

甘南牦牛乳成分与环境因子相关性分析

冯蕊¹，白嘉莉¹，马振甲¹，马彦男^{1, 2}，崔佳佳^{1, 2}，芊海生³，张继^{1, 2}，梁俊玉^{1*}

(1.西北师范大学生命科学学院，甘肃兰州 730070；2.西北师范大学新农村发展研究院，甘肃兰州 730070；3.甘肃亚克牧业发展有限公司，甘肃玛曲 747300)

摘要： [目的]通过相关性分析，揭示甘肃省甘南藏族自治州（简称“甘南州”）牦牛乳中蛋白质、非脂乳固体、IgA、IgM、共轭亚油酸与产地海拔、气温、降水量的关联。 [方法]测定2023年甘南州合作市、玛曲县、碌曲县、夏河县、卓尼县5个地区牦牛乳中蛋白质、非脂乳固体、IgA、IgM、共轭亚油酸的含量。 [结果]甘南州5个地区牦牛乳中蛋白质的平均含量为4.45%，非脂乳固体的平均含量为10.49%，IgA的平均含量为2.044 μg/mL，IgM的平均含量为17.129 μg/ml，共轭亚油酸的平均含量为1.326 mg/g。 [结论]甘南州牦牛乳中蛋白质、非脂乳固体含量与8月平均最高气温、年均低温呈显著负相关；IgA含量与年均低温显著正相关；IgM、共轭亚油酸含量分别与8月总降水量、年均总降水量显著负相关，上述研究结果可为今后研究环境因子与牦牛乳品质之间的关系提供参考。

关键词： 牦牛乳；IgA；IgM；共轭亚油酸；相关性

文章编号：1671-4393（2026）03-0140-08

DOI:10.12377/1671-4393.26.03.19

Correlation Analysis between Yak Milk Composition and Environmental Factors in Gannan Region

FENG Rui¹，BAI Jiali¹，MA Zhenjia¹，MA Yannan^{1, 2}，CUI Jiajia^{1, 2}，BIAN Haisheng³，ZHANG Ji^{1, 2}，LIANG Junyu^{1*}

(1.College of Life Sciences，Northwest Normal University，Lanzhou Gansu 730070；2.Collaborative Innovation Center of Natural Medicine Germplasm Resources Discovering and New Cultivars Breeding，Lanzhou Gansu 730070；3.Gansu Yak Pastoral Development Co., Ltd., Maqu Gansu 747300)

基金项目： 甘南州科技计划项目-甘南牦牛乳质量评价研究（2022JY2NC007）

作者简介： 冯蕊（2000-），女，甘肃甘南人，硕士，研究方向为植物化学与资源利用；

白嘉莉（2001-），女，甘肃兰州人，硕士，研究方向为植物化学与资源利用；

马振甲（2001-），男，甘肃张掖人，硕士，研究方向为植物化学与资源利用；

马彦男（1985-），男，甘肃临夏人，博士，副教授，研究方向为反刍动物脂肪与肌肉组织发育及营养调控；

崔佳佳（1992-），女，甘肃兰州人，博士，讲师，研究方向为植物药物资源与利用；

芊海生（1964-），男，甘肃合作人，本科，研究方向为牦牛乳及其制品的加工生产；

张继（1963-），女，甘肃兰州人，博士，研究员，研究方向为西北特色植物资源开发利用。

***通信作者：** 梁俊玉（1978-），男，甘肃兰州人，博士，教授，研究方向为天然产物研究与开发。

Abstract: [Objective] Through correlation analysis, to reveal the correlations between proteins, non-fat milk solids, IgA, IgM, conjugated linoleic acid in yak milk from Tibetan Autonomous Prefecture of Gannan, Gansu Province (referred to as "Gan Nan Prefecture") and the altitude, temperature, and precipitation of the region. [Method] The contents of protein, non-fat milk solids, IgA, IgM, and conjugated linoleic acid in yak milk in regions of Gonghe City in 2023, Maqu County, Luqu County, Xiahe County and Zhuoni County in Gan Nan Prefecture were determined. [Result] The average protein content in yak milk in 5 regions of Gannan Prefecture was 4.45%, the average non-fat milk solids was 10.49%, the average content of IgA was 2.044 $\mu\text{g/ml}$, the average content of IgM was 17.129 $\mu\text{g/ml}$, and the average content of conjugated linoleic acid was 1.326 mg/g. [Conclusion] The protein and non-fat milk solids content in the yak milk from Gannan Prefecture were significantly negatively correlated with the average maximum temperature in August and the annual average low temperature; the IgA content was significantly positively correlated with the annual average low temperature; the IgM and conjugated linoleic acid contents were significantly negatively correlated with the total precipitation in August and the annual total precipitation respectively. The results of this study can provide a reference for future research on the relationship between environmental factors and yak milk quality.

