

DOI: 10.11686/cyxb2025400

http://cyxb.magtech.com.cn

李博华, 云岚, 穆乙鑫, 等. 不同新麦草种质叶片氨基酸组分分析与营养价值评价. 草业学报, 2026, 35(8): 112—122.

LI Bo-hua, YUN Lan, MU Yi-xin, et al. Amino acid composition analysis and nutritional value evaluation of leaves of contrasting *Psathyrostachys juncea* germplasm lines. Acta Prataculturae Sinica, 2026, 35(8): 112—122.

不同新麦草种质叶片氨基酸组分分析与营养价值评价

李博华¹, 云岚^{1,2*}, 穆乙鑫¹, 周成美¹, 艾芊¹, 李珍¹, 何雨航¹

(1. 内蒙古农业大学草业学院, 内蒙古 呼和浩特 010010; 2. 内蒙古农业大学草地资源教育部重点实验室, 内蒙古 呼和浩特 010010)

摘要:以高粗蛋白(CP)与低CP新麦草种质为材料,测定叶片中18种氨基酸含量,通过氨基酸组成分析与营养价值评价,旨在系统阐明新麦草种质的蛋白质营养特性,为其作为优质饲草资源的开发利用提供依据。采用盐酸水解法,使用氨基酸全自动分析仪测定17种氨基酸含量并用分光光度法单独测定色氨酸含量。计算必需氨基酸比值(RAA)、比值系数分(SRC)、必需氨基酸指数(EAAI)等参数,并与联合国粮食及农业组织/世界卫生组织(FAO/WHO)氨基酸模式谱及理想蛋白质标准进行比较,综合评价新麦草蛋白质的营养价值。结果表明:高CP与低CP新麦草种质在氨基酸总量和必需氨基酸含量上均存在显著差异。新麦草叶片中含有10种药效氨基酸,总含量超过65%,具备潜在的药用价值。两类种质的必需氨基酸含量大多接近或超过FAO/WHO模式标准,仅赖氨酸(Lys)和蛋氨酸+半胱氨酸(Met+Cys)含量低于标准。高CP种质的必需氨基酸占氨基酸总量的比值(E/T)介于40.55%~42.04%,必需氨基酸与非必需氨基酸的比值(E/N)介于68.21%~72.52%;低CP种质的E/T值介于42.20%~43.22%,E/N值介于73.01%~76.11%,均高于FAO/WHO推荐值。高CP种质的SRC值(47.17~57.37)明显高于低CP种质(35.31~43.47)。两类种质的EAAI平均值均接近1,表明新麦草蛋白质质量较高。总体而言,高CP种质在蛋白质营养供给方面优于低CP种质,而低CP种质在必需氨基酸比例方面略占优势。Met+Cys是两类新麦草共同的第一限制性氨基酸。高CP种质在SRC和EAAI方面整体表现更优,其中种质“578854-8”和“531828-17”在氨基酸组成和营养平衡性方面表现突出,可作为未来品质改良的重要候选材料。本研究说明新麦草叶片氨基酸种类齐全、比例合理、营养价值高,是一种值得深度开发的优质蛋白饲草资源,研究结果为其在动物日粮中的科学利用及遗传育种提供了理论依据。

关键词:新麦草;氨基酸组成;联合国粮食及农业组织/世界卫生组织理想蛋白质标准;氨基酸比值系数;必需氨基酸指数

Amino acid composition analysis and nutritional value evaluation of leaves of contrasting *Psathyrostachys juncea* germplasm lines

LI Bo-hua¹, YUN Lan^{1,2*}, MU Yi-xin¹, ZHOU Cheng-mei¹, AI Qian¹, LI Zhen¹, HE Yu-hang¹

1. College of Grassland Science, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010010, China; 2. Key Laboratory of Grassland Resources, Ministry of Education, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010010, China

Abstract: This study utilized germplasm lines of *Psathyrostachys juncea* with contrasting high and low crude protein (CP) content and determined the contents of 18 amino acids in the leaves. Through amino acid composition analysis and nutritional value evaluation, the aim was to elucidate the protein nutritional characteristics of the *P. juncea*

收稿日期:2025-09-30;改回日期:2025-11-03

基金项目:国家自然科学基金(32371762),内蒙古自治区自然科学基金重点项目(2023ZD07)和内蒙古自治区教育厅一流学科科研专项(YLXKZX-NND-030)资助。

