



基于血液生理指标探究巴美牛的生理特性

平措卓嘎¹, 石确桑姆¹, 久美¹, 索郎旦增¹, 米玛潘多¹, 扎西旺堆¹, 米玛¹, 色珍¹,
旦增平措⁴, 尼玛仓决³, 旦增洛桑^{3*}, 孔小艳^{2*}

(1. 墨脱县兽防站, 墨脱 860700; 2. 云南农业大学动物科学技术学院, 昆明 650201; 3. 西藏农牧科学院畜牧兽医研究所, 拉萨 850009; 4. 墨脱镇农牧综合服务中心, 墨脱 860700)

摘要: 旨在探讨不同性别、年龄及海拔因素对巴美牛血常规及血流变学指标的影响, 为进一步了解巴美牛在不同环境下的生理适应机制提供依据。本研究选取林芝市不同海拔分布的166头健康巴美牛个体, 对其21项血常规和13项血流变指标进行了测定。对各指标进行了描述性统计, 性别、年龄和海拔等因素的方差分析, 以及指标间相关性分析。结果表明, 巴美牛的血常规各项指标均在参考范围之内, 显示其血液生理指标处于正常状态。方差分析显示, 性别、年龄和海拔因素对巴美牛血液生理指标具有显著影响。母牛在红细胞体积及血小板活性指标上显著高于公牛($P < 0.05$); 未成年牛在淋巴细胞计数、血小板数量等免疫与造血活性指标上显著高于成年牛($P < 0.05$), 表明性别和年龄对血液构成与流变性能具有一定影响。海拔因素的影响尤为显著, 随着海拔的升高, 红细胞计数(red blood cell count, RBC)、血红蛋白(hemoglobin concentration, HGB)、红细胞压积(hematocrit, HCT)等携氧相关指标显著增加($P < 0.05$), 表现出典型的高原造血适应趋势; 同时, 血浆黏度、聚集性指标及全血流阻均显著升高($P < 0.05$), 提示血液在高原环境中更趋黏稠, 流动性下降。进一步的相关性分析中, 血常规和血流变各系统内部指标间呈显著正相关, 如红细胞系统中的HGB与HCT、平均红细胞体积(mean corpuscular volume, MCV)与平均血红蛋白量(mean corpuscular hemoglobin, MCH)的相关系数均高达0.98; 血流变中血浆黏度、纤维蛋白原与红细胞内黏度之间相关系数达1.00。这些相关性结果揭示了巴美牛血液生理指标之间内在的紧密联系和相互影响机制。研究结果表明, 巴美牛具备通过增强红细胞生成、调节血液流变特性等方式来适应高原低氧环境的能力, 为深入理解高原家畜低氧适应机制提供了重要的生理学依据。

关键词: 巴美牛; 血常规检测; 血流变; 红细胞数; 血红蛋白浓度; 血液粘稠度

中图分类号: S823.2

文献标志码: A

文章编号: 0366-6964(2026)03-1398-15

Investigating the Physiological Characteristics of Bamei Cattle Based on Hematological Indicators

PINGCUO Zhuoga¹, SHIQUE Sangmu¹, JIU Mei¹, SUOLANG Danzeng¹, MIMA Panduo¹,
ZHAXI Wangdui¹, MI Ma¹, SE Zhen¹, DANZENG Pingcuo⁴, NIMA Cangjue³,
DANZENG Losang^{3*}, KONG Xiaoyan^{2*}

(1. Veterinary Prevention Station of Motuo County, Motuo 860700, China; 2. Faculty of Animal Science and Technology, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China; 3. Institute of Animal Husbandry and Veterinary Medicine, Tibet Academy of Agricultural and Animal Sciences, Lhasa 850009, China;

收稿日期: 2025-07-08

基金项目: 重点研发及转化(林芝特有种质资源保护与创新利用)(QYKJ2024-04); 西藏自治区科技计划项目(课题)重点研发计划(XZ202301ZY0008N); 国家自然科学基金地区科学基金项目(32260823); 区域科技协同创新专项(QYXTZX-RKZ2025-04-3)

作者简介: 平措卓嘎, 本科, 主要从事动物疫病防控与检疫, E-mail: 1636624620@qq.com

* **通信作者:** 孔小艳, 主要从事高原动物抗逆性状研究, E-mail: 493384984@qq.com; 旦增洛桑, 主要从事奶牛遗传育种与繁殖研究, E-mail: 441284644@qq.com

4. *Motuo Town Integrated Agricultural and Animal Husbandry Service Center, Motuo 860700, China*)

Abstract: This study aimed to explore the effects of gender, age, and altitude on the hematological and blood rheology parameters of Bamei cattle, providing a basis for further understanding of the physiological adaptation mechanisms of Bamei cattle in different environments. A total of 166 healthy Bamei cattle from different altitudes in Nyingchi were selected, and 21 hematological and 13 blood rheological parameters were measured. Descriptive statistics, correlation analysis between parameters, and variance analysis based on factors such as gender, age, and altitude were performed. The results indicated that all hematological parameters of Bamei cattle were within the reference range, showing that their blood physiological indicators were in a normal state. The further variance analysis showed that gender, age, and altitude significantly affected the blood physiological indicators. Female cattle had significantly higher red blood cell volume and platelet activity indicators than male cattle ($P < 0.05$). Juvenile cattle showed significantly higher lymphocyte counts and platelet numbers, as well as other immune and hematopoietic activity indicators, compared to adult cattle ($P < 0.05$), indicating that gender and age influence blood composition and rheological performance. The effect of altitude was particularly significant. As altitude increased, oxygen-carrying indicators such as red blood cell count (RBC), hemoglobin (HGB), and hematocrit (HCT) significantly increased ($P < 0.05$), demonstrating a typical high-altitude hematopoietic adaptation trend. At the same time, plasma viscosity, aggregation indices, and whole blood flow resistance all significantly increased ($P < 0.05$), suggesting that blood became more viscous and less fluid in the high-altitude environment. Further correlation analysis revealed significant positive correlations between various internal indicators of the hematological and blood rheology systems. For example, in the red blood cell system, HGB was highly correlated with HCT, and mean corpuscular volume (MCV) with mean corpuscular hemoglobin (MCH), with correlation coefficients reaching 0.98. In blood rheology, plasma viscosity and fibrinogen were strongly correlated with erythrocyte viscosity, with a correlation coefficient of 1.00. These correlation results revealed the intrinsic interconnection and mutual influence between the blood physiological indicators of Bamei cattle. The results of this study indicate that Bamei cattle possess the ability to adapt to the hypoxic environment of the plateau through enhanced erythropoiesis and the regulation of blood rheological properties. This provides important physiological evidence for a deeper understanding of the hypoxic adaptation mechanisms in plateau livestock.

Keywords: Bamei cattle; routine blood test; hemorheology; red blood cell count; hemoglobin concentration; blood viscosity

* **Corresponding authors:** DANZENG Losang, E-mail: 441284644@qq.com; KONG Xiaoyan, E-mail: 493384984@qq.com

巴美牛,其名称源自藏语,意为“大而宝贵”。该品种主要分布于西藏自治区林芝市察隅县和墨脱县,生活在海拔约1 900 m的热带季风气候区域,适应亚热带山林生态环境,并具备在3 000 m以下森林山地中生存的能力。巴美牛耐热、善于攀爬、适应崎岖地形,表现出较强的生态适应能力。该品种不具舍饲习惯,常年在森林中自由采食,仅在一

年中少数几次人工补充盐分,几乎不进行其他饲喂干预。其独特的遗传背景使其在高海拔、低氧环境下表现出优良的适应能力。这些特性不仅为探索高原动物的低氧适应机制提供了研究素材,也为畜牧业发展提供了潜力巨大的遗传资源。巴美牛不仅是当地牧民经济生活的重要组成部分,也是在生物多样性保护与畜牧科学研究中极具价值的物种。然而,目前关于巴美牛的系统性研究尚属空白,特别是在其遗传特性解析、养殖技术标准建立以及知

识产权保护方面的研究仍显不足。这一现状在一定程度上限制了巴美牛种质资源的有效利用和科学保护,也影响了藏区畜牧业在高原特色产业发展中的竞争力。

血液参数被广泛认为是衡量动物高原适应能力的重要指标,能够直接反映机体是否具备低氧环境下的生理调节能力^[1-6]。其中,血常规指标通过检测血液中不同类型细胞的数量和形态变化,反映机体的健康状况与生理状态,主要包括参与免疫应答的白细胞系统^[7-9],负责氧气与二氧化碳运输的红细胞系统^[10],以及参与止血与凝血过程的血小板系统^[11]。相比之下,血流变指标由于检测条件限制和测试成本较高,在动物医学实践中应用相对较少,尤其是关于高原牛种血流变特征的研究目前仍属空白。近年来随着国家对种质资源保护与利用的高度重视,种业振兴行动的推进,关于家畜血液生理指标的研究逐渐增多^[2,12-21],但目前尚无针对巴美牛血液生理参数的公开报道。为深入认识巴美牛的种质资源特性,建立其血液生理参考值体系,本研究

