式中: Y_{ijkmn} 表示泌乳曲线 R^2 、 MY_{305} 、 PY 、 t_{PY} 、 μ 表示群体平均值, P_i 表示胎次 ($i = 1 \sim 4$), S_j 表示产犊季节 ($j = 1 \sim 4$), N_k 表示配种次数 ($k = 1, 2$), A_m 表示初产月龄 ($m = 1 \sim 4$), e_{ijkmn} 表示随机残差。

$$Y_{ijkmp} = \mu + P_i + S_j + N_k + A_m + B_n + e_{ijkmp} \quad (2)$$

式中: Y_{ijkmp} 表示曲线模型 R^2 及泌乳曲线相关指标, B_n 表示品种效应 ($n = 1, 2$), 其他因子的含义同模型 1。

本研究中, 将胎次划分为 4 个水平, 包括 1 胎、2 胎、3 胎和 4 胎及以上; 产犊季节划分为 4 个水平, 包括春季(3~5 月)、夏季(6~8 月)、秋季(9~11 月)和冬季(12~次年 2 月); 配种次数划分为 3 个水平, 包括 1 次、2 次和 3 次及以上; 初产月龄划分为 4

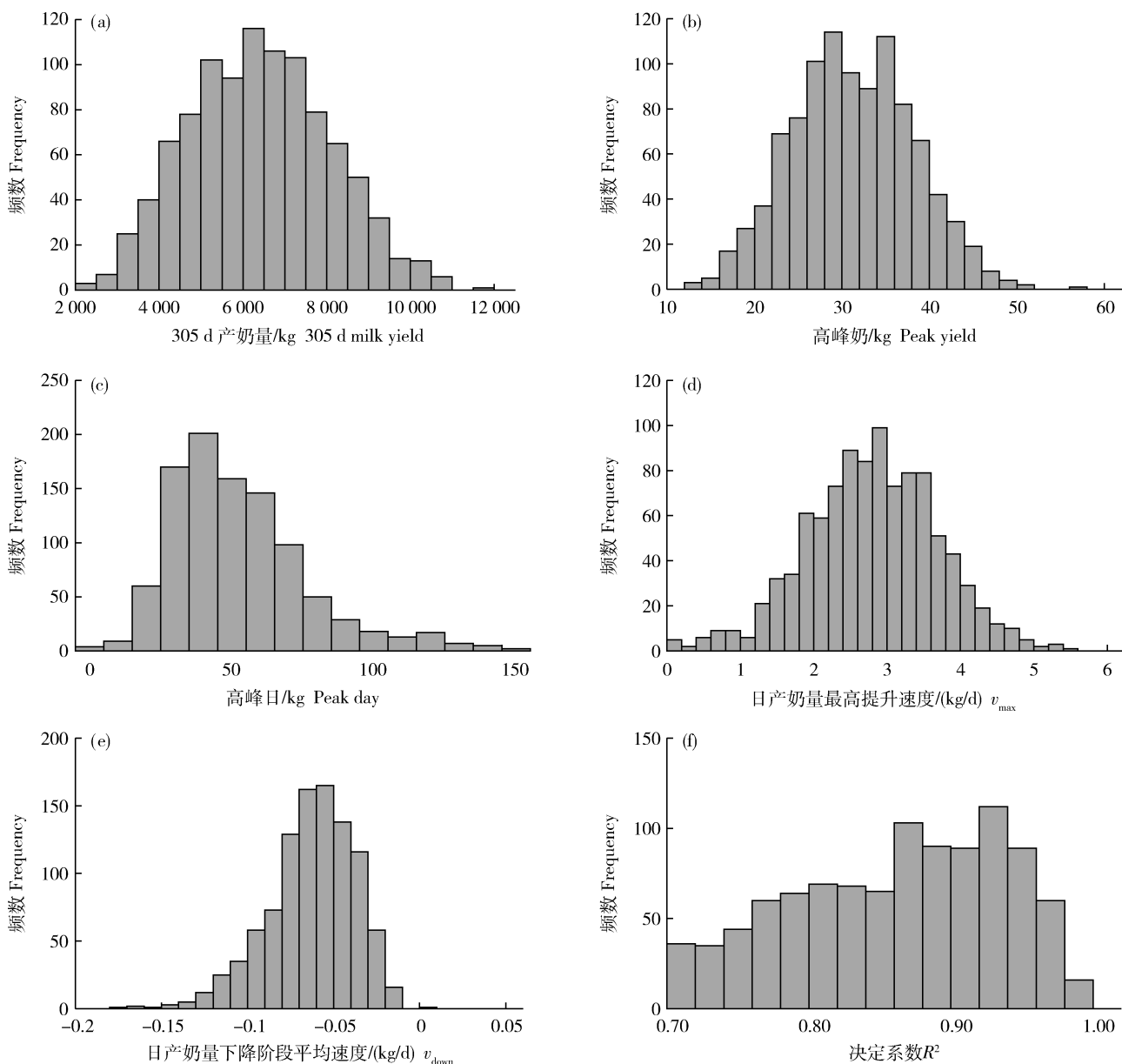
个水平,包括<23、23~24、25~26和27月龄及以上。

2 结果与分析

2.1 娟姗牛各泌乳曲线相关指标分布

本研究采用Wood模型对娟姗牛个体泌乳曲线进行拟合,平均 R^2 为 0.86 ± 0.07 ,模型拟合度可以

满足后续分析。娟姗牛个体泌乳曲线相关指标的分布如图3所示,包括305 d产奶量(图3(a))、高峰奶(图3(b))、高峰日(图3(c))、日产奶量最高提升速率(图3(d))、日产奶量下降阶段平均速率(图3(e))、 R^2 (图3(f))。 MY_{305} 、 PY 和 v_{max} 呈正态分布, t_{PY} 和 v_{down} 分别呈右偏态和左偏态分布,而模型 R^2 在0.7~1.0间分布较为均匀。