Keywords: yak milk; IgA; IgM; conjugated linoleic acid; correlation

甘南牦牛主要分布在甘肃省甘南藏族自治州（简称“甘南州”）合作市、碌曲县、玛曲县、卓尼县、夏河县^[1]。牦牛乳主产区属于典型的大陆性气候，海拔在2 800~4 900 m之间^[2]。牦牛乳相较于普通牛乳营养成分含量更高，且因其富含免疫球蛋白、共轭亚油酸（CLA）、转化生长因子、外泌体等多种免疫成分被称为天然“浓缩乳”^[3~5]，其中，IgA和IgM是重要的免疫球蛋白，参与调节免疫反应。CLA作为一种特有的脂肪酸，对乳的风味和营养价值有显著影响；此外，CLA在乳制品中具多重生理功能，可调节脂质代谢，促进脂肪分解、抑制合成，有助减重；能增强免疫力，调节免疫细胞活性；还具抗癌潜力，可抑制癌细胞增殖；并对血糖调节有益，改善胰岛素敏感性，在功能性乳制品开发中颇具价值^[6]。

牦牛乳品质与牧草产量有直接关系。牧草品质与产量会影响牦牛乳中免疫球蛋白和脂肪酸合成。天然草地牧草产量高低在很大程度上受制于地域气候、土壤和牧草的生长机能等因素，人为干预的影

响较轻^[7]。一个区域在一定时间内，土壤的理化性质、牧草的种类等变化相对平稳^[8, 9]，气候变化是影响牧草产量的制约因素。在天然草地牧草产量与气候因素的关系方面，国内已有大量研究，尤其是降雨方面。水热条件是影响天然草原牧草生长发育的主要因素^[10~13]，降雨量和温度共同影响牧草的生长和产量^[14]，降雨量充沛、热量充足的年份，天然草原牧草产量高^[15~17]。然而，即使年降雨量充足，若降雨分配与牧草生长过程不匹配，产量也会受影响。降雨量的空间分布对植物地上生物量的变化亦有重大影响^[18]，温度、日照等其他气候因素亦是如此。研究表明，降雨量与鲜草的产量相关性最高^[19]。而不同海拔高度对高寒草甸地上生物量、可食牧草生物量、莎草科牧草生物量、禾本科牧草生物量也存在影响^[20]。梁建勇等^[21]研究发现，高海拔地区的高寒草甸和沼泽化草甸牧草干物质消化率显著高于低海拔地区荒漠草原，而牦牛乳营养成分含量主要受其采食牧草的影响^[22]。因此，研究不同环境因子对牦牛乳品质的影响有重要意义。

1 材料与方法

1.1 材料

牦牛乳样品于2023年8月中旬采自甘肃省甘南州合作市、碌曲县、玛曲县、夏河县、卓尼县牧民家健康哺乳期牦牛，每个产区采集10 头牦牛，每头采集500 mL牦牛乳样品。

1.2 方法

1.2.1 乳样处理与测定

将牦牛乳装于灭菌采样瓶，取样后置于装有冰袋的泡沫箱，在24 h内运输到实验室，冷藏保存。采用Foss MikeScan FT 120仪器分析牦牛乳中蛋白质、非脂乳固体含量，使用SimpleStep ELISA试剂盒按说明书测定牦牛乳中的IgA、IgM含量，利用氢火焰离子化检测器气相色谱法检测CLA含量。

1.2.2 数据分析

各测定指标的原始数据经Microsoft Office Excel 2007简单整理后，采用SPASS 27软件进行统计分析，用ANOVA方差分析法进行差异显著性检验，环境因子与各指标间的相关性采用

