

原料乳理化及微生物指标与蛋白酶活力的相关性研究

周 欢, 宋艳梅, 范光彩, 夏忠悦*, 马 静, 骆 敏

(新希望乳业股份有限公司, 四川成都 610023)

摘 要: [目的]探究原料乳中各项理化及微生物指标与蛋白酶活力的相关性。[方法]以不同地区的原料乳为样本, 采用福林酚法测定蛋白酶活力, 并对应分析季节及原料乳成分(脂肪、蛋白质、乳糖、总固体、菌落总数、体细胞数)对蛋白酶活力的影响。[结果]季节因素对蛋白酶活力的影响: 冬季酶活力普遍高于夏季, 且宁夏某牧场相较于云南某牧场表现出更明显的季节性变化趋势。原料乳成分对蛋白酶活力的影响: 在理化指标中, 蛋白质、脂肪含量与蛋白酶活力显著相关, 而乳糖含量变化对酶活力的影响不显著; 在微生物指标方面, 嗜冷菌数量对蛋白酶活力的变化有更强的解释力, 在优质原料乳中, 体细胞数和菌落总数与蛋白酶活力的相关性较弱。[结论]原料乳中蛋白酶活力受季节温度变化、蛋白质含量变化及产酶优势菌群构成等因素显著影响。深入研究上述因素对原料乳品质评估和产品质量提升有重要意义。

关键词: 原料乳; 蛋白酶; 蛋白质; 理化指标; 微生物指标

文章编号: 1671-4393 (2026) 02-0048-07

DOI:10.12377/1671-4393.26.02.08

Correlation Study on the Physicochemical and Microbiological Indicators of Raw Milk and its Relationship with Protease Activity

ZHOU Huan, SONG Yanmei, FAN Guangcai, XIA Zhongyue*, MA Jing, LUO Min

(New Hope Dairy Co., Ltd., Chengdu Sichuan 610023)

Abstract: [Objective]To explore the correlation between various physicochemical and microbiological indicators in raw milk and the activity of protease.[Method]Taking raw milk from different regions as samples, the protease activity was determined using the Folin phenol method, and the effects of season and the composition raw milk

基金项目: 四川省科技计划项目-具有减肥功效的益生菌功能特性研究及发酵乳制品产业化 (2023NSFSC0018)

作者简介: 周 欢 (1996-), 女, 四川南充人, 本科, 中级工程师, 研究方向为乳制品质量安全与控制;

宋艳梅 (1982-), 女, 四川成都人, 本科, 高级工程师, 研究方向为乳制品质量安全检测与风险评估;

范光彩 (1995-), 男, 四川广元人, 本科, 中级工程师, 研究方向为乳制品质量安全与控制;

马 静 (1994-), 女, 河北唐山人, 硕士, 中级工程师, 研究方向为食品微生物检验;

骆 敏 (1992-), 女, 四川内江人, 本科, 中级工程师, 研究方向为食品微生物检验。

***通信作者:** 夏忠悦 (1971-), 女, 四川内江人, 本科, 高级工程师, 研究方向为乳制品质量保障及食品安全风险防控。

(fat, protein, lactose, total solids, total bacterial count, somatic cell count) on the protease activity was analyzed accordingly.[Result]The effects of seasonal factors on protease activity: The enzyme activity was generally higher in winter than in summer, and a certain pastures in Ningxia showed a more obvious seasonal variation trend. The effect of raw milk components on protease activity: Among the physicochemical indicators, protein and fat content were significantly correlated with protease activity, while the changes in lactose content has no significant effect on enzyme activity; in terms of microbial indicators, the number of psychrophilic bacteria had a stronger explanatory power for the change in protease activity. In high-quality raw milk, the correlation between the somatic cell count and total bacterial count and protease activity was relatively weak.[Conclusion]The protease activity in raw milk is significantly affected by factors such as seasonal temperature changes, changes in protein content, and the composition of the dominant enzyme producing bacterial population. In-depth study of these factors is of great significance for the assessment of raw milk quality and the improvement of product quality.