(a)305 d产奶量;(b)高峰奶;(c)高峰日;(d)日产奶量最高提升速率;(e)日产奶量下降阶段平均速率;(f) R^2

(a) 305 d milk yield; (b) Peak yield; (c) Peak day; (d) Maximum rate of increase of daily milk yield; (e) Average rate of decline of daily milk yield; (f) R^2

图3 娟姗牛泌乳曲线相关指标和模型 R^2 分布

Fig. 3 Distribution of lactation curve indicators and R^2 in Jersey cattle

娟姗牛泌乳曲线相关指标的描述性统计如表2所示。娟姗牛 MY_{305} 的平均值为 6 387.60 kg, 变异系数为 26.52%, 最大值为 11 622.89 kg, 最小值为 1 984.76 kg。PY 为 31.25 kg, t_{PY} 为 59.56 d, 在泌乳前、中、后期的产奶总量比为 1 : 0.873 : 0.628。

娟姗牛 v_{max} 平均为 2.78 kg/d, 99.0% 的 v_{max} 出现于泌乳第 1 天至第 2 天内, 即泌乳第 2 天的产奶量较第 1 天的高 2.78 kg。在日产奶量下降阶段, 娟姗牛 v_{down} 为 -0.06 kg/d, 即从泌乳高峰日(泌乳第 59 天)至第 305 天, 日产奶量下降约 14.76 kg。

表2 娟姗牛泌乳曲线相关指标描述性统计量

Table 2 Describe statistics of lactation curve indicators in Jersey cattle

项目 Item	平均值 Mean	标准差 SD	最大值 Max	最小值 Min
R^2	0.86	0.07	0.99	0.70
MY_{305}/kg	6 387.60	1 694.17	11 622.89	1 984.76
PY/kg	31.25	6.99	57.25	12.55
t_{PY}/d	59.56	28.00	291	9
泌乳早期(1~99 d)产奶量占比/% Proportion of milk yield from DIM 1 to DIM 99	39.97	5.01	58.95	27.17
泌乳中期(100~199 d)产奶量占比/% Proportion of milk yield from DIM 100 to DIM 199	34.91	2.34	44.57	26.13
泌乳后期(200~305 d)产奶量占比/% Proportion of milk yield from DIM 200 to DIM 305	25.11	4.86	36.41	8.32
$v_{max}/(\text{kg}/\text{d})$	2.78	0.92	5.51	-0.04
$v_{down}/(\text{kg}/\text{d})$	-0.06	0.03	0.00	-0.17

注: MY_{305} , 305 d 产奶量; PY, 高峰奶; t_{PY} , 高峰日; v_{max} , 日产奶量最高提升速率; v_{down} , 日产奶量下降阶段平均速率。下同。

Note: MY_{305} , 305 d milk yield; PY, Peak yield; t_{PY} , Peak day; v_{max} , Maximum rate of increase of daily milk yield; v_{down} , Average rate of decline of daily milk yield. The same below.

2.2 娟姗牛各泌乳曲线指标间相关性

本研究对娟姗牛泌乳曲线各指标进行相关性分析, 结果如表3所示。 MY_{305} 与 PY、 t_{PY} 、 v_{max} 等均呈极显著正相关($P < 0.01$), 而与 v_{down} 呈极显著负相关($P < 0.01$); 其中, MY_{305} 分别与 PY、 v_{max} 呈强正相关关系, 即娟姗牛的高峰奶越高, 日产奶量初期提升越快, 全泌乳期产奶量越高。 v_{down} 分别与 PY、 v_{max} 呈极显著中等负相关关系, 即娟姗牛高峰日前产奶量越高, 下降阶段日产奶量下降速率越大。

2.3 娟姗牛各指标影响因素

利用模型1分析胎次、产犊季节、初产月龄和配种次数对 R^2 和泌乳曲线相关指标的影响, 各因素不同水平的最小二乘均值及其标准误如表4所示。

2.3.1 模型拟合准确度(R^2)

本研究中, 胎次、产犊季节和初产月龄对 R^2 均

有显著影响($P < 0.05$)。随胎次的升高, R^2 呈现上升的趋势, 1胎娟姗牛的 R^2 最低, 为 0.836, 4胎及以上娟姗牛的 R^2 最高, 为 0.870。不同产犊季节中, 夏季产犊奶牛的拟合效果显著($P < 0.05$)高于冬季产犊的奶牛。不同初产月龄中, 23~24月龄首次产犊的娟姗牛的拟合效果显著($P < 0.05$)高于其他初产月龄的牛; 过早(小于23月龄)或过晚(大于27月龄)首次产犊的奶牛, 其泌乳曲线的拟合效果均较差。