测定了巴美牛的血常规指标和血流变指标,从血液生理层面为该品种的资源保护、人工饲养、健康管理及疾病防控等提供理论依据与基础数据支撑。

1 材料与方法

1.1 试验动物和样本采集

本研究从西藏自治区林芝市墨脱县和察隅县不同海拔区域采集了健康巴美牛的血液样本,共计166头(母牛119头,公牛47头)。根据年龄,试验动物分为未成年组(6~24月龄,55头)和成年组(25~120月龄,111头)。根据采样地点的海拔高度,动物分为4个组,具体采样和分组信息见表1。所有巴美牛均采用放牧饲养方式,饲料主要以野果、鲜草为主,并定期补充食盐。

采样前,牛群禁食12 h,次日早晨空腹通过颈静脉采血。每头牛采集10 mL血液,使用含EDTA抗凝剂的5 mL高原定制真空采血管,采集后使用冰袋低温保存,并于4 h内完成后续血常规及血流变指标的检测。

表1 样本信息表
Table 1 Samples information

采样地点 Sampling location	海拔/m Altitude	样本数量 Sample size
西藏自治区林芝市墨脱县江新村 Jiangxin Village, Motuo County	800	35
西藏自治区林芝市墨脱县亚东村 Yadong Village, Motuo County	1 200	8
西藏自治区林芝市墨脱县帮辛村 Bangxin Village, Motuo County	1 200	11
西藏自治区林芝市墨脱县西登村 Xideng Village, Motuo County	1 200	16
西藏自治区林芝市墨脱县珠村村 Zhucun Village, Motuo County	1 600	12
西藏自治区林芝市墨脱县帮果村 Bangguo Village, Motuo County	1 600	7
西藏自治区林芝市察隅县拉丁村 Lading Village, Chayu County	1 600	7
西藏自治区林芝市察隅县宗古村 Zonggu Village, Chayu County	1 600	7
西藏自治区林芝市察隅县嘎腰村 Gayao Village, Chayu County	1 700	15
西藏自治区林芝市察隅县共同村 Gongtong Village, Chayu County	1 700	18
西藏自治区林芝市墨脱县贡日村 Gongri Village, Motuo County	2 000	30
总计 Total		166

1.2 血液生理指标的测定

使用兽用全自动血液细胞分析仪(迈瑞,BC-30 Vet)测定血液生理指标,包括:白细胞数目(white blood cell count, WBC)、粒细胞数目(granulocyte cell count, GranC)、淋巴细胞数目(lymphocyte cell count, LymcC)、单核细胞数目(mononuclear cell count, MonC)、粒细胞百分比

(granulocyte cell ratio, GranR)、淋巴细胞百分比(lymphocyte cell ratio, LymR)、单核细胞百分比(mononuclear cell ratio, MonR)、红细胞数目(red blood cell count, RBC)、血红蛋白浓度(hemoglobin concentration, HGB)、红细胞压积(hematocrit, HCT)、平均红细胞体积(mean corpuscular volume, MCV)、平均红细胞血红蛋白含量(mean

corpuscular hemoglobin, MCH)、平均红细胞血红蛋白浓度(mean corpuscular hemoglobin concentration, MCHC)、红细胞分布宽度变异系数(red blood cell distribution width-coefficient of variation, RDW-CV)、红细胞分布宽度标准差(red blood cell distribution width-standard deviation, RDW-SD)、血小板数目(platelet count, PLT)、平均血小板体积(mean platelet volume, MPV)、血小板分布宽度(platelet distribution width, PDW)、血小板压积(plateletcrit, PCT)、大血小板数目(platelet large cell count, P-LCC)和大血小板比率(platelet large cell ratio, P-LCR)等21项指标。

使用全自动血流变测试仪(众驰, ZL9000)通过锥板法测定全血粘度指标,毛细管法测定血浆粘度指标,包括:血浆粘度(plasma viscosity, PV)、纤维蛋白原(fibrinogen, FB)、全血低切相对指数(whole blood relative index of low shear, WLS)、全血中切相对指数(whole blood relative index of middle shear, WMS)、全血高切相对指数(whole blood relative index of high shear, WHS)、红细胞聚集指数(RBC aggregation index, EAI)、红细胞聚集系数(RBC aggregation coefficient, EAC)、红细胞内粘度(RBC internal viscosity, RBCTV)、卡松粘度(casson viscosity, CV)、低切流阻(low shear flow resistance, LSFR)、中切流阻(middle shear flow resistance, MSFR)、高切流阻(high shear flow resistance, HSFR)和屈服应力(yield stress, YS)等13项指标。

1.3 统计分析

1.3.1 描述性统计 试验数据使用Excel进行初步整理,利用Origin 2021软件计算血常规和血流变指标的平均值、标准差、最小值、中位数、最大值及变异系数(coefficient of variation, CV)。

1.3.2 方差分析 采用SAS统计分析系统(Ver. 9.4)的GLM过程进行方差分析,计算每个影响因素下血常规和血流变指标的最小二乘均值和标准误,进行多重比较,结果以“均值±标准误”表示,以 $P<0.05$ 表示差异显著, $P<0.01$ 表示差异极显著。鉴于1600 m与1700 m之间的海拔差仅为100 m,明显小于其它相邻海拔组之间400 m的梯度差,且在多数血液学指标上两组间均未观察到统计学显著差异($P>0.05$),因此在后续统计分析中将这两个海拔高度合并为同一组。方差分析模型如下。

血常规和血流变指标进行多因素无互作的最小二乘分析(ANOVA),模型如下:

$$Y_{ijkl} = \mu + H_i + S_j + A_k + e_{ijkl}$$

式中, Y_{ijkl} 为血常规和血流变检测指标, μ 为群体均值, H_i 为海拔第*i*水平的效应, S_j 为性别第*j*水平的效应, A_k 为年龄第*k*水平的效应, e_{ijkl} 为随机误差,假定服从 $N(0, \sigma_e^2)$ 分布。

1.3.3 相关性分析 使用Origin 2021软件计算血常规各指标之间及血流变各指标之间的Pearson相关系数和显著性, $P<0.05$ 表示差异显著, $P<0.01$ 表示差异极显著。

2 结果

2.1 巴美牛生理指标描述性统计分析

本研究对166头巴美牛的21项血常规指标和13项血流变指标进行了描述性统计分析(表2和表3)。在血常规指标中RBC为 $(6.85 \pm 1.83) \times 10^{12}$ 个·L⁻¹,显著高于WBC和PLT,PLT变异系数(0.79)是所有指标中最大,其次是PCT(0.74)。在白细胞系统中,MonR的数量最少,占白细胞总数的5.83%,其次是GranR(33.33%)和LymR(60.85%)。尽管细胞百分比(GranR、LymR和MonR)的变异系数均小于其对应的细胞计数(GranC、LymC和MonC),但GranC和LymC指标的极差分别达到33.3%和35.7%,表现出较大的个体差异。与白细胞系统和血小板系统相比,红细胞系统的变异程度较小,变异系数范围为0.05~0.27。两项体积指标中,MCV的均值为50.38 fL,约为MPV均值的8.63倍;两压积指标中,而HCT的均值为33.28%,约为PCT均值的144.70倍。在血流变指标中,全血低/中/高切相对指数的变异系数较大,分别为0.27、0.26和0.26;而红细胞聚集指数和系数变异系数最小,为0.08。血浆粘度的均值为1.93 mPa·s,约为卡松粘度均值的0.53倍,约为红细胞内粘度均值的2.51倍。

2.2 巴美牛血常规影响因素分析

利用固定效应模型对巴美牛血常规各项指标进行方差分析(表4、表5),结果显示性别、年龄和海拔因素对多项血常规指标存在显著影响。由表4可见,巴美牛不同性别间,白细胞总数及各类白细胞计数(GranC、LymC、MonC)和百分比(Gran%、Lym%、Mon%)差异均不显著($P>0.05$)。红细胞系统中,公牛与母牛的RBC、HGB、HCT和MCHC

表2 巴美牛血常规指标的描述性统计

Table 2 Descriptive statistics of hematological parameters in Bamei cattle

指标 Indicator	平均数±标准误 Mean±SE	最小值 Min	中位数 Median	最大值 Max	变异系数/% CV
白细胞系统 Leukocyte system					
WBC/($\times 10^9$ 个·L ⁻¹)	11.65±3.42	5.23	11.04	24.95	0.29
GranC/($\times 10^9$ 个·L ⁻¹)	3.82±1.24	1.75	3.68	8.75	0.32
LymC/($\times 10^9$ 个·L ⁻¹)	7.17±2.50	2.64	6.84	14.92	0.35
MonC/($\times 10^9$ 个·L ⁻¹)	0.68±0.26	0.31	0.64	1.70	0.38
GranR/%	33.33±7.24	17.90	32.55	51.20	0.22
LymR/%	60.85±7.40	43.70	61.40	79.40	0.12
MonR/%	5.83±1.21	2.30	5.60	10.50	0.21
红细胞系统 Erythrocyte system					
RBC/($\times 10^{12}$ 个·L ⁻¹)	6.85±1.83	2.60	6.62	13.60	0.27
HGB/(g·L ⁻¹)	115.64±20.67	62.00	114.00	156.00	0.18
HCT/%	33.28±5.55	17.80	32.80	45.80	0.17
MCV/fL	50.38±8.84	31.60	51.80	69.40	0.18
MCH/pg	17.46±3.17	10.70	17.80	23.70	0.18
MCHC/(g·L ⁻¹)	346.99±17.15	317.00	342.00	403.00	0.05
RDW-CV/%	18.03±3.27	13.30	17.20	33.40	0.18
RDW-SD/fL	36.97±9.75	24.40	35.00	88.50	0.26
血小板系统 Platelet system					
PLT/($\times 10^9$ 个·L ⁻¹)	416.37±327.79	15.00	314.00	1 517.00	0.79
MPV/fL	5.84±0.75	4.40	5.80	8.00	0.13
PDW	15.52±1.16	13.80	15.20	18.40	0.07
PCT/%	0.23±0.17	0.01	0.19	0.76	0.74
P-LCC/($\times 10^9$ 个·L ⁻¹)	112.33±61.25	7.00	111.00	238.00	0.55
P-LCR/%	23.55±7.47	8.60	23.00	44.00	0.32