Keywords: raw material; protease; protein; physicochemical indicator; microbial indicator

原料乳中的蛋白酶（内源蛋白酶和与源蛋白酶）是影响乳制品稳定性与功能特性的重要因素。其通过水解作用，对乳中的蛋白质进行分解，从而改变乳的流变学性质，影响乳中凝胶形成的能力，甚至改变乳制品的风味特征。D'Incecco P等^[1]研究发现，在储藏期间内，若液态乳黏度突然超过10 MPa·s，表示此时出现了陈化凝胶现象，液态乳的黏度与粒径越大，表示陈化凝胶现象越严重。王一恬^[2]试验发现，添加荧光假单胞菌耐热蛋白酶的液态乳在25℃条件下储藏12 h后黏度由2.1 MPa·s显著增加至14 MPa·s左右，且随储存时间延长，黏度持续增加，导致液态乳发生凝胶化现象。另外，试验还发现添加蛋白酶的液态乳储存过程中酸度、Zeta-电位、色差、味觉、气味及挥发性物质等均会发生变化。这些变化对乳制品的最终品质有极大影响。研究表明，由嗜冷菌分泌的耐热蛋白酶是导致乳制品在货架期内发生变质的主要原因^[3, 4]。这些耐热蛋白酶能够在低温条件下稳定存在，并在乳制品的加工和储存过程中持续水解蛋白质，从而破坏乳制品的结构和风味，最终影响产品的品质和消费者的接受度。

近年来，随着消费者对高蛋白乳制品需求的增长，有关乳制品货架期影响因素、原料乳中蛋白酶

活力与产酶微生物的关联机制及嗜冷菌的溯源分析等成为研究热点^[5~7]。现有研究多聚焦于微生物嗜冷菌与蛋白酶活力的分析，缺乏对原料乳中蛋白酶与多维度理化、微生物指标的综合分析。因此，本研究采用优化后的福林酚法^[8]分别对云南和宁夏两牧场原料乳的蛋白酶活力进行测定，并对应测定蛋白质、脂肪、乳糖含量，菌落总数，体细胞数与蛋白酶活力的关系，旨在揭示原料乳中蛋白酶活力与多种理化及微生物指标之间的内在联系，并通过综合分析这些指标，期望能够为乳制品行业对原料乳的质量控制提供参考和指导，以满足消费者对高质量乳制品日益增长的需求。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

原料乳，分别采集于云南省洱源县某牧场和宁夏青铜峡市某牧场。福林试剂、碳酸钠、三氯乙酸、氢氧化钠、乳酸、乳酸钠、磷酸氢二钠、磷酸二氢钠、硼酸钠，成都市科隆化学品有限公司；L-酪氨酸，万唯生物科技有限公司。

1.2 仪器与设备

酶标分析仪，美谷分子仪器（上海）有限公

司；水浴锅、恒温培养箱，上海博迅医疗生物仪器股份有限公司；离心机，四川蜀科仪器有限公司；乳成分分析仪福斯华（北京）科贸有限公司。

1.3 试验方法

1.3.1 蛋白酶活力测定

参照《GB/T 23527.1—2023酶制剂质量要求 第1部分：蛋白酶制剂》的方法略作修改。为提高检测结果的重复性和准确性，优化福林酚检测蛋白酶过程中样品过滤方式、显色保温时间、取样量、福林试剂浓度等前处理条件，并采用酶标分析仪检测吸光度以提高检测效率，具体检测步骤如下。

配制浓度0、10、20、30、40、50 mg/L的L-酪氨酸标准工作溶液，分别吸取1 mL上述各浓度溶液于离心管内，依次加入5 mL碳酸钠溶液、1 mL福林试剂，40 ℃显色20 min。于680 nm处测吸光度，以吸光度为纵坐标，L-酪氨酸溶液浓度为横坐标，绘制标准曲线。