2.3.2 305 d 产奶量、高峰奶、高峰日

由表4可知, 胎次、产犊季节和初产月龄对娟姗牛 MY_{305} 和 PY 均有显著影响($P < 0.05$), 胎次、产犊季节和配种次数对娟姗牛 t_{PY} 影响显著($P < 0.05$)。随着胎次的升高, MY_{305} 呈现逐渐增加的趋势, 在第1胎时最低(5 190.64 kg), 4胎及以上时达

表3 娟姗牛泌乳曲线各指标间相关系数

Table 3 Correlation coefficient of lactation curve indicators in Jersey cattle

项目 Item	MY ₃₀₅ /kg	PY/kg	t _{PY} /d	v _{max} /(kg/d)	v _{down} /(kg/d)
MY ₃₀₅ /kg		0.875**	0.154**	0.602**	-0.164**
PY/kg	<0.01		-0.043	0.700**	-0.505**
t _{PY} /d	<0.01	0.173		-0.101**	0.024
v _{max} /(kg/d)	<0.01	<0.01	<0.01		-0.420**
v _{down} /(kg/d)	<0.01	<0.01	0.451	<0.01	

注:上三角为相关系数,下三角为P值;右上角无上标代表相关关系不显著,上标*代表相关关系显著($P<0.05$),上标**代表相关关系极显著($P<0.01$)。

Note: The upper triangle is the correlation coefficient and the lower triangle is the P -value. No superscript in the upper right corner means the correlation is not significant, * means the correlation is significant ($P<0.05$), ** means the correlation is highly significant ($P<0.01$).

表4 各因素对娟姗牛泌乳曲线拟合准确度及相关指标的影响

Table 4 Effects of various factors on R^2 and lactation curve indicators in Jersey cattle

项目 Item	头数 Number	R^2	MY ₃₀₅ /kg	PY/kg	t _{PY} /d
胎次 Parity					
1胎 Lactation 1	215	0.84 b	5 190.64±109.04 c	24.40±0.42 c	67.26±1.95 a
2胎 Lactation 2	271	0.87 a	6 602.14±94.10 ab	32.21±0.36 b	54.87±1.68 b
3胎 Lactation 3	295	0.86 a	6 576.78±91.02 b	32.46±0.35 b	58.43±1.63 b
4胎及以上 Lactation 4+	220	0.87 a	6 977.06±106.74 a	34.25±0.41 a	60.80±1.91 ab
产犊季节 Calving season					
春季(3~5月) Spring	255	0.87 b	6 727.30±99.24 a	33.51±0.38 a	60.65±1.77 b
夏季(6~8月) Summer	313	0.89 a	5 893.55±87.84 b	30.07±0.34 b	56.11±1.57 bc
秋季(9~11月) Fall	189	0.85 c	6 001.00±109.88 b	29.39±0.42 b	52.32±1.96 c
冬季(12~次年2月) Winter	244	0.83 d	6 724.76±99.53 a	30.35±0.38 b	72.28±1.78 a
初产月龄 Age at first calving					
<23	177	0.86 ab	6 295.79±121.79 ab	30.34±0.47 ab	64.50±2.18
23~24	333	0.87 a	6 482.99±85.71 a	31.43±0.33 a	60.55±1.53
25~26	238	0.86 ab	6 048.78±102.23 b	29.74±0.39 b	57.34±1.83
27月龄及以上	253	0.85 b	6 519.07±98.76 a	31.81±0.38 a	58.97±1.76
配种次数 Number of insemination					
1次	447	0.86	6 301.68±75.36	30.94±0.29	57.75±1.35 b
2次	214	0.87	6 287.91±104.40	30.62±0.40	59.92±1.86 ab
3次及以上	340	0.86	6 420.37±86.33	30.94±0.33	63.34±1.54 a

注:表中 R^2 的标准误均小于0.01,故未在表中列出;同列数据后所标字母相异表示差异显著($P<0.05$),所标字母相同或无字母表示差异不显著($P>0.05$)。

Note: The standard errors of R^2 are less than 0.01 which are not listed in table 4. In the same column, values with different right letter superscripts mean significant difference ($P<0.05$), while the same or no letter superscripts mean no significant difference ($P>0.05$).

到最高(6 977.06 kg),PY随胎次的变化趋势与MY₃₀₅相同。在各产犊季节中,MY₃₀₅由高到低为春季(6 727.30 kg)、冬季(6 724.76 kg)、秋季(6 001.00 kg)和夏季(5 893.55 kg)。不同产犊月龄分组中,23~24月龄及27月龄以上初次产犊的娟姗牛,其MY₃₀₅显著高于其他月龄($P < 0.05$)。

对于高峰日,1胎娟姗牛 t_{PY} (67.26 d)显著($P < 0.05$)迟于其他胎次, t_{PY} 在2胎时降至最低,而后逐渐上升。在各产犊季节中, t_{PY} 由高到低依次为冬季(72.28 d)、春季(60.65 d)、夏季(56.11 d)和秋季(52.32 d)。初产月龄对 t_{PY} 无显著影响,但呈现出随初产月龄的增加, t_{PY} 逐渐降低的趋势。随着配种次数的增加, t_{PY} 呈上升的趋势,在3次及以上时达到最高(63.34 d)。