Spearman相关性分析、Pearson相关性分析、线性回归和灰色关联度分析。当 $P<0.05$ 时，差异显著，有统计学意义。

2 结果与分析

2.1 不同地区产地环境指标

由表1可知，本研究各牦牛乳产区海拔在3 000~3 300 m之间，玛曲县最高，夏河县最低。采集2023年各产区温度和降水量数据发现，各产区年均最高气温在10~14 ℃之间，卓尼县高于其他4 个产区，玛曲县低于其他4 个产区；各产区年均最低气温在-4~-1 ℃之间，卓尼县高于其他4 个产区，合作市、碌曲县低于其他3 个产区。各产区8月平均最高气温在19~24 ℃之间，卓尼县高于其他4 个产区，玛曲县低于其他4 个产区；各产区8月平均最低气温在6~9 ℃之间，卓尼县高于其他4 个产区，合作市、碌曲县、玛曲县均低于其他2 个产区。各产区年均降水量在470.3~1 122.6 mm之间，碌曲县高于其他4 个产区，合作市低于其他4 个产区；各产区8月降水量在15.0~74.8 mm之间，碌曲县高于其他4 个

表 1 2023 年各牦牛乳产区环境指标

Table 1 Environmental Indicators of Each Yak Milk Production Area in 2023

指标	海拔（m）	8 月平均最高气温（℃）	8 月平均最低气温（℃）	年均最高气温（℃）	年均最低气温（℃）	年均降水量（mm）	8 月降水量（mm）
合作市	3 199	21	6	12	-4	470.3	18.4
碌曲县	3 100	20	6	11	-4	1 122.6	74.8
玛曲县	3 300	19	6	10	-3	794.1	60.4
卓尼县	3 200	24	9	14	-1	507.4	15.0
夏河县	3 000	22	7	13	-3	818.1	11.3

注：8月平均最高/最低气温=（2023年8月每日最高/最低气温之和）÷31 天；年均最高/最低气温=（2023年每日最高/最低气温之和）÷365 天，下同

数据来源<http://data.cma.cn/>

表 2 2023 年各产区牦牛乳蛋白质、非脂乳固体、IgA、IgM、CLA 含量

Table 2 Protein, Non-fat Milk Solids, IgA, IgM and CLA Contents in Yak Milk from Different Producing Area in 2023

指标	蛋白质（%）	非脂乳固体（%）	IgA（μg/mL）	IgM（μg/mL）	共轭亚油酸（mg/g）
合作市	3.94±0.07 ^b	9.73±0.04 ^d	0.409±0.005 ^d	17.693±0.020 ^c	1.600±0.01 ^a
碌曲县	4.52±0.06 ^a	10.90±0.03 ^b	0.409±0.003 ^d	9.459±0.04 ^c	1.060±0.01 ^d
玛曲县	4.55±0.03 ^a	11.00±0.05 ^a	3.329±0.011 ^b	10.753±0.03 ^d	1.120±0.01 ^c
卓尼县	3.89±0.03 ^b	9.56±0.02 ^c	4.302±0.004 ^a	19.223±0.03 ^b	1.540±0.01 ^a
夏河县	4.48±0.04 ^a	10.38±0.03 ^c	1.772±0.004 ^c	28.516±0.03 ^a	1.310±0.02 ^b

注：同一列数字、不同小写字母表示差异显著（ $P<0.05$ ）

产区，夏河县低于其他4个产区。

2.2 各产区牦牛乳 IgA、IgM、CLA 含量

由表2可知，本研究各产区牦牛乳蛋白质含量为3.89%~4.55%，平均蛋白质含量为4.45%，最低的为卓尼县，最高的为玛曲县。卓尼县2023年均最高气温14℃，气温最高且牦牛乳蛋白质含量最低，与“蛋白质含量与气温负相关”的结论一致。该现象可能由牧草类型差异所致，卓尼县的暖湿气候或促进禾本科牧草生长，但其粗蛋白含量低于高寒区莎草科牧草；此外，在高温环境下牦牛采食量下降或影响其蛋白质摄入，后续可结合牧草成分进一步分析验证。本研究各产区牦牛乳非脂乳固体含量为9.56%~11.00%，平均非脂乳固体含量为10.49%，最低的为卓尼县，最高的为玛曲县。本研究各产区牦牛乳IgA含量为0.409~4.302 μg/mL，平均IgA含量为2.044 2 μg/mL，较低的为合作市、碌曲县，最高的为卓尼县。本研究各产区牦牛乳IgM含量为9.459~28.516 μg/mL，平均IgM含量为17.129 μg/mL，最低的为碌曲县，最高的为夏河县。本研究各产区CLA含量为1.060~1.540 mg/g，平均CLA含量为1.326 mg/g，最低的为碌曲县，最高的为合作市。