样品蛋白酶活力检测步骤见表1。

蛋白酶活力计算公式：

$$X = (Y_a - Y_b) \times 4 / 10$$

式中：X-样品的蛋白酶活力（U/mL）；Y_a-根据标准曲线计算离心管B（样品）L-酪氨酸含量（mg/L）；Y_b-根据标准曲线计算高心管A（空白）L-醇氨酸含量（mg/L）；4-反应试剂的总体积（mL）；10-反应时间（min）。

1.3.2 理化与微生物指标测定

- （1）理化指标采用乳成分分析仪测定。
- （2）菌落总数测定参照《GB 4789.2—2022 食

品安全国家标准 食品微生物学检验 菌落总数测定》^[9]中方法。

（3）体细胞数测定参照《NY/T 800—2004 生鲜牛乳中体细胞测定方法》^[10]中方法。

1.4 数据处理

采取Excel进行数据整理，Graphpad Prism 6对数据进行相关数据的显著性分析和绘图，*P* < 0.05则认为有显著差异。

2 结果与讨论

2.1 季节变化对原料乳蛋白酶活力的影响

本研究分别统计了云南和宁夏两牧场2024全年原料乳蛋白酶活力的检测情况。如图1、图2所示，两牧场的酸性、中性和碱性蛋白酶活力在5—9月分别保持在10、9.5、9.0L左右；10月至次年2月酶活力较高，酸性蛋白酶活力在12.5 U/mL左右，中性蛋白酶活力在11.5 U/mL左右，碱性蛋白酶活力在11.0 U/mL左右；蛋白酶活力有显著差异（*P* < 0.05）。此外，在9—10月，宁夏牧场原料乳蛋白酶活力的上升趋势较明显，从9 U/mL上升至12 U/mL左右，而云南牧场原料乳呈缓慢上升趋势，可能是由于宁夏秋冬季节温度变化较明显，导致蛋白酶活力变化较大。包雨飞等^[11]研究发现，从牧场层面看，季节导致的温度变化对原料乳中蛋白酶活力的影响最大，温度低于-4 ℃时，原料乳中的嗜冷菌能获得优势的生长环境，由嗜冷菌生产的外源性蛋白酶大量在原料乳中存在，使原料乳中的蛋白酶活力保持在偏高水平。

表 1 样品蛋白酶活力检测步骤

Table 1 Steps for Detecting Proteinase Activity of Samples

步骤	离心管 A（空白）	离心管 B（样品，需 2 个平行试）
1	加 1.00 mL 样液，（40±0.2）℃，水浴保温 2 min	
2	加 2.00 mL 三氯乙酸	加 1.00 mL 乳酸钠 / 磷酸 / 硼酸缓冲溶液
3	（40±0.2）℃，水浴保温 10 min	
4	加 1.00 mL 乳酸钠 / 磷酸 / 硼酸缓冲溶液	加 2.00 mL 三氯乙酸
5	静置 10 min，慢速定性滤纸过滤或不低于 8 000 r/min 离心 5 min，取上清液备用	
6	分别取离心管 A 和 B 中 1.00 mL 上清液，加入 5.00 mL 碳酸钠溶液，1.00 mL 福林使用溶液，（40±0.2）℃，水浴保温显色 20 min，待测	
7	取 350 μL 上清液于微孔板中，测定系列标准工作溶液在 680 nm 上的吸光度	

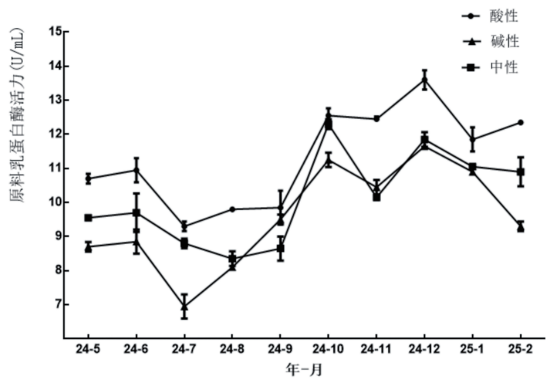


图 1 宁夏某牧场不同月份原料乳蛋白酶活力
Figure 1 Proteinase Activity of Raw Milk in Different Months of a Certain Pasture in Ningxia