表3 巴美牛血流变指标的描述性统计

Table 3 Descriptive statistics of blood rheology parameters in Bamei cattle

指标 Indicator	平均数±标准误 Mean±SE	最小值 Min	中位数 Median	最大值 Max	变异系数/% CV
PV/mPa·s	1.93±0.33	1.47	1.84	3.06	0.17
FB/(g·L ⁻¹)	4.24±0.73	3.23	4.06	6.73	0.17
WLS	9.24±2.49	4.71	8.68	15.61	0.27
WMS	2.85±0.74	1.55	2.62	4.96	0.26
WHS	2.26±0.59	1.25	2.08	4.08	0.26
EAI	4.08±0.31	3.25	4.11	4.88	0.08
EAC	2.80±0.21	2.23	2.82	3.35	0.08
RBCTV/mPa·s	0.77±0.13	0.59	0.74	1.22	0.17
CV/mPa·s	3.63±0.78	2.43	3.48	6.27	0.21
LSFR/10 ⁹ SI	51.86±11.16	35.65	48.64	84.78	0.22
MSFR/10 ⁹ SI	37.57±7.86	25.47	35.74	60.92	0.21
HSFR/10 ⁹ SI	29.79±6.31	20.07	28.75	50.07	0.21
YS/mPa	5.13±1.29	3.38	4.82	9.85	0.25

差异不显著($P>0.05$),但母牛的MCV和MCH显著高于公牛($P<0.01$ 或 $P<0.05$),而公牛的RDW-CV显著高于母牛($P<0.05$)。血小板系统中,母牛MPV、PDW和P-LCR显著高于公牛($P<0.01$ 或 $P<0.05$),而PLT、PCT和P-LCC差异不显著($P>0.05$)。不同年龄阶段比较结果显示(表4),成年牛与未成年牛在白细胞计数(WBC、GranC、LymC、MonC)方面差异均不显著($P>0.05$),但GranR在成年牛中显著高于未成年牛($P<0.05$),而LymR在未成年牛中显著高于成

年牛($P<0.01$)。红细胞系统中,未成年牛的红细胞(RBC(8.51×10^{12} 个 $\cdot\text{L}^{-1}$)显著高于成年牛(6.19×10^{12} 个 $\cdot\text{L}^{-1}$)($P<0.0001$),而成年牛的MCV(54.14 fL)、MCH(18.65 pg)和RDW-SD(38.88 fL)极显著高于未成年牛($P<0.0001$),未成年牛相应指标分别为 40.29 fL 、 13.78 pg 、 30.65 fL ,未成年牛的RDW-CV显著高于成年牛($P<0.01$)。最后,年龄对血小板系统各项指标(PLT、MPV、PDW、PCT、P-LCR)均有极显著影响($P<0.001$)。

表4 巴美牛不同性别和年龄阶段的血常规比较

Table 4 Comparison of blood routine tests of Bamei cattle of different genders and age groups

指标 Indicator	公牛 Bull	母牛 Cow	P值 P-value	成年牛 Mature cattle	未成年牛 Immature cattle	P值 P-value
白细胞系统 Leukocyte system						
WBC/($\times 10^9$ 个 $\cdot\text{L}^{-1}$)	11.79 ± 1.62	11.37 ± 1.75	0.854	11.99 ± 1.82	11.17 ± 1.52	0.954
GranC/($\times 10^9$ 个 $\cdot\text{L}^{-1}$)	4.29 ± 0.20	3.45 ± 0.15	0.803	4.10 ± 0.14	3.64 ± 0.20	0.0618
LymC/($\times 10^9$ 个 $\cdot\text{L}^{-1}$)	8.29 ± 0.40	6.91 ± 0.29	0.978	7.30 ± 0.28	7.90 ± 0.41	0.2245
MonC/($\times 10^9$ 个 $\cdot\text{L}^{-1}$)	0.74 ± 0.04	0.64 ± 0.03	0.164	0.71 ± 0.03	0.67 ± 0.05	0.4851
GranR/%	32.55 ± 1.28	32.16 ± 0.93	0.803	34.30 ± 0.88	30.42 ± 1.30	0.014
LymR/%	61.98 ± 1.31	62.02 ± 0.96	0.978	59.88 ± 0.90	64.12 ± 1.34	0.009
MonR/%	5.47 ± 0.20	5.82 ± 0.15	0.164	5.82 ± 0.14	5.46 ± 0.21	0.147
红细胞系统 Erythrocyte system						
RBC/($\times 10^{12}$ 个 $\cdot\text{L}^{-1}$)	7.60 ± 0.24	7.09 ± 0.16	0.077	6.19 ± 0.16	8.51 ± 0.23	<0.0001
HGB/($\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)	116.28 ± 2.85	114.20 ± 1.94	0.548	114.28 ± 1.98	116.21 ± 2.76	0.568
HCT/%	33.88 ± 0.82	33.07 ± 0.56	0.419	33.09 ± 0.57	33.86 ± 0.79	0.431
MCV/fL	45.80 ± 1.01	48.62 ± 0.69	0.023	54.14 ± 0.70	40.29 ± 0.98	<0.0001
MCH/pg	15.67 ± 0.34	16.77 ± 0.23	0.009	18.65 ± 0.24	13.78 ± 0.33	<0.0001
MCHC/($\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)	342.52 ± 2.21	344.69 ± 1.50	0.42	345.14 ± 1.54	342.07 ± 2.14	0.242
RDW-CV/%	19.19 ± 0.44	17.90 ± 0.30	0.018	17.70 ± 0.31	19.39 ± 0.43	0.002
RDW-SD/fL	35.10 ± 1.63	34.42 ± 1.19	0.732	38.88 ± 1.12	30.65 ± 1.67	<0.0001
血小板系统 Platelet system						
PLT/($\times 10^9$ 个 $\cdot\text{L}^{-1}$)	516.84 ± 38.83	436.62 ± 26.45	0.091	318.49 ± 27.06	634.97 ± 37.62	<0.0001
MPV/fL	5.34 ± 0.11	5.88 ± 0.07	<0.0001	6.11 ± 0.07	5.11 ± 0.10	<0.0001
PDW	15.02 ± 0.11	15.42 ± 0.08	0.005	15.71 ± 0.08	14.73 ± 0.11	<0.0001
PCT/%	0.27 ± 0.02	0.24 ± 0.01	0.159	0.19 ± 0.01	0.32 ± 0.02	<0.0001
P-LCC/($\times 10^9$ 个 $\cdot\text{L}^{-1}$)	110.58 ± 11.76	108.98 ± 8.59	0.911	103.14 ± 8.12	116.42 ± 12.02	0.354
P-LCR/%	19.73 ± 1.39	24.10 ± 1.01	0.011	27.23 ± 0.96	16.60 ± 1.42	<0.0001

在海拔因素方面(表5),随着海拔升高,巴美牛白细胞系统整体呈上升趋势。WBC在1200 m、1600~1700 m和2000 m组显著高于800 m组($P<0.01$),GranC和LymC在高海拔组(1600~1700 m和2000 m)显著高于低海拔组($P<0.01$)。MonC

在1200 m组显著高于其他海拔组($P<0.05$)。白细胞分类比例中,1200 m组GranR显著低于其余组($P<0.01$),而LymR在该组显著高于800 m组($P<0.05$);MonR在1600~1700 m和2000 m组显著低于1200 m组($P<0.05$)。红细胞系统方面,

RBC、HGB、MCV、MCH 和 MCHC 指标随海拔升高而逐渐升高,在 2 000 m 海拔时分别为 $(7.59 \pm 0.30) \times 10^9$ 个 $\cdot L^{-1}$ 、 (133.15 ± 3.66) g $\cdot L^{-1}$ 、 (49.73 ± 1.30) fL、 (18.04 ± 0.44) pg 和 (363.83 ± 2.86) g $\cdot L^{-1}$ 。RDW-CV 随海拔升高呈逐渐降低趋势,而 RDW-

SD 在 800 m 组显著高于其余各组($P < 0.01$)。但是在血小板系统指标中,PLT 随海拔升高显著下降($P < 0.05$),800 m 组最高 $(695.56 \pm 45.64) \times 10^9$ 个 $\cdot L^{-1}$,2 000 m 组最低 $(234.47 \pm 49.72) \times 10^9$ 个 $\cdot L^{-1}$;PCT 亦呈相同变化趋势($P < 0.05$)。

表 5 不同海拔分布巴美牛血常规比较

Table 5 Comparison of blood routine tests of Bamei cattle distributed at different altitudes