2.3 各产区 2023 年环境指标与牦牛乳中蛋白质、非脂乳固体、IgA、IgM、CLA 含量相关性分析

由表3可知，对本研究各产区2023年环境指标进行正态性检验，结果表明海拔、年均最高气温、8月平均最高气温、年均最低气温、年均降水量、8月降水量、牦牛乳中蛋白质率、非脂乳固体率、IgA含量、IgM含量、CLA含量具有正态性特质。

由表4、图1可知，本研究2023年牦牛乳中蛋白质含量与该年8月平均最高气温、年均最高气温间均呈显著性相关关系，相关系数值为-0.900、-0.900，小于0；非脂乳固体含量与该年8月平均最高气温、年均最高气温间均呈显著性相关关系，相关系数

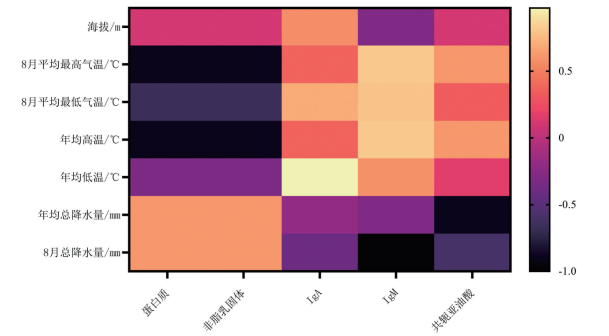


图 1 2023 年环境指标 Spearman 相关性分析
Figure 1 Spearman Correlation Analysis of Environmental Indicators in 2023

表 3 2023 年环境指标正态性检验结果

Table 3 Results of Normality Test for Environmental Indicators in 2023

指标	平均值	标准差	偏度	峰度	Kolmogorov-Smirnov 检		Shapiro-Wilk 检验	
					统计量 D 值	P 值	统计量 W 值	P 值
海拔 (m)	3 159.800	113.930	-0.398	-0.164	0.235	0.200*	0.962	0.824
8 月平均最高气温 (℃)	21.200	1.924	0.590	-0.220	0.141	0.200*	0.979	0.928
8 月平均最低气温 (℃)	6.800	1.304	1.714	2.664	0.330	0.079	0.735	0.021
年均最高气温 (℃)	12.000	1.581	0.000	-1.200	0.136	0.200*	0.987	0.967
年均最低气温 (℃)	-3.000	1.225	1.361	2.000	0.300	0.161	0.833	0.146
年均降水量 (mm)	742.500	265.621	0.496	-0.603	0.212	0.200*	0.916	0.507
8 月降水量 (mm)	35.980	29.418	0.710	-2.514	0.325	0.091	0.816	0.110
蛋白质率 (%)	4.276	0.331	-0.596	-3.222	0.331	0.077	0.764	0.040
非脂乳固体 (%)	10.314	0.657	-0.152	-2.782	0.214	0.200*	0.889	0.353
IgA 含量 (μg/mL)	2.044	1.744	0.382	-2.192	0.226	0.200*	0.891	0.360
IgM 含量 (μg/mL)	17.129	7.646	0.723	0.026	0.198	0.200*	0.925	0.565
CLA 含量 (mg/g)	1.326	0.242	0.082	-2.703	0.212	0.200*	0.904	0.433

注: *P<0.05, **P<0.01, 下同

表 4 2023 年环境指标 Spearman 相关性分析结果
Table 4 Results of Spearman Correlation Analysis of Environmental Indicators in 2023

指标	蛋白质率 (%)	非脂乳固体率(%)	IgA (μ g/mL)	IgM (μ g/mL)	共轭亚油酸 (mg/g)
海拔 (m)	0.100	0.100	0.564	-0.300	0.100
8 月平均最高气温 (℃)	-0.900*	-0.900*	0.359	0.800	0.600
8 月平均最低气温 (℃)	-0.671	-0.671	0.688	0.783	0.335
年均最高气温 (℃)	-0.900*	-0.900*	0.359	0.800	0.600
年均最低气温 (℃)	-0.316	-0.316	0.973**	0.580	0.158
年均降水量 (mm)	0.600	0.600	-0.205	-0.300	-0.900*
8 月降水量 (mm)	0.600	0.600	-0.410	-1.000**	-0.600

为-0.900、-0.900，小于0；IgA 含量与该年年均最低气温间呈显著性相关关系，相关系数为0.973，大于0；IgM 含量与该年8月降水量呈显著性相关关系，相关系数为-1.000；CLA 含量与该年年均降水量间呈显著性相关关系，相关系数为-0.900。