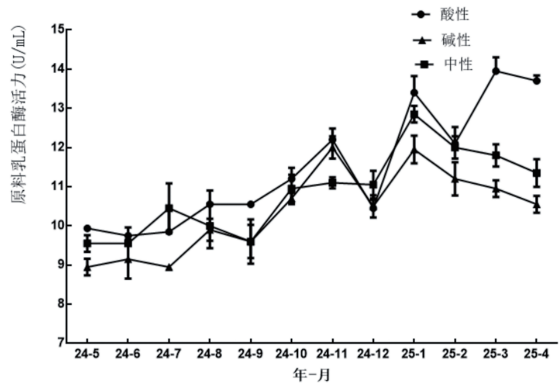


图 2 云南某牧场不同月份原料乳蛋白酶活力
Figure 2 Proteinase Activity of Raw Milk in Different Months of a Certain Pasture in Yunnan

2.2 原料乳中蛋白质含量与蛋白酶活力的相关性

季节性温度变化会对原料乳成分有显著影响，多种成分的浓度和理化性质在一年中呈现不同程度的变化，夏季原料乳中脂肪、蛋白质等营养成分含量普遍低于其他季节^[12]。

为探究原料乳中蛋白质含量对蛋白酶活力的影响，本研究统计了宁夏某牧场全年原料乳蛋白质含量及其对应的蛋白酶活力数据。图3显示，2024年原料乳蛋白质含量在5—9月较低，10月至次年2月较高。

如图4所示，随原料乳蛋白质含量的升高，蛋白酶活力显著增高，当蛋白质含量达3.4 g/100 g后，蛋白酶活力趋于稳定，不再继续增高。郑东影、庞光昌等^[13, 14]研究表明，采用福林酚测定蛋白酶活力，底物浓度1%~3%时，在蛋白酶量及其他条件不变的

情况下，反应产物酪氨酸含量随着底物酪蛋白浓度的增加而增加。从蛋白酶活力的检测原理分析，蛋白酶活力的检测基于酪蛋白底物水解生成酪氨酸的反应，并通过酪氨酸浓度计算酶活力。原料乳蛋白质中酪蛋白占比约80%。随蛋白质含量的增加，可供蛋白酶水解的底物酪蛋白相应增加，理论上可导致蛋白酶活力升高。然而，蛋白质浓度持续升高会引起体系黏度增加及酶活性下降^[12]，进而导致蛋白酶水解度下降，在此条件下，酶活力不再继续升高。

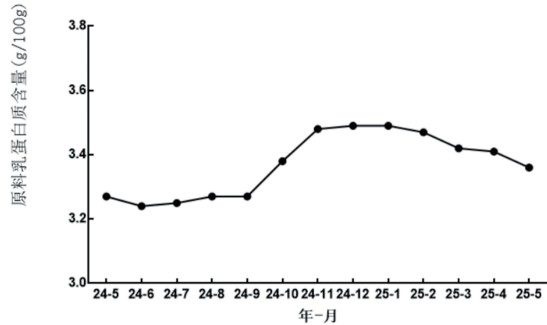


图 3 宁夏某牧场 2024 年原料乳蛋白质含量变化
Figure 3 Variation in Protein Content of Raw Milk from a Certain Pasture in Ningxia in 2024

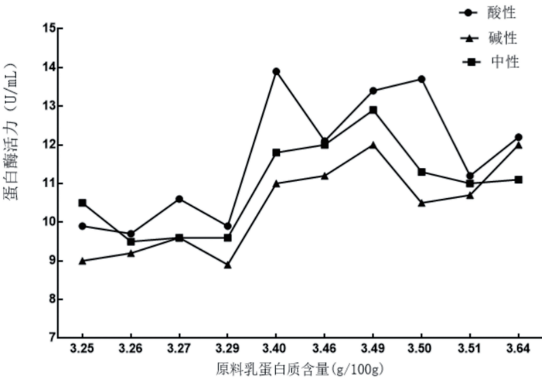


图 4 原料乳中蛋白质含量与酸性、中性和碱蛋白酶活力的相关性

Figure 4 Correlation between Protein Content in Raw Milk and the Activities of Acidic, Neutral and Alkaline Proteases