2.4 娟姗牛与荷斯坦牛泌乳曲线比较

利用模型2分析了娟姗牛和荷斯坦牛泌乳曲线间的差异,结果如表5和图4所示。娟姗牛泌乳曲线的拟合程度显著高于荷斯坦牛($P < 0.05$),娟姗牛的 t_{PY} 较荷斯坦牛提前了39.84 d, p_{PY} 较荷斯坦牛高0.036%。在泌乳初期,娟姗牛的初始产奶量(泌乳第1天时的平均产奶量)较荷斯坦牛更高,且 p_{max} 显著高于荷斯坦牛;在日产奶量下降阶段,娟姗牛的 v_{down} 约为0.063 kg/d,约占305 d产奶量的0.01%,显著($P < 0.05$)高于荷斯坦牛。娟姗牛在泌乳前、中、后期产奶量在305 d产奶量占比的比值为1:0.873:0.628,娟姗牛泌乳主要集中于泌乳前期,在泌乳后期总奶量显著($P < 0.05$)降低,而荷斯坦牛为1:1.106:0.956,在泌乳前、中、后期产奶总量较为稳定。

表5 娟姗牛和荷斯坦牛泌乳曲线相关指标之间的差异

Table 5 Differences of lactation curve indicators between Jersey and Holstein cattle

品种 Breed	R^2	MY ₃₀₅ /kg	PY/kg	$p_{PY}/\%$	t_{PY}/d
娟姗牛 Jersey	0.86 a	6 322.42±55.06 b	31.42±0.13 b	0.497 a	60.03±1.27 b
荷斯坦牛 Holstein	0.84 b	9 517.07±112.83 a	43.87±0.38 a	0.461 b	99.87±2.60 a
品种 Breed	$v_{max}/(kg/d)$	$p_{max}/\%$	$v_{down}/(kg/d)$	$p_{down}/\%$	r_{lac}
娟姗牛 Jersey	2.72±0.03 b	0.043 a	-0.063 b	-0.010 a	1:0.873:0.628
荷斯坦牛 Holstein	3.35±0.06 a	0.035 b	-0.065 a	-0.007 b	1:1.106:0.956

注:表中 R^2 、 p_{PY} 、 p_{max} 、 v_{down} 和 p_{down} 的标准误差均小于0.01,故未在表中列出;同列数据后所标字母相异表示差异显著($P < 0.05$),所标字母相同表示差异不显著($P > 0.05$)。MY₃₀₅,305 d产奶量;PY,高峰奶; p_{PY} ,PY对MY₃₀₅的比值; t_{PY} ,高峰日; v_{max} ,日产奶量最高提升速率; p_{max} 、 v_{max} 对MY₃₀₅的比值; v_{down} ,日产奶量下降阶段平均速率; p_{down} 、 v_{down} 对MY₃₀₅的比值; r_{lac} ,奶牛在泌乳早、中、后期产奶总量占MY₃₀₅的比值。

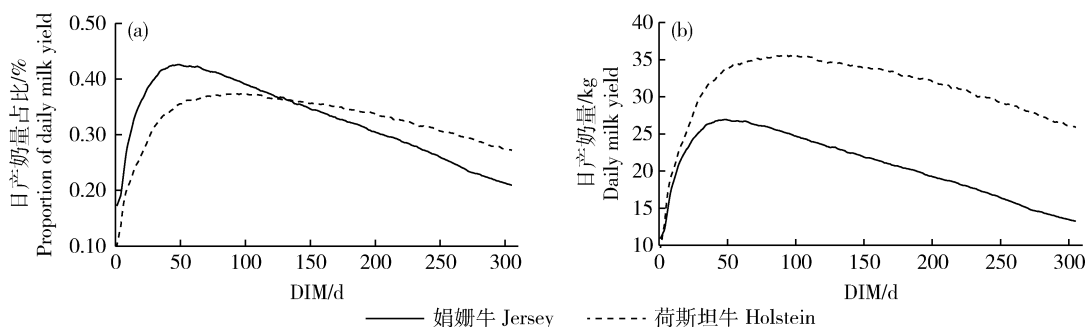
Note: The standard errors of R^2 , p_{PY} , p_{max} , v_{down} and p_{down} are less than 0.01 which are not listed in table 5. In the same column, values with different right letter superscripts mean significant difference ($P < 0.05$), while the same or no letter superscripts mean no significant difference ($P > 0.05$). MY₃₀₅, 305 d milk yield; PY, peak yield; p_{PY} , the ratio of PY to MY₃₀₅; t_{PY} , peak day; v_{max} , maximum rate of increase of daily milk yield; p_{max} , the ratio of v_{max} to MY₃₀₅; v_{down} , average rate of decline of daily milk yield; p_{down} , the ratio of v_{down} to MY₃₀₅; r_{lac} , the ratio of total milk yield in early, middle and late lactation stage to MY₃₀₅.