指标 Indicator	800 m	1 200 m	1 600~1 700 m	2 000 m
白细胞系统 Leukocyte system				
WBC/ $(\times 10^9$ 个 $\cdot L^{-1}$)	10.00 ± 0.59^B	12.53 ± 0.63^A	13.04 ± 0.42^A	12.88 ± 0.71^A
GranC/ $(\times 10^9$ 个 $\cdot L^{-1}$)	3.40 ± 0.22^B	3.57 ± 0.23^B	4.33 ± 0.16^A	4.54 ± 0.21^A
LymC/ $(\times 10^9$ 个 $\cdot L^{-1}$)	5.97 ± 0.44^B	8.03 ± 0.46^A	8.13 ± 0.32^A	8.43 ± 0.13^A
MonC/ $(\times 10^9$ 个 $\cdot L^{-1}$)	0.60 ± 0.05^B	0.80 ± 0.05^A	0.71 ± 0.04^B	0.73 ± 0.05^B
GranR/%	34.57 ± 1.39^{Aa}	29.12 ± 1.48^{Bb}	33.59 ± 1.02^{ABa}	33.95 ± 1.20^{ABa}
LymR/%	59.42 ± 1.44^b	64.43 ± 1.53^a	61.10 ± 1.06^{ab}	60.10 ± 1.16^{ab}
MonR/%	6.01 ± 0.23^{ABa}	6.45 ± 0.24^{Aa}	5.31 ± 0.17^{Bb}	5.01 ± 0.16^{Bb}
红细胞系统 Erythrocyte system				
RBC/ $(\times 10^{12}$ 个 $\cdot L^{-1}$)	6.78 ± 0.28^b	7.09 ± 0.30^{ab}	7.57 ± 0.20^a	7.59 ± 0.30^a
HGB/(g $\cdot L^{-1}$)	100.94 ± 3.36^{Dc}	106.93 ± 3.61^{CDc}	116.28 ± 2.40^{BCb}	133.15 ± 3.66^{ABa}
HCT/%	29.77 ± 0.97^C	32.17 ± 1.04^{BC}	34.19 ± 0.69^{AB}	36.56 ± 1.05^A
MCV/fL	46.39 ± 1.19^b	47.06 ± 1.28^{ab}	46.82 ± 0.85^{ab}	49.73 ± 1.30^a
MCH/pg	15.73 ± 0.41^B	15.67 ± 0.44^B	15.89 ± 0.29^B	18.04 ± 0.44^A
MCHC/(g $\cdot L^{-1}$)	339.52 ± 2.62^{Bbc}	332.56 ± 2.82^{Bc}	339.62 ± 1.87^{Bb}	363.83 ± 2.86^{ABa}
RDW-CV/%	21.73 ± 0.52^{Aa}	17.84 ± 0.56^{BCb}	18.79 ± 0.37^{Bb}	15.90 ± 0.56^{Cc}
RDW-SD/fL	40.26 ± 1.77^A	31.78 ± 1.88^B	34.03 ± 1.30^B	33.13 ± 1.34^B
血小板系统 Platelet system				
PLT/ $(\times 10^9$ 个 $\cdot L^{-1}$)	695.56 ± 45.64^A	478.03 ± 49.01^B	494.46 ± 32.60^B	234.47 ± 49.72^C
MPV/fL	5.44 ± 0.13^b	5.69 ± 0.14^{ab}	5.58 ± 0.09^{ab}	5.89 ± 0.14^a
PDW	14.59 ± 0.13^B	14.92 ± 0.14^B	14.92 ± 0.10^B	16.68 ± 0.15^A
PCT/%	0.38 ± 0.02^A	0.25 ± 0.03^B	0.27 ± 0.02^B	0.13 ± 0.03^C
P-LCC/ $(\times 10^9$ 个 $\cdot L^{-1}$)	145.12 ± 12.79^{Aa}	86.61 ± 13.63^{Bb}	108.78 ± 9.40^{ABb}	109.48 ± 8.40^{ABb}
P-LCR/%	21.06 ± 1.51^A	24.03 ± 1.60^A	21.66 ± 1.11^A	22.06 ± 1.01^A

同行数据肩标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($P < 0.01$),相同字母表示差异不显著($P > 0.05$);表 7 与此相同

Different lowercase letters indicate significant differences ($P < 0.05$), different uppercase letters indicate extremely significant differences ($P < 0.01$), and the same letter indicate no significant differences ($P > 0.05$); the same applies to Table 7

2.3 巴美牛血流变影响因素分析

对巴美牛血液流变学指标进行方差分析,由表 6 和表 7 可知,性别和海拔因素对多项流变学参数具有显著影响,而年龄因素的影响相对较小。不同性别巴美牛在多项血流变指标上存在显著差异(表 6),与母牛相比,公牛的血浆黏度、纤维蛋白原、全血低/中剪切相对指数、红细胞聚集指数/系数、

红细胞内黏度、低切流阻及屈服应力等指标均显著升高($P < 0.05$),而高切全血黏度(WHS)、中切流动指数(MSFR)、高切流动指数(HSFR)及全血黏度(CV)在公牛间差异不显著($P > 0.05$)。

公牛的PV、FB和RBCTV含量均显著低于母牛($P < 0.05$),WLS、WMS、WHS、EAI、EAC、LSFR及YS在公牛中显著高于母牛($P < 0.05$ 或 $P < 0.01$),而

CV、MSFR 及 HSMR 在不同性别间差异均不显著 ($P>0.05$)。不同年龄阶段比较结果显示,成年牛与未成年牛各项流变学指标在成年牛与未成年牛之间没有显著差异 ($P>0.05$),表明在本研究年龄范围内,年龄对巴美牛血液流变学特性的影响较小。

在海拔因素方面(表 7),血流变指标随海拔升高呈显著变化趋势。全血低/中/高切相对指数、卡松黏度、屈服应力及不同剪切速率下的流阻等指标在 2 000 m 均达到峰值,表明高原缺氧环境下血液

流动性显著下降、流动阻力显著升高。此外,红细胞聚集指数和聚集系数在 800 m 时最低,随着海拔升高呈上升趋势,提示高原环境可能增强红细胞聚集性,从而进一步加剧血液黏度。而血浆黏度、纤维蛋白原和红细胞内黏度在 1 200 m 达到最高水平(分别为 $2.23 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ 、 $4.91 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $0.89 \text{ mPa}\cdot\text{s}$),说明中高海拔下血浆成分的变化对整体血液流变特性产生了直接的影响。总体来看,海拔高度是影响巴美牛血液流变学状态的主要环境因素。

表 6 巴美牛不同性别和年龄阶段的血流变指标比较

Table 6 Comparison of hemorheological indicators in different genders and age groups of Bamei cattle

指标 Indicator	公牛 Bull	母牛 Cow	P 值 P-value	成年牛 Mature cattle	未成年牛 Immature cattle	P 值 P-value
PV/ $\text{mPa}\cdot\text{s}$	1.84 ± 0.07	2.03 ± 0.05	0.035	2.01 ± 0.05	1.87 ± 0.07	0.120
FB/ $(\text{g}\cdot\text{L}^{-1})$	4.05 ± 0.16	4.48 ± 0.11	0.035	4.41 ± 0.12	4.11 ± 0.16	0.120
WLS	9.91 ± 0.38	8.50 ± 0.27	0.003	9.30 ± 0.27	9.12 ± 0.37	0.690
WMS	2.99 ± 0.12	2.70 ± 0.08	0.046	2.86 ± 0.08	2.83 ± 0.11	0.808
WHS	2.36 ± 0.09	2.16 ± 0.07	0.090	2.27 ± 0.07	2.25 ± 0.09	0.848
EAI	4.18 ± 0.05	3.96 ± 0.04	0.001	4.07 ± 0.04	4.07 ± 0.05	0.927
EAC	2.87 ± 0.04	2.71 ± 0.03	0.001	2.79 ± 0.03	2.79 ± 0.03	0.927
RBCTV/ $\text{mPa}\cdot\text{s}$	0.74 ± 0.03	0.81 ± 0.02	0.036	0.80 ± 0.02	0.75 ± 0.03	0.118
CV/ $\text{mPa}\cdot\text{s}$	3.63 ± 0.12	3.63 ± 0.08	0.982	3.73 ± 0.08	3.52 ± 0.11	0.128
LSFR/ 10^9SI	53.67 ± 1.57	49.67 ± 1.10	0.040	53.39 ± 1.11	49.95 ± 1.52	0.066
MSFR/ 10^9SI	37.99 ± 1.14	37.01 ± 0.80	0.486	38.64 ± 0.80	36.36 ± 1.10	0.093
HSFR/ 10^9SI	29.92 ± 0.93	29.57 ± 0.65	0.758	30.63 ± 0.65	28.87 ± 0.90	0.111
YS/ mPa	5.47 ± 0.18	4.74 ± 0.13	0.002	5.30 ± 0.13	4.92 ± 0.18	0.084