2.3 原料乳中乳糖、脂肪、总固体含量与蛋白酶活力的相关性

原料乳的营养成分呈现季节性变化，其中乳糖含量保持相对稳定。本研究收集宁夏某牧场按月监测蛋白酶活力的对应批次原料乳，测定其乳糖、脂肪及总固体含量，数据经Excel汇总如表2所

示。各项理化指标中，乳糖含量仅波动0.13 g/100 g（4.87~5.00 g/100 g），张一涵等^[15]研究表明乳糖具有良好的渗透性，能促进水分吸收至乳腺上皮细胞，维持浓度，因此其含量受外界影响较小。而脂肪、总固体含量的变化趋势与蛋白质含量的变化趋势一致，表明夏季热应激会导致奶牛采食量减少、各项生理指标下降、饮水量升高，进而引起乳中脂肪、蛋白质和总固体含量相应降低。

2.4 原料乳菌落总数与蛋白酶活力的相关性

本研究通过收集云南某牧场全年原料乳，持续监测其菌落总数。数据显示，该牧场生鲜乳每月菌落总数检测均值维持在 1.0×10^4 CFU/mL以下（图5），显著低于国家标准和团体标准要求，表明该牧场原料乳质量控制较好。如图5所示，该牧场2024年原料乳菌落总数在6—9月（夏季）较高，原因可能是夏季温度升高，微生物繁殖速度加快，导致菌落总数升高。该变化趋势与脂肪、蛋白质等理化指标和蛋白酶活力的季节性差异相反，与赵杨等^[16]研究结论一致。不同来源的原料乳各项指标随季节变化呈规律性波动，大部分原料乳中脂肪与蛋白质含量

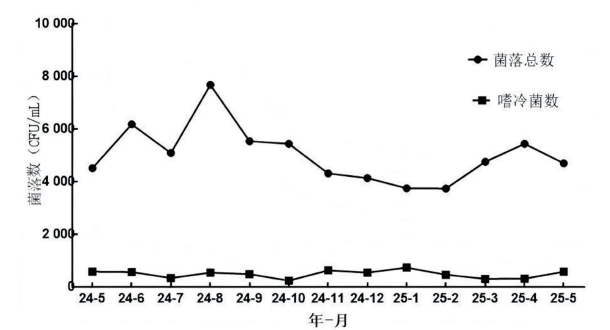


图5 云南某牧场 2024 年原料乳菌落总数及嗜冷菌数
Figure 5 Total Bacterial Count and Psychrophile Count of Raw Milk at a Certain Pasyure in Yunnan in 2024

在冬季最高，夏季最低，但菌落总数及体细胞数呈相反趋势。

为探究原料乳中菌落总数与蛋白酶活力的相关性，本研究收集云南该牧场按月监测蛋白酶活力的对应批次原料乳，测定其菌落总数指标。如图6所示，在一定范围内，菌落总数与蛋白酶活力呈正相关关系；然而当菌落总数超过某一阈值后，蛋白酶活力不再随其进一步升高。分析原因为菌落总数并不等同于实际存在的细菌总数，本研究所收集的原料乳中产蛋白酶的嗜冷菌在菌落总数较高的夏季，并未表现出显著优势。如图5所示，在原料乳菌落总数较高的6—9月，其嗜冷菌数与其他季节无显著性差异（ $P>0.05$ ）。