3 讨论

3.1 连续监测数据的处理方法

受奶牛场日产奶量监测设备和技术条件限制,

国内外大多利用DHI记录对奶牛泌乳曲线进行研究,然而这种方式存在数据量小、精细化程度低的缺陷,无法对奶牛日产奶量变化规律进行深入描述与刻画。随着智能化挤奶设备在我国牧场的推广及应



(a) 娟姗牛和荷斯坦牛每个泌乳天数下日产奶量占 305 d 产奶量的比值; (b) 娟姗牛和荷斯坦牛每个泌乳天数下的平均日产奶量
(a) Proportion of daily milk yield per lactation for Jersey and Holstein; (b) Daily milk yield per lactation for Jersey and Holstein

图 4 娟姗牛和荷斯坦牛泌乳曲线之间的差异

Fig. 4 Differences of lactation curve in Jersey and Holstein cattle

用,如何对大量日产奶量连续监测数据进行研究与分析,并将其有效应用于奶牛遗传育种及牧场实践中,必将在今后成为领域内新的问题与挑战。本研究针对连续监测记录中数据波动大、噪声数据多的特点,创新了数据处理方式,取得了良好的效果。首先,本研究利用简单移动平均法建立 4 d 窗口对数据集进行预处理。简单移动平均法能够对时间序列数据进行逐项推移,依次计算出给定项数的均值,是一种简单高效的预测方法,能够有效消除数据随机波动的影响,突出显示数据的变化趋势。Poppe 等^[16]研究证明了利用滑动窗口消除连续日产奶量记录中随机波动的有效性。在拟合泌乳曲线时,对每一个泌乳期,采用边质控边拟合的方式,反复利用四分位法选择并去除噪声数据,提升了曲线拟合质量,保证曲线能够真实还原奶牛日产奶量的变化趋势。最后,为了保证后续分析的准确性,本研究对泌乳曲线进行了二次质控。综上,本研究数据处理方法为今后奶牛日产奶量及其他连续监测数据的处理及分析提供了参考。

3.2 娟姗牛 305 d 产奶量及其影响因素

娟姗牛产奶量的遗传力为 0.08~0.28^[17],与荷斯坦牛相近(0.30 左右^[18])。因此,娟姗牛的产奶量同样受遗传和环境因素共同影响。本研究发现,胎次对娟姗牛 305 d 产奶量有显著影响,头胎产奶量显著低于其他胎次,与 Mohanty 等^[13]和 Wasike 等^[11]研究结果一致。有研究指出,荷斯坦牛初产牛由于仍处于生长阶段^[19],采食量较低、乳腺分泌组织发育不完善^[20],305 d 产奶量较经产牛更低;娟姗牛初产牛的生长趋势与荷斯坦牛类似^[21],故胎次对产奶量表现出相同影响。在娟姗牛的日常管理中,

应注意分群饲养,注重低胎次奶牛的生长需求和日粮的营养水平,以提高牧场的生产效益。

产犊季节对娟姗牛 305 d 产奶量影响显著,夏季产犊的奶牛 305 d 产奶量最低,春季最高。研究表明,温湿度指数的变化对奶牛日产奶量存在显著影响^[22],夏季产犊的奶牛在泌乳高峰期将经历严重的热应激,影响到泌乳曲线上阶段日产奶量的提升,从而大幅降低了其 305 d 产奶量。李朝明等^[23]研究表明,娟姗牛在受热应激影响后,产奶量约下降了 14.08%,同时,有研究表明^[24],奶牛不同季节的采食量和营养水平也存在较大差异,这可能也是影响娟姗牛不同产犊季节下 305 d 产奶量的重要因素之一。

奶牛的配种次数相对反映了其妊娠能力,是一种重要的功能性状^[25];初产月龄反映了奶牛的生长水平及受孕能力,是一种重要的生产指标^[26]。对于荷斯坦牛而言,许多研究表明,初产月龄在 24 月龄时可获得最佳的生产效益,而配种次数与产奶量之间的关系并不明确。然而,对于娟姗牛的初产月龄、配种次数等繁殖性状与泌乳性能之间的关系,国内外均鲜有研究。本研究结果表明,随着初产月龄和配种次数的增加,娟姗牛的 305 d 产奶量呈现逐渐上升的趋势。大量研究报道了奶牛泌乳性能与繁殖性能之间存在负相关关系,高产奶牛往往表现出产犊间隔更长、初产月龄更高及配种次数增加的趋势^[27-29],与本研究结果相符。因此,在牧场生产管理中,要注重处理娟姗牛泌乳性能和繁殖性能之间的关系,保障牧场整体收益。

3.3 娟姗牛和荷斯坦牛泌乳曲线比较

本研究选取 Wood 模型作为个体泌乳曲线的拟

合模型,以比较娟姗牛和荷斯坦牛泌乳曲线间的差异。许多研究^[12,14,30]报道了不同品种奶牛泌乳曲线形状的差异,包括荷斯坦牛、娟姗牛、娟荷杂交牛、丹麦红牛等,其差异主要表现在高峰奶、高峰日、泌乳初期产奶量以及泌乳持续力等指标。泌乳持续力是指奶牛在日产奶量达到峰值后维持产量的能力^[31],在 DHI 报告中通常使用测定日记录进行计算^[15]。在本研究中,高峰日后日产奶量下降阶段的平均速率(v_{down})能够间接表现泌乳持续力; v_{down} 越小,泌乳持续力越低。Mohanty 等^[13]研究指出,奶牛的高泌乳性能与其泌乳初期高初始产量、高持续力显著相关。本研究中,娟姗牛泌乳初期的产奶量及提升速率显著高于荷斯坦牛,在两群体日产奶量达到高峰时,娟姗牛的高峰奶占比更高,高峰日较荷斯坦牛显著提前,且日产奶量的下降速率显著快于荷斯坦牛,故娟姗牛在泌乳中后期的总产奶量显著降低,从而使娟姗牛总泌乳性能低于荷斯坦牛,各泌乳阶段产奶量占比间的差异也更大。综上,在生产管理和奶牛育种中,应注重奶牛高峰奶和持续力的综合提升,以发挥奶牛泌乳潜力,提高泌乳期总产奶水平。