表 7 不同海拔分布巴美牛血流变指标比较

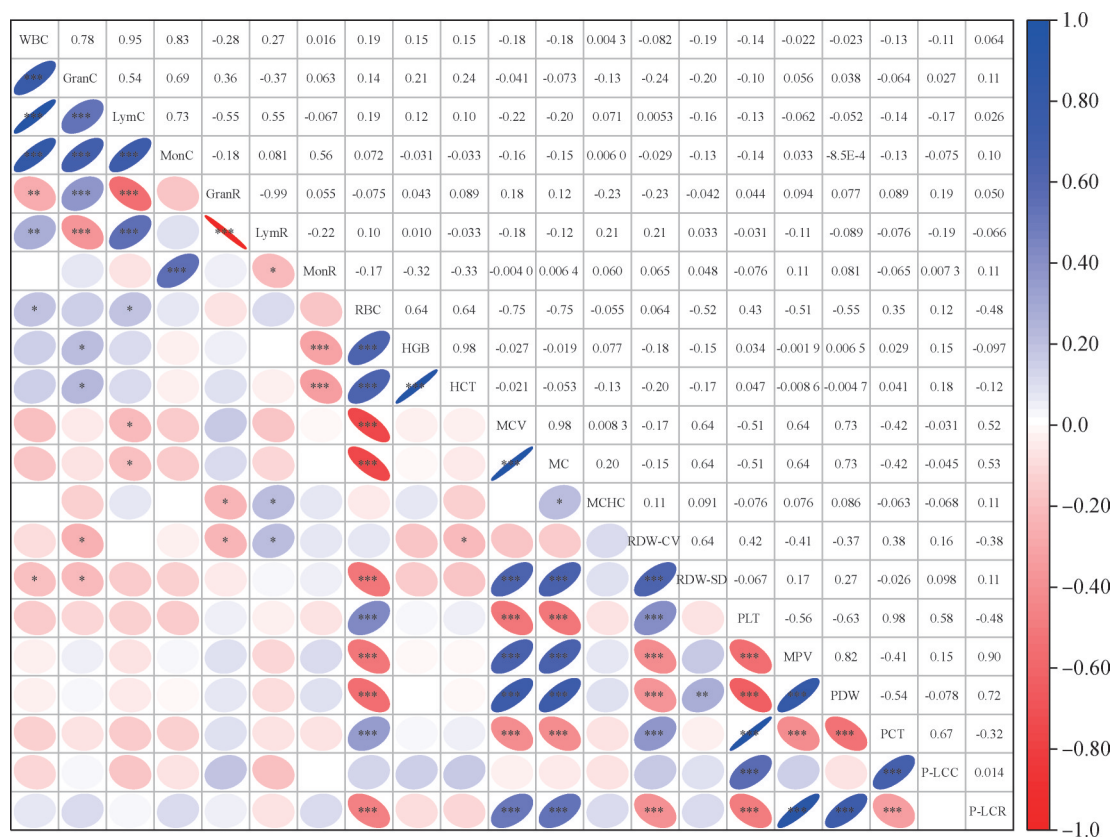
Table 7 Comparison of hemorheological indicators of Bamei cattle distributed at different altitudes

指标 Indicator	800 m	1 200 m	1 600~1 700 m	2 000 m
PV/ $\text{mPa}\cdot\text{s}$	$1.81\pm0.08^{\text{Bb}}$	$2.24\pm0.12^{\text{Aa}}$	$1.87\pm0.06^{\text{Bb}}$	$1.91\pm0.09^{\text{ABb}}$
FB/ $(\text{g}\cdot\text{L}^{-1})$	$3.99\pm0.18^{\text{Bb}}$	$4.92\pm0.26^{\text{Aa}}$	$4.12\pm0.14^{\text{Bb}}$	$4.21\pm0.19^{\text{ABb}}$
WLS	$8.50\pm0.42^{\text{Bbc}}$	$7.40\pm0.61^{\text{Bc}}$	$9.02\pm0.32^{\text{Bb}}$	$11.76\pm0.45^{\text{Aa}}$
WMS	$2.55\pm0.13^{\text{B}}$	$2.45\pm0.19^{\text{B}}$	$2.80\pm0.10^{\text{B}}$	$3.52\pm0.14^{\text{A}}$
WHS	$2.00\pm0.11^{\text{B}}$	$1.98\pm0.15^{\text{B}}$	$2.22\pm0.08^{\text{B}}$	$2.76\pm0.11^{\text{A}}$
EAI	$4.21\pm0.06^{\text{ABab}}$	$3.74\pm0.08^{\text{Cc}}$	$4.08\pm0.04^{\text{Bb}}$	$4.27\pm0.06^{\text{Aa}}$
EAC	$2.89\pm0.04^{\text{AB}}$	$2.57\pm0.06^{\text{C}}$	$2.80\pm0.03^{\text{B}}$	$2.93\pm0.04^{\text{A}}$
RBCTV/ $\text{mPa}\cdot\text{s}$	$0.73\pm0.03^{\text{Bb}}$	$0.89\pm0.05^{\text{Aa}}$	$0.75\pm0.02^{\text{Bb}}$	$0.76\pm0.03^{\text{ABb}}$
CV/ $\text{mPa}\cdot\text{s}$	$3.05\pm0.13^{\text{Cc}}$	$3.61\pm0.19^{\text{BCb}}$	$3.53\pm0.10^{\text{BCb}}$	$4.29\pm0.14^{\text{Aa}}$
LSFR/ 10^9SI	$45.76\pm1.74^{\text{B}}$	$46.52\pm2.50^{\text{B}}$	$50.30\pm1.31^{\text{B}}$	$64.26\pm1.82^{\text{A}}$
MSFR/ 10^9SI	$32.11\pm1.26^{\text{C}}$	$36.16\pm1.82^{\text{BC}}$	$36.53\pm0.96^{\text{B}}$	$45.08\pm1.33^{\text{A}}$
HSFR/ 10^9SI	$25.23\pm1.03^{\text{Cc}}$	$29.21\pm1.49^{\text{Bb}}$	$28.98\pm0.78^{\text{BCb}}$	$35.43\pm1.08^{\text{Aa}}$
YS/ mPa	$4.71\pm0.20^{\text{B}}$	$4.19\pm0.29^{\text{B}}$	$4.96\pm0.15^{\text{B}}$	$6.62\pm0.21^{\text{A}}$

2.4 巴美牛生理指标相关性分析

巴美牛血常规指标之间的相关性分析结果显示(图1),同一系统内各指标之间的相关性普遍高于不同系统指标之间的相关性,尤其是红细胞系统与血小板系统之间表现出较高的相关性。在白细胞系统内,WBC与其各亚型(GranC、LymC和MonC)之间均表现出极显著的正相关($P<0.001$),其中,WBC与LymC的相关系数最高,达到0.95,表明白细胞总数的变化主要由淋巴细胞数量的波动所驱动。在白细胞百分比指标中,GranR与LymR呈显著的负相关($r=-0.99, P<0.001$),这

表明粒细胞和淋巴细胞的比例呈现明显的此消彼长关系。在红细胞系统中,RBC与HGB和HCT之间均呈极显著正相关($P<0.001$),而MCV与MCH之间也表现出强烈的正相关性($r=0.98, P<0.001$),表明随着红细胞数量或体积的增加,血红蛋白含量和红细胞压积亦相应升高,反映出红细胞氧运输能力的协同增强。在血小板系统中,PLT与PCT之间显著正相关($r=0.98, P<0.001$),显示血小板数量对其压积影响显著,但其他血小板相关指标之间的相关性相对较低,表明血小板的大小和功能性分布具有较大个体差异性。



*, **, ***分别表示差异显著性 $P<0.05$ 、 $P<0.01$ 和 $P<0.001$, 下同

*, **, *** indicate significant difference at $P<0.05$, $P<0.01$, and $P<0.001$ levels, respectively. The same as below

图1 巴美牛血常规指标相关分析结果

Fig. 1 Results of the correlation analysis among blood hematology parameters in Bamei cattle

血流变指标的相关性分析结果(图2)显示,血浆粘度、纤维蛋白原与红细胞内粘度之间呈完全正相关($r=1.00, P<0.001$),表明这三者在共同反映血液黏稠性方面具有高度一致性。全血低切(WLS)、中切(WMS)和高切(WHS)相对指数之间也呈极显著正相关($r=-0.94\sim 1.00, P<0.001$),表明不同剪切速率条件下血液流变状态变化趋势

基本一致。此外,卡松黏度、屈服应力以及各切变速率下的流阻指标(LSFR、MSFR、HSFR)之间也呈现极显著的正相关($P<0.001$),反映出血液流动阻力相关参数之间具有较强的协同性。相对而言,血浆黏度和纤维蛋白原与全血剪切相关指标之间呈极显著负相关($r=-0.51\sim -0.55, P<0.001$),表明在高粘度条件下,血液的流动性受到限制。最