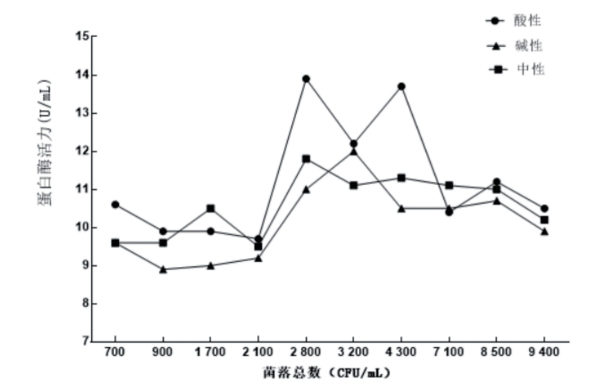


图6 原料乳中菌落总数和酸性、中性和碱性蛋白酶活力的相关性
Figure 6 Correlation between the Total Number of Colonies in Raw Milk and the Activities of Acidic, Neutral and Alkaline proteases

在低温条件下，原料乳中菌落总数增长缓慢，但嗜冷菌仍可存活并增殖，成为其中的优势菌。研究表明，原料乳中蛋白酶主要来源于嗜冷菌产生的蛋白酶，且不同嗜冷菌产生蛋白酶和脂肪酶的能力有差异，产蛋白酶能力较强的嗜冷菌属主要有假单胞菌

表 2 宁夏某牧场按月监测蛋白酶活力的对应批次原料乳中乳糖、脂肪及总固体含量 单位：g/100g										
Table 2 A Pasture in Ningxia Monitors the Lactose, Fat, and Total Solids Content in Raw Milk from Corresponding Batches on a Monthly Basis, Based on Protease Activity Unit: g/100g										
测定时间（年 - 月）	24-5	24-6	24-7	24-8	24-9	24-10	24-11	25-1	25-4	25-5
乳糖含量	4.91	4.92	4.90	4.87	5.00	4.91	4.94	4.97	4.95	4.97
脂肪含量	3.89	3.74	3.86	3.89	4.33	4.17	4.35	4.28	4.06	3.78
总固体含量	12.76	12.54	12.45	12.69	13.16	13.57	13.50	13.42	13.19	13.04

属、金黄杆菌属、耶尔森氏菌属和沙雷氏菌属^[17, 18]；而不同季节原料乳中的优势菌群不同^[19]，不同地区和湿度对原料中嗜冷菌的组成和数量也有影响。胡少震等^[20]研究发现，原料乳中不同嗜冷菌种类在冬夏季有差异，上述产蛋白酶能力较强的4种嗜冷菌属中，金黄杆菌属、耶尔森氏菌属在冬季牧场原料乳中较易分离获得，而沙雷氏菌属更倾向于在夏季牧场原料乳中被分离获得。因此，夏季原料乳菌落总数较高时，研究牧场中产蛋白酶的优势嗜冷菌未必能获得适宜的生长条件，导致原料乳蛋白酶活力相对冬季较低。

2.5 原料乳体细胞数与蛋白酶活力的相关性

如图7所示，云南某牧场原料乳中体细胞数在5—9月期间随温度上升呈逐渐升高趋势，至9月达到峰值后转为下降趋势，该变化规律与祝宇等^[21]研究结论一致。云南夏季温度高、湿度大，高温高湿环境有利于微生物生长，因此，可能导致奶牛健康状况下降，增加乳腺感染风险，进而使原料乳中体细胞数增加。统计分析该牧场全年原料乳体细胞数与蛋白酶活力的相关性（图8），结果显示，随体细胞数增加，蛋白酶活力呈现稳定波动趋势，表明二者之间无显著相关性。正常牛乳的体细胞数通常低于30万个/mL^[22]，而该牧场原料乳质量优异，体细胞数显著低于行业标准（参照《NY/T 4292—2023 生牛乳中体细胞数控制技术规范》规定的40万个/mL上限），导致体细胞数波动范围小，难以与蛋白酶活力建立显著关联。