3.4 Wood 模型对娟姗牛泌乳曲线的拟合能力

Wood 模型强调了泌乳曲线的基本特征^[32],对奶牛群体产奶量的拟合度较高,因此成为研究和应用中最为广泛使用的模型;同时,Wood 模型也存在一些不足。Dematawewa 等^[4]和 Dijkstra 等^[33]指出,Wood 模型所估计的泌乳曲线易高估泌乳前期和后期的产奶量,而对泌乳中期的产奶量有所低估;此外,Wood 模型的 3 个参数之间具有高度相关性(0.70~0.90)^[34],这种参数特征不可避免地会造成模型对原数据分布的高敏感性。本研究表明,Wood 模型对娟姗牛泌乳曲线拟合效果较优,模型 R^2 可达 0.86,显著高于荷斯坦牛。Wasike 等^[11]和 Khan 等^[14]表明,相较于其他模型,Wood 模型对娟姗牛日产奶量的适应性更强,表现出更优的拟合精度。

不同模型在不同品种奶牛泌乳曲线拟合的效果存在差异,这种差异可能与品种效应、模型适用范围等有关^[14]。本研究发现,荷斯坦牛的 305 d 产奶量显著高于娟姗牛;若将本研究中所有泌乳曲线相关指标由比例形式转换为原形式(图 4(b)),则娟姗牛的高峰奶和 v_{max} 均显著低于荷斯坦牛,即娟姗牛在全泌乳期内日产奶量的变化幅度较荷斯坦牛更小,这可能也是导致 Wood 模型对娟姗牛拟合度更高的原因之一,即 Wood 模型可能更适于拟合泌乳期内

日产奶量波动较小的奶牛。Melzer 等^[35]研究指出,与 AS 模型及非参数模型等参数计算较为复杂的模型相比,Wood 模型对变化速率较快或波动较大的日产奶量数据拟合效果相对较差,与本研究推测相符。

4 结 论

本研究利用娟姗牛和荷斯坦牛日产奶量的每日连续监测记录进行了泌乳曲线拟合,分析了娟姗牛泌乳曲线相关指标的影响因素,并比较了娟姗牛和荷斯坦牛泌乳曲线间的差异。研究发现,胎次、产犊季节和初产月龄等因素对娟姗牛 305 d 产奶量有显著影响,娟姗牛与荷斯坦牛在高峰奶、高峰日和日产奶量变化速率等方面均表现出显著差异,娟姗牛泌乳集中于泌乳前期(1~99 d)且高峰日较荷斯坦牛提前 39.84 d。综上,本研究为揭示我国饲养条件下娟姗牛的泌乳特征,比较相同管理条件下荷斯坦牛与娟姗牛泌乳曲线的种间差异提供了理论依据,并为利用每日连续监测的日产奶量记录进行牧场精准管理和产奶性能选育提供了参考。

参考文献 References

- [1] 栗敏杰,任小丽,闫磊,闫跃飞,白雪利,李静茹,李学钦,邓好好,张震,高腾云. 荷斯坦奶牛泌乳曲线拟合分析[J]. 家畜生态学报, 2020, 41(9): 34-38
Li M J, Ren X L, Yan L, Yan Y F, Bai X L, Li J R, Li X Q, Deng H H, Zhang Z, Gao T Y. Fitting analysis of lactation curve of Holsteins[J]. *Journal of Domestic Animal Ecology*, 2020, 41(9): 34-38 (in Chinese)
- [2] 罗清尧,熊本海,马毅,庞之洪,邓文. 中国荷斯坦奶牛第二泌乳期泌乳曲线模型的研究[J]. 中国农业科学, 2010, 43(23): 4910-4916
Luo Q Y, Xiong B H, Ma Y, Pang Z H, Deng W. Study on lactation curve models of Chinese Holstein for the second parity[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2010, 43(23): 4910-4916 (in Chinese)
- [3] 熊本海,吕健强,罗清尧,熊恺. 基于 Internet/Intranet 集约化奶牛场精细养殖技术平台的构建[J]. 畜牧兽医学报, 2005, 36(11): 1163-1169
Xiong B H, Lv J Q, Luo Q Y, Xiong K. Construction of precision feeding technical platform for dairy cattle farm on Internet/Intranet [J]. *Chinese Journal of Animal and Veterinary Sciences*, 2005, 36(11): 1163-1169 (in Chinese)
- [4] Dematawewa C M B, Pearson R E, VanRaden P M. Modeling extended lactations of Holsteins [J]. *Journal of Dairy Science*, 2007, 90(8): 3924-3936