由表5、图2可知，本研究2023年牦牛乳中蛋白质含量与10 项环境因子无任何相关关系；非脂乳固体含量与10 项环境因子没有相关关系；IgA 含量与该年年均最低气温间呈显著性相关关系，相关系数为0.911；IgM 含量与环境因子无相关关系；CLA 含量与该年年均降水量间呈负相关关系，相关系数为-0.925。综上所述，牦牛乳中蛋白质含量与该年8月平均最高气温（-0.900*）、年均最低气温（℃）（-0.900*）显著负相关（ $P<0.05$ ）；非脂乳固体含量与该年8月平均最高气温（-0.900*）、年均最低气温（℃）（-0.900*）间呈显著负相关（ $P<0.05$ ；IgA 与该年年均最低温度（0.973*）显著正相关（ $P<0.05$ ）；IgM 含量与该年8月降水量（-1.000**）间呈显著负相关（ $P<0.01$ ）；CLA 含量与该年年均总降水量（-0.935*）显著负相关。

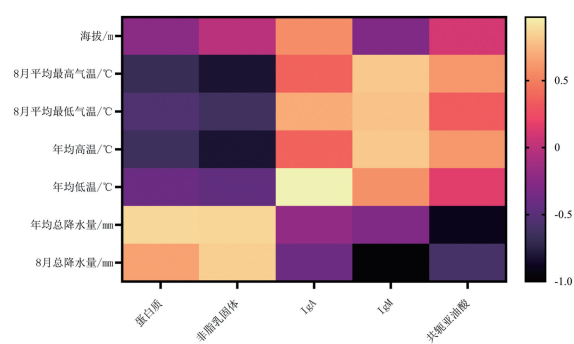


图 2 2023 年环境指标 Pearson 相关性分析
Figure 2 Pearson Correlation Analysis of Environmental Indicators in 2023
注：Pearson 相关系数r的取值范围为（-1，1）

由表6可知，将2023年8月平均最高气温，年均最低气温作为自变量，而将该年8月牦牛乳蛋白质含量作为因变量进行逐步回归分析， R^2 为0.855，8月蛋白质含量=4.003+0.181×8月平均最高气温+0.345×年均最低气温。分析可知，2023年8月平均最高气温、年均最低气温会对8月牦牛乳蛋白质含量产生负向影响。

由表7可知，2023年8月平均最高气温，年均最低气温作为自变量，该年8月牦牛乳非脂乳固体含量

表 5 2023 年环境指标 Pearson 相关性分析结果
Table 5 Results of Pearson Correlation Analysis of Environmental Indicators in 2023

指标	蛋白质率 (%)	非脂乳固体率(%)	IgA (μ g/mL)	IgM (μ g/mL)	CLA (mg/g)
海拔 (m)	-0.248	-0.009	0.564	-0.300	0.100
8 月平均最高气温 (℃)	-0.686	-0.821	0.359	0.800	0.600
8 月平均最低气温 (℃)	-0.553	-0.641	0.688	0.783	0.335
年均最高气温 (℃)	-0.650	-0.818	0.359	0.800	0.600
年均最低气温 (℃)	-0.419	-0.469	0.973**	0.580	0.158
年均降水量 (mm)	0.866	0.858	-0.205	-0.300	-0.900*
8 月降水量 (mm)	0.645	0.827	-0.410	-1.000**	-0.600

表 6 2023 年牦牛乳蛋白质含量与环境因子线性回归分析结果
Table 6 Results of Linear Regression Analysis of Yak Milk Protein Content and Environmental Factors in 2023

指标	非标准化系数		标准化系数	T	P 值	R ²	调整 R ²	F	VIF
	B	标准误差	Beta						
常数	4.003	1.556	-	2.573	0.236	0.964	0.855	F=8.830	-
8 月平均最高气温 (℃)	0.181	0.102	1.052	1.770	0.327			P=0.241	0.103
年均最低气温 (℃)	0.345	0.111	1.275	1.275	0.199				0.215

注：D-W值为2.194

表 7 2023 年牦牛乳非脂乳固体含量与环境因子线性回归分析结果
Table 7 Results of Linear Regression Analysis of Non-fat Milk Solids Content in Yak Milk and Environmental Factors in 2023

指标	非标准化系数		标准化系数	T	P 值	R ²	调整 R ²	F	VIF
	B	标准误差	Beta						
常数	13.938	4.485	-	3.108	0.198	0.923	0.693	F=4.014	-
8 月平均最高气温 (℃)	0.062	0.295	0.181	0.209	0.869			P=0.348	0.103
年均最低气温 (℃)	0.547	0.321	1.019	1.705	0.338				0.215