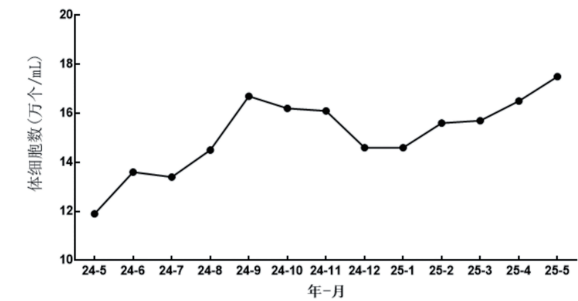


图7 云南某牧场2024年原料乳体细胞数
Figure 7 Total Cell Count of Raw Milk at a Certain Pasture in Yunnan in 2024

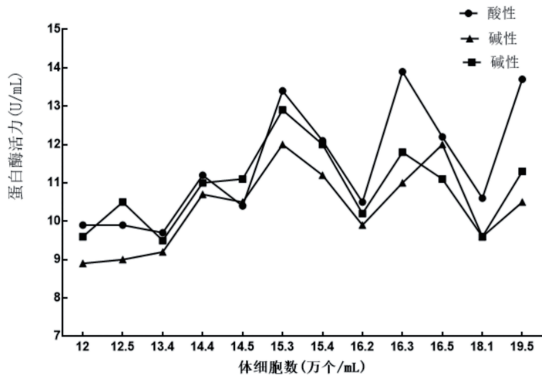


图8 原料乳中体细胞数和酸性、中性和碱性蛋白酶活力的相关性
Figure 8 Correlation between Somatic Cell Count in Raw Milk and Activities of Acidic, Neutral and Alkaline Protease

3 结论

本研究主要分析了季节和原料乳中脂肪、蛋白质、乳糖、菌落总数、体细胞等指标对原料乳中蛋白酶活力的影响。结果表明，云南和宁夏两牧场原料乳蛋白酶活力均呈现冬季（10—2月）显著高于夏季（5—9月）的特征，其中，宁夏某牧场秋冬季酶活力上升尤为显著（酸性蛋白酶达12.5 U/mL），这与嗜冷菌在低温环境下的优势生长直接相关。

蛋白酶活力与原料乳蛋白质含量呈显著正相关关系，然而，蛋白质含量超过一定阈值时，体系黏度增加会导致酶活力增长停滞，印证了酪蛋白底物浓度对福林酚法检测结果的直接影响。菌落总数与蛋白酶活力之间呈非线性关系，夏季虽菌落总数较高，但酶活力较低，表明产蛋白酶嗜冷菌属（如冬季更易分离的金黄杆菌属、耶尔森氏菌属，以及夏季更易分离的沙雷氏菌属）的季节性演替，相较于单纯菌落总数更能有效解释蛋白酶活力的变化。郭小杰^[23]宏基因组分析证实，冬季原料乳中耐热蛋白酶基因（如aprX）丰度较夏季高3.2倍，且与牛舍垫土菌群组成呈正相关关系，揭示了环境-菌群-酶活性级联调控是季节性差异的核心。

此外，本研究结果显示，不同季节宁夏某牧场原料乳中乳糖含量较稳定（4.87~5.00 g/100 g），与酶活力无显著相关性；体细胞数在优质原料乳中与

蛋白酶活力的相关性较弱。

综上所述，原料乳蛋白酶活力变化受多种因素影响，其中季节更替导致的温度变化、原料乳蛋白质含量变化以及产酶优势菌群数量变化构成主要影响因素。分析上述因素对原料乳蛋白酶活力的影响，对于评估原料乳品质及提升乳制品质量有重要意义。在实际生产过程中，建议依据季节特征制定原料乳验收标准，或基于季节特性调整巴氏杀菌工艺参数；同时应关注嗜冷菌的季节性演替规律，加强对不同季节产酶优势菌属的采样和监测频率。

参考文献

[1] D' Incecco P, Rosi V, Fortina M Grazia, et al.Biochemical, microbiological, and structural evaluations to early detect age gelation of milk caused by proteolytic activity of *Pseudomonas fluorescens*[J].European food research & technology, 2022, 248 (8) : 2097-2107.

[2] 王一恬.荧光假单胞菌耐热性蛋白酶特性及其对液态乳品质影响的研究[D].哈尔滨: 东北农业大学, 2023.