- [5] Adriaens I, Huybrechts T, Aernouts B, Geerineckx K, Piepers S, De Ketelaere B, Saeys W. Method for short-term prediction of milk yield at the quarter level to improve udder health monitoring[J]. *Journal of Dairy Science*, 2018, 101(11): 10327-10336
- [6] Macciotta N P P, Dimauro C, Rassu S P G, Steri R, Pulina G. The mathematical description of lactation curves in dairy cattle[J]. *Italian Journal of Animal Science*, 2011, 10(4): e51
- [7] Wood P D P. Algebraic model of the lactation curve in cattle [J]. *Nature*, 1967, 216(5111): 164-165
- [8] 孔令娜. 利用中国荷斯坦奶牛 DHI 数据对 305 天产奶量估计方法的比较研究[D]. 保定: 河北农业大学, 2016
- Kong L N. Estimation of 305 day milk yield from test-day records of Chinese Holstein cattle by DHI database [D]. Baoding: Hebei Agricultural University, 2016 (in Chinese)
- [9] 王晓芳, 郝丹, 张烨迪, 符乐, 安永福, 邵丽玮. 河北省奶牛智能化养殖现状调研与分析[J]. 今日畜牧兽医, 2020, 36(12): 63-64, 77
- Wang X F, Hao D, Zhang Y D, Fu L, An Y F, Shao L W. Research and analysis of the current situation of intelligent dairy farming in Hebei Province [J]. *Today Animal Husbandry and Veterinary Medicine*, 2020, 36(12): 63-64, 77 (in Chinese)
- [10] 张明军, 郝海生, 朱化彬, 杜卫华, 王栋. 娟姗牛: 我国奶业生产重要的品种遗传资源[J]. 中国奶牛, 2008(1): 11-14
- Zhang M J, Hao H S, Zhu H B, Du W H, Wang D. Jersey cattle: an important breed genetic resource for dairy production in China[J]. *China Dairy Cattle*, 2008(1): 11-14 (in Chinese)
- [11] Wasike C B, Kahi A K, Peters K J. Modelling of lactation curves of dairy cows based on monthly test day milk yield records under inconsistent milk recording scenarios [J]. *Animal*, 2011, 5(11): 1780-1790
- [12] Hansen J V, Friggens N C, Højsgaard S. The influence of breed and parity on milk yield, and milk yield acceleration curves[J]. *Livestock Science*, 2006, 104(1/2): 53-62
- [13] Mohanty B S, Verma M R, Sharma V B, Patil V K. Effect of parity on the shape of lactation curves in purebred Jersey cows in Indian conditions[J]. *Biological Rhythm Research*, 2019: 1-14
- [14] Khan M K I, Blair H T, Lopez-Villalobos N. Lactation curves of different cattle breeds under cooperative dairying conditions in Bangladesh [J]. *Journal of Applied Animal Research*, 2012, 40(3): 179-185
- [15] 刘丑生, 李丽丽, 张胜利, 陈绍祜. 奶牛生产性能测定及应用 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2016: 125-127
- Liu C S, Li L L, Zhang S L, Chen S H. *Dairy herd improvement and applications* [M]. Beijing: Chinese Agriculture Press, 2016: 125-127 (in Chinese)
- [16] Poppe M, Veerkamp R F, van Pelt M L, Mulder H A. Exploration of variance, autocorrelation, and skewness of deviations from lactation curves as resilience indicators for breeding[J]. *Journal of Dairy Science*, 2020, 103(2): 1667-1684
- [17] Çankaya S, Takma Ç, Abacı S H, Ülker M. A comparison of some random regression models for first lactation test day milk yields in Jersey cows and estimating of genetic parameters[J]. *Kafkas Universitesi Veteriner Fakültesi Dergisi*, 2014, 20(1): 5-10
- [18] 梁艳, 张强, 唐程, 郭佳禾, 王梦琦, 张慧敏, 李明勋, 杨章平, 毛永江. 影响荷斯坦牛 305 d 泌乳性能的因素分析[J]. 中国畜牧杂志, 2020, 56(4): 56-59, 65
- Liang Y, Zhang Q, Tang C, Guo J H, Wang M Q, Zhang H M, Li M X, Yang Z P, Mao Y J. Analysis of factors affecting 305-days milking traits of Holstein cows[J]. *Chinese Journal of Animal Science*, 2020, 56(4): 56-59, 65 (in Chinese)
- [19] Vijayakumar M, Park J H, Ki K S, Lim D H, Kim S B, Park S M, Jeong H Y, Park B Y, Kim T I. The effect of lactation number, stage, length, and milking frequency on milk yield in Korean Holstein dairy cows using automatic milking system [J]. *Asian-Australasian Journal of Animal Sciences*, 2017, 30(8): 1093-1098
- [20] Masia F M, Lyons N A, Piccardi M, Balzarini M, Hovey R C, Garcia S C. Modeling variability of the lactation curves of cows in automated milking systems [J]. *Journal of Dairy Science*, 2020, 103(9): 8189-8196
- [21] Kuhl H D, Hossein-Zadeh N G, López S, Falahi S, France J. Sinusoidal function to describe the growth curve of dairy heifers[J]. *Animal Production Science*, 2019, 59(6): 1039-1047
- [22] 童津津, 张华, 吴富鑫, 牛慧, 熊本海, 蒋林树. 不同泌乳水平奶牛产奶量、乳成分和环境湿温指数的相关性研究[J]. 动物营养学报, 2020, 32(7): 3171-3180
- Tong J J, Zhang H, Wu F X, Niu H, Xiong B H, Jiang L S. Correlation analysis on milk yield, milk composition and temperature humidity index of dairy cows with different milk yield[J]. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2020, 32(7): 3171-3180 (in Chinese)
- [23] 李朝明, 别应堂, 魏学良. 热应激对荷斯坦和娟姗及娟荷杂交奶牛生产性能的影响[J]. 中国畜牧杂志, 2014, 50(17): 77-81
- Li C M, Bie Y T, Wei X L. Effects of heat stress on Holstein, Jersey and Jersey×Holstein dairy cows[J]. *Chinese Journal of Animal Science*, 2014, 50(17): 77-81 (in Chinese)
- [24] 黄锋, 陆庆, 颜育良, 杨建东, 窦志斌, 陈瑶, 黄木家, 姜莉, 陈俊阳. 季节对奶牛日粮采食量的影响[J]. 广东奶业, 2007(3): 5-7
- Huang F, Lu Z, Yan Y L, Yang J D, Dou Z B, Chen Y, Huang M J, Jiang L, Chen J Y. The effect of season on dairy cattle diet intake[J]. *Guangdong Dairy Production*, 2007(3): 5-7 (in Chinese)