注：D-W值为3.030

作为因变量进行逐步回归分析，经过模型自动识别，R²为0.693，模型公式为：8月牦牛乳非脂乳固体含量=13.938+0.062×8月平均最高气温+0.547×年均最低气温。分析可知：2023年8月平均最高气温、年均最低气温会对牦牛乳非脂乳固体含量产生负向影响。

由表8可知，2023年年均最低气温作为自变量，该年8月牦牛乳IgA含量作为因变量进行逐步回归分析，R²为0.830，模型公式为：8月牦牛乳IgA含量=5.937+1.298×年均最低气温。2023年年均最低气温的回归系数为1.298（T=3.830，P=0.031）。分析可

知：2023年年均最低气温会对8月牦牛乳IgA含量产生正向影响。

由表9可知，2023年8月降水量作为自变量，8月牦牛乳IgM含量作为因变量进行逐步回归分析，R²为0.883，模型公式为：8月牦牛乳IgM含量=-49.279-0.103×8月降水量。2023年8月降水量的回归系数为-0.103（T=-0.94，P=0.443）。分析可知：2023年8月降水量会对8月牦牛乳IgM含量产生负向影响。

由表10可知，2023年年均降水量作为自变量，8月牦牛乳CLA含量作为因变量进行逐步回归分

表 8 2023 年牦牛乳 IgA 含量与环境因子线性回归分析结果
Table 8 Results of Linear Regression Analysis of IgA Content in Yak Milk and Environmental Factors in 2023

指标	非标准化系数		标准化系数	T	P 值	R ²	调整 R ²	F	VIF
	B	标准误差	Beta						
常数	5.937	1.082	-	5.486	0.012	0.830	0.774	F=14.667	-
年均最低气温 (℃)	1.298	0.339	0.911	3.830	0.031			P=0.031	1

注：D-W值为2.549

表 9 2023 年牦牛乳 IgM 含量与环境因子线性回归分析结果
Table 9 Results of Linear Regression Analysis of IgM Content in Yak Milk and Environmental Factors in 2023

指标	非标准化系数		标准化系数	T	P 值	R ²	调整 R ²	F	VIF
	B	标准误差	Beta						
常数	-49.279	53.140	-	-0.927	0.452	0.883	0.766	F=7.559	-
8 月总降水量 (mm)	-0.103	0.109	-0.396	-0.947	0.443			P=0.117	2.995

注：D-W值为1.662

表 10 2023 年牦牛乳 CLA 含量与环境因子线性回归分析结果
Table 10 Results of Linear Regression Analysis of CLA Content in Yak Milk and Environmental Factors in 2023

指标	非标准化系数		标准化系数	T	P 值	R ²	调整 R ²	F	VIF
	B	标准误	Beta						
常数	1.952	0.156	-	12.515	0.001	0.855	0.807	F=17.748	-
年均总降水量 (mm)	-0.001	0.000	-0.925	-4.213	0.024			P=0.024	1

注：D-W值为2.360

析，R²为0.855，模型公式为：8月牦牛乳CLA含量=1.952-0.001×年均降水量。2023年年均降水量的回归系数为-0.001（T=-4.231，P=0.024）。分析可知：年均总降水量会对牦牛乳CLA含量产生负向影响。

在影响牦牛乳蛋白质含量的环境因子中，2023年年均最低气温关联度为0.860，2023年8月平均最高气温关联度为0.572。在影响牦牛乳非脂乳固体含量的环境因子中，2023年8月平均最高气温关联度为0.809，2023年年均最低气温关联度为0.651。在影响牦牛乳IgA含量的环境因子中，2023年年均最低气温的关联度为0.929；在影响牦牛乳IgM含量的环境因子中，2023年8月降水量关联度为0.664；在影响牦牛乳CLA含量的环境因子中，2023年年均降水量的关联度为0.817。