[3] 程方键, 陈晓民, 盛玉娟, 等.超高温灭菌乳货架期影响因素及预测模型研究进展[J].食品安全质量检测学报, 2024, 15 (17) : 282-291.

[4] 王宇, 韩雪.嗜冷菌耐热蛋白酶AprX对乳制品的危害与控制[J].中国食品学报, 2024, 24 (7) : 425-437.

[5] 代良超.原料乳中嗜冷菌对UHT乳品质及货架期的影响研究[D].沈阳: 沈阳农业大学, 2023.

[6] 何梦丽, 秦雪, 关宁, 等.原料乳中嗜冷菌污染现状与防控技术研究进展[J].现代食品科技, 2024, 40 (11) : 410-416.

[7] Zhuang J, Hou Y, Wang Y, et al.Relationship between microorganisms and milk metabolites during quality changes in refrigerated raw milk: A metagenomic and metabolomic exploration[J].International Journal of Food Microbiology, 2024 (425) : 110891.

[8] 周欢, 宋艳梅, 范光彩, 等.福林酚法高通量测定牛奶中蛋白酶活力的优化[J].中国乳业, 2024 (7) : 92-97.

[9] 中华人民共和国国家卫生健康委员会, 国家市场监督管理总局. GB 4789.2—2022 食品安全国家标准 食品微生物学检验 菌落总数测定[S].

[10] 中华人民共和国农业部. NY/T 800—2004 生鲜牛乳中体细胞测定方法[S].

[11] 包雨飞, 华晓巍, 贺凯茹, 等.影响原料乳中蛋白酶活力的多因素分析及相关性研究[J].食品安全质量检测学报, 2025, 16 (2) : 72-82.

[12] 红敏, 赵瑞霞, 萨其仍贵.季节变化对原料奶常规营养成分的影响[J].中国奶牛, 2012 (12) : 32-33.

[13] 郑东影, 陈玮, 张卫卫, 等.福林酚法测定酿酒白曲酸性蛋白酶活力的条件试验[J].酿酒, 2020, 47 (2) : 63-66.

[14] 庞广昌, 潘葳, 陈庆森.不同蛋白酶水解酪蛋白类大分子底物的规律研究[J].食品科学, 2004 (3) : 36-43.

[15] 张一涵, 余诗强, 蒋林树, 等.影响奶牛乳成分因素的研究进展[J].中国乳业, 2021 (12) : 53-62.

[16] 赵洋, 陈小红, 王秀丽, 等.季节性变化对巴氏杀菌乳原料奶品质的影响[J].食品研究与开发, 2024, 45 (19) : 81-86.

[17] 雷鸣, 胡楠, 王远一飞, 等.低温储存条件对原料乳嗜冷菌及细菌多样性的影响[J].中国乳品工业, 2019, 47 (7) : 14-18.

[18] 张树飞, 薛玉玲, 崔玥, 等.牛乳中嗜冷菌及其耐热酶研究进展[J].中国乳品工业, 2020, 48 (11) : 35-38, 44.

[19] 洪青, 李楠, 刘振民.原料乳中嗜冷菌快速检测与控制技术研究进展[J].乳业科学与技术, 2019, 42 (6) : 41-45.

[20] 胡少震, 代良超, 张书文, 等.原料乳和牧场环境中嗜冷菌多样性及蛋白酶水解特性研究[J].食品与发酵工业, 2024, 50 (8) : 24-30.

[21] 祝宇, 时永强, 张赛飞, 等.昆明地区中国荷斯坦牛乳中体细胞数变化规律及对乳成分影响的相关性分析[J].中兽医医药杂志, 2017, 36 (4) : 52-54.

[22] 吕曼, 万忠华, 张丹琴.生乳体细胞数分析及季节对乳成分的影响[J].中国乳业, 2023 (6) : 85-88.

[23] 郭小杰.原料乳中嗜冷菌多样性及其主要水解酶特性研究[D].哈尔滨: 东北农业大学, 2020.