- [25] 再娜古丽·君居列克, 黄锡霞, 周靖航, 塔西买买提·马合苏, 木古丽·木哈西. 中国荷斯坦牛成母牛繁殖性状的遗传参数估计[J]. 中国畜牧杂志, 2017, 53(4): 55-58
Zainaguli · Junjulieke, Huang X X, Zhou J H, Taximaimaiti · Mahesi, Muguli · Muhaxi. Estimation of genetic parameters of reproductive traits in Chinese Holstein cows[J]. *Chinese Journal of Animal Science*, 2017, 53(4): 55-58 (in Chinese)
- [26] 再娜古丽·君居列克, 塔西买买提·马合苏, 木古丽·木哈西, 黄锡霞, 张维, 刘丽元. 荷斯坦牛首次产犊日龄与305 d产奶量遗传参数的评估[J]. 家畜生态学报, 2017, 38(5): 17-20
Zainaguli · Junjulieke, Taximaimaiti · Mahesu, Muguli · Muhaxi, Huang X X, Zhang W, Liu L Y. Genetic evaluation of age at first calving and 305-day milk yield for Holstein dairy cows[J]. *Journal of Domestic Animal Ecology*, 2017, 38(5): 17-20 (in Chinese)
- [27] Toghiani Pozveh S, Shadparvar A A, Moradi Shahrabak M, Taromsari M D. Genetic analysis of reproduction traits and their relationship with conformation traits in Holstein cows[J]. *Livestock Science*, 2009, 125(1): 84-87
- [28] 郑中华, 马红霞, 刘海云. 高产奶牛繁殖性能低的原因分析[J]. 中国饲料, 2019(12): 14-18
Zheng Z H, Ma H X, Liu H Y. Analysis of reasons for low reproductive performance of high yield dairy cows[J]. *China Feed*, 2019(12): 14-18 (in Chinese)
- [29] 段向阳, 张春红, 张世元, 郑拉弟, 蔡涛, 马新兵, 骆荣生, 黄锡霞. 产犊间隔对新疆北疆地区西门塔尔牛305 d产奶量的影响[J]. 草食家畜, 2009(3): 59-61
Duan X Y, Zhang C H, Zhang S Y, Zheng L D, Cai T, Ma X B, Luo R S, Huang X X. Effects of calving interval on milk production for simmental in the northern region of Xinjiang[J]. *Grass-Feeding Livestock*, 2009(3): 59-61 (in Chinese)
- [30] Nasri M H F, France J, Odongo N E, Lopez S, Bannink A, Kebreab E. Modelling the lactation curve of dairy cows using the differentials of growth functions[J]. *The Journal of Agricultural Science*, 2008, 146(6): 633-641
- [31] Hickson R E, Lopez-Villalobos N, Dalley D E, Clark D A, Holmes C W. Yields and persistency of lactation in Friesian and Jersey cows milked once daily[J]. *Journal of Dairy Science*, 2006, 89(6): 2017-2024
- [32] 毛永江, 张亚琴, 许兆君, 刘姗, 张美荣, 常玲玲, 杨章平. 中国荷斯坦牛泌乳曲线拟合研究[J]. 畜牧兽医学报, 2011, 42(9): 1239-1248
Mao Y J, Zhang Y Q, Xu Z J, Liu S, Zhang M R, Chang L L, Yang Z P. Fitting of lactation curves for Chinese Holstein[J]. *Chinese Journal of Animal and Veterinary Sciences*, 2011, 42(9): 1239-1248 (in Chinese)
- [33] Dijkstra J, Lopez S, Bannink A, Dhanoa M S, Kebreab E, Odongo N E, Fathi Nasri M H, Behera U K, Hernandez-Ferrer D, France J. Evaluation of a mechanistic lactation model using cow, goat and sheep data[J]. *Journal of Agricultural Science*, 2010, 148(3): 249-262
- [34] Macciotta N P P, Vicario D, Cappio-Borlino A. Detection of different shapes of lactation curve for milk yield in dairy cattle by empirical mathematical models[J]. *Journal of Dairy Science*, 2005, 88(3): 1178-1191
- [35] Melzer N, Trißl S, Nürnberg G. Short communication: Estimating lactation curves for highly inhomogeneous milk yield data of an F₂ population (Charolais × German Holstein)[J]. *Journal of Dairy Science*, 2017, 100(11): 9136-9142

责任编辑: 秦梅