3 讨论与结论

本研究选取甘南州5个牦牛乳主产区（合作市、玛曲县、碌曲县、夏河县、卓尼县）的牦牛乳，测定2023年5个产区牦牛乳蛋白质、非脂乳固体、IgA、IgM、CLA含量，并将这5个指标与当地环境因子进行相关性分析。结果表明，甘南州5个产区牦牛乳蛋白质、非脂乳固体、IgA、IgM、CLA含量存在一定的区域差异。通过相关性分析发现，牦牛乳蛋白质、非脂乳固体含量与8月平均最高气温、年均最低气温显著负相关；IgA含量与年均最低气温显著正相关；IgM含量与8月降水量显著负相关；CLA含量与年均总降水量显著负相关。经相关性分析，建立牦牛乳成分（蛋白质、非脂乳固体、IgA、IgM、共轭亚油酸）含量与环境因子的回归模型：蛋白质含量与8月平均最高气温、年均最低气温显著相关（8月蛋白质含量=4.003+0.181×8月平均最高气温+

0.345×年均最低气温）；非脂乳固体含量亦受气温影响；IgA含量与年均低温正相关，IgM、CLA含量分别与8月降水量、年均降水量负相关。结合灰色关联度分析，量化环境因子影响权重，其中年均最低气温（关联度0.860）、8月平均最高气温（关联度0.572）对牦牛乳蛋白质含量影响显著；8月降水量（关联度0.664）、年均降水量（关联度0.817）分别主导IgM和CLA含量。综合两项分析，最终确定8月平均最高气温、8月降水量、年均降水量及年均最低气温为影响牦牛乳成分含量的关键环境因子。

藏区牧民生活必需的牦牛乳富含多种营养成分。随着相关研究的深入和牦牛乳产业的发展，系统分析牦牛乳中免疫活性物质（如免疫球蛋白）等营养物质的含量对提高牦牛乳质量、促进牦牛乳精深加工、提高牦牛乳附加值具有重要意义^[23]。研究表明，全年气候既决定草场类型、群落组成又决定牧草的营养成分含量^[24]。不同地区的海拔不同也会导致草场类型、牧草品质和季节气候存在差异^[25]。甘南州牦牛主要以天然牧场饲养为主，牧草品质与牦牛乳品质息息相关，因此研究产地环境与牦牛乳品质间的关系有重要意义。其实际应用价值体现在以下几点：（1）牧场选址与气候适配。鉴于牦牛乳蛋白质、非脂乳固体含量与8月平均最高气温、年均最低气温呈显著负相关，建议在牦牛乳高营养需求场景（如高端乳制品加工）中，优先选择年均最低气温较低、8月凉爽的高海拔区域（如玛曲县、碌曲县等）建立牧场，保障蛋白质与非脂乳固体的含量；若需兼顾牧草生长周期，可结合8月降水量与IgM、CLA含量的负相关特性，平衡选址地的水热条件，避免因降水过多导致乳中免疫活性物质及功能性脂肪酸含量下降。（2）乳制品加工区域布局。

根据IgA含量与年均最低气温的正相关关系，高海拔低温产区的牦牛乳更适合开发以免疫球蛋白为核心卖点的功能性产品（如婴幼儿配方奶粉、免疫增强型乳制品）；而低海拔或夏季高温产区的牦牛乳可侧重加工对蛋白质含量要求相对较低、但需控制CLA含量的产品（如基础液态奶），实现区域化产业分工。（3）牧草种植与气候调控。研究证实，牧草品质与牦牛乳成分紧密关联，可针对关键环境因子（如2023年年均最低气温、8月降水量）设计牧草种植方案：在气温较低区域，通过选育耐寒牧草品种提升冬季饲草质量，缓解低温对乳蛋白合成的抑制；在8月降水集中区域，优化草场排水系统，减少因潮湿导致牧草霉变，间接保障乳中IgM等活性物质的稳定性。（4）产业标准化与品质溯源。将8月平均最高气温、年均最低气温、8月总降水量、年均总降水量纳入牦牛乳品质溯源体系，建立“气候-牧草-乳成分”关联数据库。通过监测产地环境因子，可提前预测牦牛乳中蛋白质、免疫球蛋白含量等指标的波动范围，为乳制品企业原料收购、品质分级提供科学依据，推动藏区牦牛乳产业从粗放式生产向精准化管理升级，提升产品附加值与市场竞争力。由于本研究包含样本量较少（5个产区），可能影响统计显著性，未来需扩大样本和检测年限以验证结果的普适性。考虑将日照时长、土壤类型等潜在影响因素纳入研究范围，以增强结论的可靠性与外推效度。