后,红细胞聚集指数与聚集系数之间也表现出完全正相关($r=1.00, P<0.001$),显示这两项指标在评

价红细胞聚集性方面具有高度一致性,并可互为验证指标。

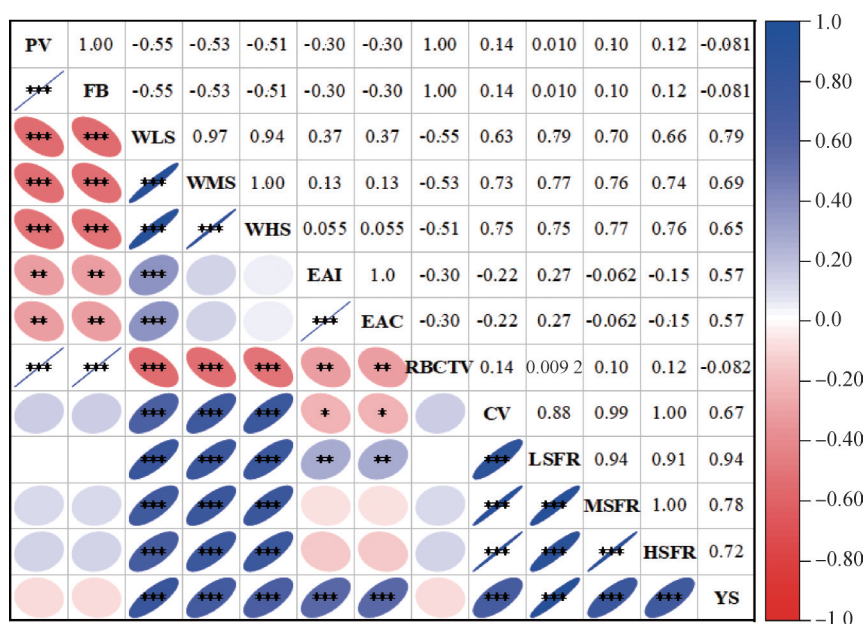


图2 巴美牛血流变指标相关分析结果

Fig. 2 Results of the correlation analysis among blood rheology parameters in Bamei cattle

3 讨 论

3.1 巴美牛血液生理指标参考范围构建

血液生理参数在兽医学中是评估动物健康的重要指标^[22,23],能够为疾病的诊断提供关键依据,并准确反映机体的生理状态^[9,24-26]。本研究通过使用兽用全自动血液细胞分析仪,对巴美牛的21项血常规指标进行了精准测定。研究结果显示,巴美牛的血常规各项指标均在参考范围内,符合《兽医临床诊断》中牛类的血常规标准^[14]。与邓川牛和滇中牛等地方品种相比,巴美牛的血常规指标差异较小,表明巴美牛血液生理状态的稳定性和一致性^[27],这一发现验证了本研究结果的准确性和可靠性,并进一步反映出巴美牛独特的血液生理特征。然而,尽管血常规指标已被精确测量,当前针对动物的血流变学研究仍存在一定局限,特别是缺乏专用仪器和参考范围的建立。本研究通过采用人用全自动血流变测试仪(众驰,ZL9000)对巴美牛的13项血流变学指标进行了系统测定,并成功构建了巴美牛血常规和血流变学的参考范围。这为相关研究提供了宝贵的数据支持,也填补了巴美牛血流变学领域的空白。

3.2 性别、年龄及海拔对血液生理指标的影响

血液细胞在维持机体正常生理功能中扮演着至关重要的角色,具有免疫防御、氧气运输和凝血止血关键功能^[17,28]。白细胞计数及其分类是评估全身性炎症的关键指标,包含多种细胞类型,如中性粒细胞、淋巴细胞、单核细胞、嗜酸性粒细胞和嗜碱性粒细胞。作为免疫系统的核心组成部分,白细胞构筑起机体抵御外界疾病和有害物质入侵的防线,深度参与免疫应答反应,并具备强大的吞噬和免疫功能^[9,29]。性别方面,母牛在红细胞体积及血小板活性指标上的数值显著高于公牛,表明母牛在血液组成和代谢活动方面可能具有更高的异质性与活性水平。这一差异可能与激素水平、代谢状态或生理周期等因素有关。与之相对,公牛和母牛在白细胞系统指标上并无显著差异,表明性别对免疫系统的影响较小。年龄方面,未成年牛的免疫系统和造血活性较为旺盛,表现为较高的LymC、LymR、RBC、RDW-CV、PLT、PDW和PCT等指标。随着年龄的增长,免疫系统逐渐成熟,成年牛在GranC、GranR、MCV、MCH、RDW-SD、MPV和P-LCR等指标上的数值显著增高,表明成年牛的血液组成趋于稳定,同时红细胞体积增大、分布更宽,反映出成熟个体在血液生理方面的适应性变化。

成熟的红细胞作为血液中数量最多、结构最简单的无核细胞,主要承担着氧气运输的重任^[30-32]。本研究发现,随着海拔的升高,巴美牛RBC、HGB和HCT指标显著增加,尤其在2 000 m组达到最高水平,表明高原低氧环境通过促进红细胞生成和血红蛋白合成来提高机体携氧能力,这是典型的高原血液生理代偿反应。这一适应机制在其他高原动物中也有报道^[18-19,33-34]。例如,藏鸡^[35]、藏猪^[36]、藏马^[37]和藏驴^[38]等动物在高海拔环境下,其血液生理指标发生了显著变化,尤其是红细胞生成的增强^[39,40]。西藏改良奶牛的研究也表明,在高海拔环境下,红细胞生成显著增加^[41-44]。同时,2 000 m组MCH和MCHC显著升高,说明单位红细胞内血红蛋白含量增加,有助于在低氧环境下提高单个红细胞的携氧效率^[45]。

红细胞对缺氧极为敏感,慢性缺氧可导致红细胞代偿性增加,可能发展为高原红细胞增多症(HAPC)^[46-49]。HAPC患者表现为红细胞、血红蛋白及红细胞压积的显著升高,而动脉氧饱和度降低^[49,50]。过度的红细胞增殖可能导致血液黏度升高、微循环障碍和血栓形成,并与肺动脉高压、心肌梗死和脑卒中等疾病密切相关^[51-53]。血液流变学指标在不同海拔高度下表现出显著的变化趋势。在高海拔地区,巴美牛的RBC、HCT、血浆粘度、纤维蛋白原、红细胞聚集指数和流阻等指标均显著升高。这表明高海拔环境中的低氧压力可能促使巴美牛血液黏度增加,流动性下降,从而加重了血液微循环的负担。特别是在2 000 m的海拔时,巴美牛的血浆粘度和红细胞聚集指数显著升高,反映了高原环境对血液流变性的显著影响^[54-57]。这些流变学变化与高海拔环境中血液氧输送能力的变化相互关联。巴美牛通过增加红细胞生成和血液黏度的调节,适应了高原的低氧环境,这一适应机制与其他高原家畜^[51-53]及野生动物^[18,33]的研究结果相一致。

长期缺氧环境对血小板数量的影响已被多项研究证实。Gray等^[58]以及Shang等^[59]的研究表明,长期缺氧对血小板数量有一定的抑制,可能与缺氧环境对骨髓造血功能的影响有关。慢性高原病患者凝血功能异常的研究也备受关注。Tyagi等^[60]和Turton等^[61]的研究发现,慢性高原病患者存在凝血功能异常,且出血风险显著升高。本研究对巴美牛血小板相关指标的分析结果显示,随着海拔的升

高,PLT和PCT呈显著下降趋势,尤其当海拔从800 m升高至2 000 m时,PLT和PCT呈现极显著下降($P<0.01$),这一结果也与慢性高原病患者凝血功能异常的研究相符合,提示高海拔环境可能影响巴美牛的凝血系统,导致血小板生成减少。而MPV和PDW随海拔升高显著升高,表明高海拔环境下血小板数量减少但体积增大,单个血小板的反应活性可能得到补偿性增强,这种变化有助于在降低血液黏滞性的同时维持凝血功能,从而避免高原环境中因血液黏稠度增加而引发微循环障碍。

3.3 血液生理指标的相关性分析

血液生理指标之间的相关性分析显示,同一系统内的指标之间相关性普遍高于不同系统指标之间的相关性,特别是红细胞系统与血小板系统之间的相关性较高。白细胞系统的各项指标如WBC、GranC、LymC和MonC之间的极显著正相关,表明这些指标在免疫应答中的协同作用。红细胞系统中,RBC与HGB和HCT之间呈强正相关,这说明红细胞和血红蛋白在氧气运输过程中的协作关系^[62,63]。类似地,血小板系统中,PLT和PCT的显著正相关揭示了血小板数量和血小板压积在止血过程中的紧密联系^[64]。

血流变学指标之间也表现出高度的相关性。全血不同剪切速率下的相对指数呈显著正相关,卡松粘度、屈服应力与流阻之间也呈显著正相关,而血浆粘度与纤维蛋白原、红细胞内粘度与全血剪切相关指标之间呈显著负相关,红细胞聚集指数与聚集系数之间也呈极显著的正相关。血流在不同剪切速率下的行为也显示出一致性,表明血液流变性受多种因素的共同作用,血浆成分和红细胞特性对血液流变性有显著影响^[65-67]。特别是血浆粘度、纤维蛋白原与红细胞内粘度之间的完美正相关($r=1.00$),血浆是牛顿流体,血浆中的纤维蛋白原影响其粘度,这些指标反映了血液黏稠性方面的高度一致性^[55,66,68,69]。这些相关性分析进一步说明,血液流变特性是由多种生理因素相互作用的结果。

4 结 论

本研究从血常规与血流变学两个维度系统分析了巴美牛在不同性别、年龄及海拔条件下的血液生理特征,结果表明红细胞系统与血流变参数之间具有较强的协同性,是反映高原适应的重要生理指标组合。性别和年龄对血液构成及功能具有一定

影响,但作用相对有限;海拔是影响巴美牛血液特性的主导因素,不仅显著增强红细胞生成和携氧能力,同时引起血液黏滞性及流动阻力的适应性调节,反映了其对高原低氧环境的综合生理适应机制。研究同时初步建立了巴美牛血常规与血流变学参考范围,为健康评估与疾病诊断提供了基础数据。总体而言,巴美牛通过多层次血液系统协同调节、有效应对高原低氧胁迫,为高原家畜适应性研究与遗传选育提供了重要生理学依据。