参考文献

- [1] 马玉琴, 崔广智, 罗丽, 等. 甘南牦牛乳及其制品加工技术研究进展[J]. 食品工业, 2020, 41 (5): 280-283.
- [2] 宋礼, 罗丽, 李顺成, 等. 甘南牦牛乳功能性营养成分含量研究[J]. 食品工业, 2022, 43 (10): 323-325.
- [3] Li H, Ma Y, Li Q, et al. The chemical composition and nitrogen distribution of Chinese Yak (Maiwa) milk[J]. International Journal of Molecular Sciences, 2011, 12 (8): 4885-4895.
- [4] 胡瑞, 杨丽菲, 李菁. 牦牛乳营养与免疫活性成分[J]. 临床儿科杂志, 2021, 39 (12): 952-955.
- [5] 李亚茹, 郝力壮, 牛建章, 等. 牦牛乳与其他哺乳动物乳功能性营养成分的比较分析[J]. 食品科学, 2016, 37 (7): 249-253.
- [6] Meraz-Torres L S, Hernandez H, et al. Conjugated linoleic acid in dairy products: A review[J]. American Journal of Food Technology, 2012, 7 (4): 176-179.
- [7] 李建伟, 罗志娜, 王超, 等. 昭苏县天然草地牧草产量与气象因素的关系研究[J]. 中国农学通报, 2022, 38 (11): 58-63.
- [8] 杨恒山, 曹敏建, 李华. 种草养畜与内蒙古自治区农业的可持续发展[J]. 干旱地区农业研究, 2004 (1): 179-182.
- [9] 赵淑芬, 王宗礼, 孙启忠, 等. 内蒙古农牧交错带饲草资源饲用价值评价[J]. 中国草地, 2005 (3): 49-52.
- [10] 陈生云, 赵林, 秦大河, 等. 青藏高原多年冻土区高寒草地生物量与环境因子关系的初步分析[J]. 冰川冻土, 2010, 32 (2): 405-413.
- [11] 郭继勋, 祝廷成. 气候因子对东北羊草草原羊草群落产量影响的分析[J]. 植物学报, 1994 (10): 790-796.
- [12] 郭连云, 赵恒和, 蒯尚玛. 气象要素对高寒针茅草原产草量的影响评价[J]. 西北农林科技大学学报 (自然科学版), 2010, 38 (8): 189-196, 203.
- [13] 杨元合, 朴世龙. 青藏高原草地植被覆盖变化及其与气候因子的关系[J]. 植物生态学报, 2006 (1): 1-8.
- [14] 徐海量, 宋郁东, 胡玉昆. 巴音布鲁克高寒草地牧草产量与水热关系初步探讨[J]. 草业科学, 2005 (3): 14-17.
- [15] 姜永. 大针茅草原群落地上生物量与水热条件关系初步分析[J]. 内蒙古草业, 1989 (4): 16-22.
- [16] 刘秀梅. 气候因子和草地不同利用方式对毛乌素草地生产力的影响[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2010.
- [17] 赵慧颖. 呼伦贝尔市天然牧草生物量与气候条件的定量关系[J]. 内蒙古气象, 2006 (4): 30-32.
- [18] 黄爱纤, 张新跃, 唐川江, 等. 川西北牧区水热条件与牧草产量的相关性[J]. 草业科学, 2015, 32 (5): 754-759.
- [19] 马静, 柴沙驼, 孙璐, 等. 青海地区不同海拔高度天然牧草与牦牛乳常规营养指标的相关性分析[J]. 动物营养学报, 2021, 33 (8): 4502-4510.
- [20] 尚永成, 欧为友. 在不同海拔梯度上高寒草甸植物物种多样性指数、生物量变化及其关系的研究[J]. 黑龙江畜牧兽医, 2017 (9): 162-164.
- [21] 梁建勇, 焦婷, 吴建平, 等. 不同类型草地牧草消化率季节动态与营养品质的关系研究[J]. 草业学报, 2015, 24 (6): 108-115.
- [22] 周义秀, 郝力壮, 刘书杰. 三江源区高寒草场不同物候期牧草对放牧牦牛产奶量及乳中矿物质元素含量的影响[J]. 动物营养学报, 2020, 32 (8): 3742-3749.
- [23] 罗丽, 崔广智, 苏德亮, 等. 甘南牦牛乳中蛋白类活性物质[J]. 食品工业, 2022, 43 (9): 311-313.
- [24] 李夏子. 气候变化对内蒙古草原优势牧草生长发育的影响[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2014.
- [25] 娄新建, 郝力壮, 刘书杰, 等. 牦牛乳营养价值研究进展[J]. 动物营养学报, 2024, 36 (3): 1446-1462.