参考文献(References):

- [1] HYUN C, RHEE Y J, LEE S A, et al. Hematological, blood chemical and hormonal changes in Hanwoo (Korean Native Cattle) raised at different altitudes[J]. *J Vet Clin*, 2007;24,(1):1-4.
- [2] BARVE S, DHONDT A A, MATHUR V B, et al. Life-history characteristics influence physiological strategies to cope with hypoxia in Himalayan birds[J]. *Proc R Soc B Biol Sci*, 2016, 283(1843):1-8.
- [3] REYES-SOTELO B, OGI A, MORA-MEDINA P, et al. Early blood analysis and gas exchange monitoring in the canine neonate: effect of dam's size and birth order[J]. *Animals*, 2022, 12(12):1-15.
- [4] TONG W, ALLISON B J, BRAIN K L, et al. Chronic hypoxia in ovine pregnancy recapitulates physiological and molecular markers of preeclampsia in the mother, placenta, and offspring[J]. *Hypertension*, 2022, 79(7):1525-1535.
- [5] HUAMANI C, SARMIENTO W, CORDOVA-HEREDIA G, et al. Prediction of blood viscosity based on usual hematological parameters in a clinically healthy population living in a high-altitude city[J]. *High Alt Med Biol*, 2022, 23(1):78-84.
- [6] LANG M, BILO G, CARAVITA S, et al. Blood pressure and high altitude: physiological response and clinical management[J]. *Medwave*, 2021, 21(4):1-10.
- [7] SU Y, LI D, GAUR U, et al. The comparison of blood characteristics in low- and high-altitude chickens[J]. *Ital J Anim Sci*, 2018, 17(1):195-201.
- [8] WANG H, LIU D, SONG P, et al. Exposure to hypoxia causes stress erythropoiesis and downregulates immune response genes in spleen of mice[J]. *BMC Genomics*, 2021, 22(1):1-14.
- [9] YANG Y, YANG S, TANG J, et al. Comparisons of hematological and biochemical profiles in Brahman and Yunling cattle[J]. *Animals*, 2022, 12(14):1-10.
- [10] PALIS J. Primitive and definitive erythropoiesis in mammals[J]. *Front Physiol*, 2014, 5:1-9.
- [11] TREML B, WALLNER B, BLANK C, et al. The influence of environmental hypoxia on hemostasis—a systematic review[J]. *Front Cardiovasc Med*, 2022, 9(2):1-13.
- [12] 张佳钰, 高聪慧, 李吉梅, 等. 地下洞道生境下高原鼢鼠血液特征[J]. *野生动物学报*, 2024, 45(2):298-304.
- ZHANG J Y, GAO C H, LI J M, et al. Blood characteristics of plateau zokors in underground tunnel habitats[J]. *Chinese Journal of Wildlife*, 2024, 45(2):298-304. (in Chinese)
- [13] 邓干臻. 兽医临床诊断学(第二版)[M]. 北京:科学出版社, 2017.
- DENG G Z. Veterinary Clinical Diagnostics (2nd ed.) [M]. Beijing: Science Press, 2017. (in Chinese)
- [14] YAN F, WANG Y, WEI M, et al. Exploring the role of the CapG gene in hypoxia adaptation in Tibetan pigs[J]. *Front Genet*, 2024, 15(4):1-10.
- [15] BURTSCHER J, PASHA Q, CHANANA N, et al. Immune consequences of exercise in hypoxia: A narrative review[J]. *J Sport Heal Sci*, 2024, 13(3):297-310.
- [16] AMATYA GORKHALI N, KHANAL S, SAPKOTA S, et al. Effect of breed and gender on hematological parameters and some serum biochemical profiles of apparently healthy indigenous sheep of Nepal[J]. *Nepal Vet J*, 2017, 34:85-94.
- [17] 高聪慧, 李吉梅, 徐波, 等. 高原鼢鼠和高原鼠兔血液参数和血红蛋白亚型对不同海拔生境的响应[J]. *生理学报*, 2023, 75(1):69-81.
- GAO C H, LI J M, XU B, et al. Responses of blood parameters and hemoglobin isoforms of plateau zokors and plateau pikas to different altitudinal habitats[J]. *Acta Physiologica Sinica*, 2023, 75(1):69-81. (in Chinese)
- [18] LI J, AN Z, WEI L, et al. A new homotetramer hemoglobin in the pulmonary surfactant of plateau zokors (*Myospalax baileyi*)[J]. *Front Genet*, 2022, 13(3):1-17.
- [19] VOSE A K, WELCH J F, NAIR J, et al. Therapeutic acute intermittent hypoxia: a translational roadmap for spinal cord injury and neuromuscular disease[J]. *Exp Neurol*, 2022, 347(10):1-18.
- [20] BISWAS A, AHMED M, BHARTI V K, et al. Effect of antioxidants on physio-biochemical and hematological

- parameters in broiler chicken at high altitude [J]. *Asian-Austr J Anim Sci*, 2010, 24(2):246-249.
- [21] DOLKA B, WŁODARCZYK R, ŻBIKOWSKI A, et al. Hematological parameters in relation to age, sex and biochemical values for mute swans (*Cygnus olor*) [J]. *Vet Res Commun*, 2014, 38(2):93-100.
- [22] ROLAND L, DRILLICH M, IWERSEN M. Hematology as a diagnostic tool in bovine medicine [J]. *J Vet Diagnostic Investig*, 2014, 26(5):592-598.
- [23] ABRAMOWICZ B, KUREK Ł, LUTNICKI K. Haematology in the early diagnosis of cattle diseases - a review [J]. *Vet Arh*, 2019, 89(4):579-590.
- [24] LIMA P P A, NARCISO L G, ALCINDO J F, et al. Evaluation of hematological, biochemical and oxidative stress profile in calves under propofol anesthesia [J]. *Vet Res Commun*, 2022, 46(1):27-35.
- [25] VIEIRA A B, RESTREPO M A, AUZENNE D, et al. Mild to moderate overweight in dogs: is there an impact on routine hematological and biochemical profiles, echocardiographic parameters and cardiac autonomic modulation? [J]. *Vet Res Commun*, 2022, 46(2):527-535.
- [26] ADEDOKUN R, OLAOGUN S, ALABA B. Haematological and biochemical profile of apparently healthy horses in Ibadan, Nigeria [J]. *Alexandria J Vet Sci*, 2023, 77(1):156-160.
- [27] 刘永艳, 李雅曼, 黄宗友, 等. 基于血常规指标探究邓川牛的生理特性 [J]. *中国畜牧杂志*, 2024, 60(6):283-287.
- LIU Y Y, LI Y M, HUANG Z Y, et al. Investigation of physiological characteristics of Dengchuan cattle based on routine blood parameters [J]. *Chinese Journal of Animal Science*, 2024, 60(6):283-287. (in Chinese)
- [28] ROGERS S, DOCTOR A. Red Blood Cell Dysfunction in Critical Illness [J]. *Crit Care Clin*, 2020, 36(2):267-292.
- [29] ZHANG C, WU S, LU Z, et al. Hybrid adversarial-discriminative network for leukocyte classification in leukemia [J]. *Med Phys*, 2020, 47(8):3732-3744.
- [30] MOHANTY J G, NAGABABU E, RIFKIND J M. Red blood cell oxidative stress impairs oxygen delivery and induces red blood cell aging [J]. *Front Physiol*, 2014, 5(2):1-6.
- [31] MAIRBÄURL H. Red blood cells in sports: effects of exercise and training on oxygen supply by red blood cells [J]. *Front Physiol*, 2013, 4:1-13.
- [32] HAN T H, QAMIRANI E, NELSON A G, et al. Regulation of nitric oxide consumption by hypoxic red blood cells [J]. *Proc Natl Acad Sci U S A*, 2003, 100(21):12504-12509.
- [33] 高鹤轩, 刘汇涛, 王洪亮, 等. 不同海拔地区马鹿血液生理生化指标分析 [J]. *黑龙江畜牧兽医*, 2022(18):136-140.
- GAO H X, LIU H T, WANG H L, et al. Analysis of blood physiological and biochemical indices of red deer in different altitudinal regions [J]. *Heilongjiang Animal Science and Veterinary Medicine*, 2022(18):136-140. (in Chinese)
- [34] SIEBENMANN C, ROCHE J, SCHLITTLER M, et al. Regulation of haemoglobin concentration at high altitude [J]. *J Physiol*, 2023, 21:5587-5600.
- [35] 熊筱萱. 高低海拔鸡心脏的全基因组甲基化与转录组差异分析 [D]. 雅安: 四川农业大学, 2023.
- XIONG X X. Genome-wide methylation and transcriptome profiling of chicken hearts from high- and low-altitude populations [D]. Yaan: Sichuan Agricultural University, 2023. (in Chinese)
- [36] KONG X, DONG X, YANG S, et al. Natural selection on TMPRSS6 associated with the blunted erythropoiesis and improved blood viscosity in Tibetan pigs [J]. *Comp Biochem Physiol Part B Biochem Mol Biol*, 2019, 233:11-22.
- [37] 赵雪, 魏雪锋, 连林生, 等. 藏马低氧适应的血液生理指标研究 [J]. *云南农业大学学报 (自然科学)*, 2014, 29(5):684-688.
- ZHAO X, WEI X F, LIAN L S, et al. Study on blood physiological indicators of Tibetan horses in hypoxic adaptation [J]. *Journal of Yunnan Agricultural University (Natural Science)*, 2014, 29(5):684-688. (in Chinese)
- [38] 韩旭, 万宝云, 孔小艳, 等. 藏驴的血液生理学特性研究 [J]. *经济动物学报*, 2015, 19(1):47-50.
- HAN X, WAN B Y, KONG X Y, et al. Research on blood physiological characteristics of Tibetan donkeys [J]. *Journal of Economic Animal*, 2015, 19(1):47-50. (in Chinese)
- [39] 张天留, 高雪, 徐凌洋, 等. 高原家养动物环境适应性的研究进展 [J]. *畜牧兽医学报*, 2020, 51(7):1475-1487.
- ZHANG T L, GAO X, XU L Y, et al. Research progress on environmental adaptation of domesticated animals in plateau regions [J]. *Acta Veterinaria et Zootechnica Sinica*, 2020, 51(7):1475-1487. (in Chinese)
- [40] 张剑搏, 丁学智, AHMAD A A, 等. 高原土著动物适

- 应性进化的研究进展[J]. 畜牧兽医学报, 2019, 50(9):1723-1736.
- ZHANG J B, DING X A, AHMAD A A, et al. Research progress on adaptive evolution of plateau indigenous animals[J]. *Acta Veterinaria et Zootechnica Sinica*, 2019, 50(9):1723-1736. (in Chinese)
- [41] 黄上真, 马龙刚, 娄文琦, 等. 高原地区奶牛血液指标的影响因素分析[J]. 畜牧兽医学报, 2023, 54(5): 1964-1978.
- HUANG S Z, MA L G, LOU W Q, et al. Analysis of factors influencing blood indices of dairy cows in plateau areas [J]. *Acta Veterinaria et Zootechnica Sinica*, 2023, 54(5):1964-1978. (in Chinese)
- [42] 高乐程, 巴桑珠扎, 班旦, 等. 西藏改良奶牛低氧适应的血液生理指标与生产性能分析[J]. 饲料研究, 2024, 47(8):92-96.
- GAO L C, BASANG Z Z, BAN D, et al. Analysis of blood physiological indicators and production performance of improved Tibetan dairy cows under hypoxic adaptation s[J]. *Feed Research*, 2024, 47(8): 92-96. (in Chinese)
- [43] 展亚楠, 索朗曲吉, 朱莉, 等. 西藏改良牛的泌乳性能评估及高原适应的血液生理表征研究[J]. 饲料研究, 2023, 46(17):49-53.
- ZHAN Y N, SONAM Q G, ZHU L, et al. Evaluation of lactation performance and blood physiological markers of high-altitude adaptation in improved Tibetan cattle s[J]. *Feed Research*, 2023, 46(17): 49-53. (in Chinese)
- [44] 倪彬, 旦增洛桑, 巴桑珠扎, 等. 杂交娟姗牛低氧习服的血液生理与生产性能(DHI)指标研究[J]. 饲料研究, 2023(21):54-57.
- NI B, TENZIN L B, BASANG Z Z, et al. Study on blood physiological and production performance (DHI) indicators of hypoxic acclimation in crossbred Jersey cattle[J]. *Feed Research*, 2023(21): 54-57. (in Chinese)
- [45] LIU X, ZHANG Y, LI Y, et al. EPAS1 gain-of-function mutation contributes to high-altitude adaptation in Tibetan horses[J]. *Mol Biol Evol*, 2019, 36(11): 2591-2603.
- [46] ZHANG H, HE Y, CUI C, et al. Cross-altitude analysis suggests a turning point at the elevation of 4, 500 m for polycythemia prevalence in Tibetans [J]. *Am J Hematol*, 2017, 92(9):552-554.
- [47] ZHAO Y, ZHANG Z, LIU L, et al. Associations of high altitude polycythemia with polymorphisms in EPAS1, ITGA6 and ERBB4 in Chinese Han and Tibetan populations [J]. *Oncotarget*, 2017, 8(49): 86736-86746.
- [48] ANG S O, CHEN H, HIROTA K, et al. Disruption of oxygen homeostasis underlies congenital Chuvash polycythemia[J]. *Nat Genet*, 2002, 32(4):614-621.
- [49] YU S, YE Y, WUREN T, et al. Alteration in the number, morphology, function, and metabolism of erythrocytes in high-altitude polycythemia [J]. *Front Physiol*, 2024, 15(2):1-13.
- [50] REEVES J T, LEON-VELARDE F. Chronic mountain sickness: Recent studies of the relationship between hemoglobin concentration and oxygen transport [J]. *High Alt Med Biol*, 2004, 5(2):147-155.
- [51] ESTEVA S, PANISELLO P, TORRELLA J R, et al. Blood rheology adjustments in rats after a program of intermittent exposure to hypobaric hypoxia [J]. *High Alt Med Biol*, 2009, 10(3):275-281.
- [52] KOHL Z F, CROSSLEY D A, TAZAWA H, et al. Dynamics of blood viscosity regulation during hypoxic challenges in the chicken embryo (*Gallus gallus domesticus*) [J]. *Comp Biochem Physiol Part A Mol Integr Physiol*, 2015, 190(9):1-8.
- [53] AHMADIZAD S, MORADI A, NIKOOKHESLAT S, et al. Effects of age on hemorheological responses to acute endurance exercise[J]. *Clin Hemorheol Microcirc*, 2011, 49:165-174.
- [54] SANDHAGEN B, FRITHZ G, WAERN U, et al. Increased whole blood viscosity combined with decreased erythrocyte fluidity in untreated patients with essential hypertension[J]. *J Intern Med*, 1990, 228(6):623-626.
- [55] MARTÍNEZ M. The effect of long-term treatment with hypotensive drugs on blood viscosity and erythrocyte deformability in patients with essential arterial hypertension [J]. *Clin Hemorheol Microcirc*, 1997, 17(3):193-198.
- [56] SIMMONDS M J, MEISELMAN H J, BASKURT O K. Blood rheology and aging[J]. *J Geriatr Cardiol*, 2013, 10(3):291-301.
- [57] 邓昌盛, 李沫沫, 郭爱伟, 等. 尼西鸡血液生理生化指标分析[J]. 黑龙江畜牧兽医, 2024(17):38-44.
- DENG C S, LI M M, GUO A W, et al. Analysis of blood physiological and biochemical indices in Nixi chickens s [J]. *Heilongjiang Animal Science and Veterinary Medicine*, 2024(17):38-44. (in Chinese)
- [58] GRAY G W, BRYAN A C, FREEDMAN M H, et al.

- Effect of altitude exposure on platelets [J]. *J Appl Physiol*, 1975, 39(4): 648-652.
- [59] SHANG C, WUREN T, GA Q, et al. The human platelet transcriptome and proteome is altered and pro-thrombotic functional responses are increased during prolonged hypoxia exposure at high altitude [J]. *Platelets*, 2020, 31(1): 33-42.
- [60] TYAGI T, AHMAD S, GUPTA N, et al. Altered expression of platelet proteins and calpain activity mediate hypoxia-induced prothrombotic phenotype [J]. *Blood*, 2014, 123(8): 1250-1260.
- [61] TURTON H A, PICKWORTH J, PATERSON G G, et al. Soluble p-selectin and von willebrand factor rise in healthy volunteers following non-exertional ascent to high altitude [J]. *Front Physiol*, 2022, 13: 1-6.
- [62] LI C, LI X, LIU J, et al. Investigation of the differences between the Tibetan and Han populations in the hemoglobin-oxygen affinity of red blood cells and in the adaptation to high-altitude environments [J]. *Hematology*, 2018, 23(5): 309-313.
- [63] ASTLE W J, ELDING H, JIANG T, et al. The allelic landscape of human blood cell trait variation and links to common complex disease [J]. *Cell*, 2016, 167(5): 1415-1429.
- [64] EICHER J D, CHAMI N, KACPROWSKI T, et al. Platelet-ya-analysis in 157, 293 Individuals [J]. *Am J Hum Genet*, 2016, 99(1): 40-55.
- [65] GHANBARI-NAKI A, GOLZAR F A K, ROOHBAKHSH E, et al. Changes in fibrinogen levels, plasma viscosity and insulin resistance after 4 weeks of combined sit-up and walking training [J]. *Hormozgan Med J*, 2016, 20(2): 127-135.
- [66] SOLÁ E, VAYÁ A, SIMÓ M, et al. Fibrinogen, plasma viscosity and blood viscosity in obesity. Relationship with insulin resistance [J]. *Clin Hemorheol Microcirc*, 2007, 37(4): 309-318.
- [67] SEKI K, SUMINO H, NARA M, et al. Relationships between blood rheology and age, body mass index, blood cell count, fibrinogen, and lipids in healthy subjects [J]. *Clin Hemorheol Microcirc*, 2006, 34(3): 401-410.
- [68] WADE J P H, PEARSON T C, RUSSELL R W, et al. Cerebral blood flow and blood viscosity in patients with polycythaemia secondary to hypoxic lung disease [J]. *BMJ*, 1981, 283(6293): 689-692.
- [69] KUSS N, BAUKNECHT E, FELBINGER C, et al. Whole blood viscosity of preterm infants-differences to term neonates [J]. *Clin Hemorheol Microcirc*, 2015, 61(2): 397-405.

(编辑 郭云雁)