作者简介:李博华(2000—),男,黑龙江哈尔滨人,在读博士。E-mail: libohua@emails.imau.edu.cn

* 通信作者 Corresponding author. E-mail: yunlan@imau.edu.cn

germplasm lines, providing a basis for development and utilization of *P. juncea* as a high-quality forage resource. The hydrochloric acid hydrolysis method was employed, using an automatic amino acid analyzer to determine the content of 17 amino acids, while tryptophan content was determined separately by spectrophotometry. Parameters such as the ratio of essential amino acids (RAA), score of ratio coefficient (SRC), and essential amino acid index (EAAI) were calculated and compared with the Food and Agriculture Organization/World Health Organization (FAO/WHO) amino acid pattern and ideal protein standards to evaluate the nutritional value of *P. juncea* protein. The results showed significant differences in total amino acid content and essential amino acid content between high-CP and low-CP *P. juncea* germplasm lines. *P. juncea* leaves contained 10 pharmacologically active amino acids, with a total content exceeding 65%, indicating potential medicinal value. Most essential amino acid contents in both germplasm types were close to or exceeded the FAO/WHO pattern standards, except for lysine (Lys) and methionine+cysteine (Met+Cys), which were below the standards. In high-CP germplasm lines, the ratio of essential amino acids to total amino acids (E/T) ranged from 40.55% to 42.04%, and the ratio of essential to non-essential amino acids (E/N) ranged from 68.21% to 72.52%. In low-CP germplasms, E/T ranged from 42.20% to 43.22%, and E/N ranged from 73.01% to 76.11%, both exceeding the FAO/WHO recommended values. The SRC values of high-CP germplasm lines (47.17–57.37) were significantly higher than those of low-CP germplasm lines (35.31–43.47). The average EAAI of both germplasm lines was close to 1, indicating high protein quality in *P. juncea*. Overall, high-CP germplasm lines outperformed low-CP germplasm lines in terms of protein nutritional supply, while low-CP germplasm lines had a slight advantage in the proportion of essential amino acids. Met+Cys were the first limiting amino acids in both lines of *P. juncea*. High-CP germplasm lines exhibited superior overall performance in SRC and EAAI, with germplasm lines “578854-8” and “531828-17” showing outstanding amino acid composition and nutritional balance, making them important candidate materials for future quality improvement. This study demonstrates that *P. juncea* leaves possess a complete profile of amino acids, a reasonable composition, and high nutritional value, making them a high-quality protein forage resource worthy of further development. The findings provide scientific data to support utilization of *P. juncea* in animal diets and its genetic breeding.

Key words: *Psathyrostachys juncea*; amino acid composition; Food and Agriculture Organization/World Health Organization ideal protein standard; ratio coefficient of amino acid; essential amino acid index

牧草是畜牧业生产体系的重要基础,尤其为反刍动物提供了大量的基础饲料来源^[1]。氨基酸作为构成蛋白质的基本单元,在动物的生长、发育、繁殖等一系列生理过程中发挥着不可替代的关键作用。其种类与含量直接影响蛋白质的结构与功能,进而对牧草的营养价值产生重要影响^[2]。游离氨基酸更是评价饲料品质的重要指标,与饲料的香气、风味等特性密切相关^[3]。因此,深入评估牧草的氨基酸组成与营养价值,对优化家畜日粮配制、提高蛋白质利用效率具有重要意义。

目前,已有诸多学者对不同牧草资源的氨基酸进行了研究。例如,对不同品种白三叶(*Trifolium repens*)的粗蛋白质和氨基酸进行测定,发现其粗蛋白质和总氨基酸含量分别为 20.46%~22.67% 和 22.92%~24.86%,而这些变化与品种有关^[4]。有研究对阿拉善荒漠草地 38 种优势牧草的氨基酸进行了测定,结果发现这些牧草的氨基酸总量和必需氨基酸含量分别为 2.47%~22.50% 和 0.97%~8.92%,其中必需氨基酸/非必需氨基酸(essential amino acids/non-essential amino acids, E/N)和必需氨基酸/氨基酸总量(essential amino acids/total amino acids, E/T)均达到联合国粮食及农业组织与世界卫生组织(Food and Agriculture Organization/World Health Organization, FAO/WHO)理想蛋白质标准的牧草有 23 种^[5]。对呼伦贝尔草甸草原上的主要牧草进行青贮调制后发现,46 种牧草青贮样品总氨基酸含量为 6.15%~20.41%,同时满足 FAO/WHO 理想蛋白质标准的牧草有 41 种,氨基酸评分(amino acid score, AAS)高于 40 的牧草有 43 种,必需氨基酸指数(essential amino acid

index, EAAI)高于0.95的牧草有40种^[6]。此外,有研究表明牧草春季刈割蛋氨酸含量显著高于秋季,而其他氨基酸含量之间无显著差异^[7]。在不同物候期美丽胡枝子(*Lespedeza formosa*)的氨基酸研究中发现,其含有15种氨基酸,氨基酸总量随着物候期的延续呈先增加后下降趋势^[8]。还有学者对饲草不同部位的氨基酸进行测定,发现氨基酸总量和各氨基酸含量大小均为叶>花>茎>根^[9]。

新麦草(*Psathyrostachys juncea*)隶属禾本科新麦草属,是一种多年生疏丛型牧草。其适口性好、营养价值高,是新麦草属中唯一可以作为饲草的物种,野生种质具有稳定二倍性($2n=14$,NsNs)^[10-11]。近年来,围绕新麦草的生物学特性、生态适应性及遗传多样性等方面已开展一定研究^[12],然而,关于其氨基酸组成及蛋白质营养价值的系统评价仍未见报道。因此,为满足家畜生产的营养需求并挖掘优质饲草资源,本研究对不同新麦草种质叶片的氨基酸组成进行分析,综合评价其氨基酸营养品质,旨在为新麦草的饲料化开发与高效利用提供科学依据,并为后续的牧草品质遗传改良和动物饲养试验奠定基础。

1 材料与方法

1.1 试验材料

基于前期测定的273个新麦草株系的叶片粗蛋白(crude protein, CP)含量,通过聚类分析,挑选出高粗蛋白(high crude protein, H)和低粗蛋白(low crude protein, L)含量的新麦草种质株系各8个。均由美国国家植物种质库(National Plant Germplasm System, NPGS)提供,详见表1。

表1 新麦草种质材料及其来源

Table 1 Germplasm materials and their sources of *P. juncea*

H	品种 Variety	来源 Source	L	品种 Variety	来源 Source
502572-1	AR-142	苏联 Soviet Union	531828-1	野生 Wild	美国 America
502573-1	AR-163	苏联 Soviet Union	531828-7	野生 Wild	美国 America
502576-11	K37772	俄罗斯 Russia	531828-9	野生 Wild	美国 America
565060-7	AJC-534	俄罗斯 Russia	531828-17	野生 Wild	美国 America
565051-6	DJ-4154	俄罗斯 Russia	619483-7	96N331	蒙古 Mongolia
578854-8	SWIFT	加拿大 Canada	619483-19	96N331	蒙古 Mongolia
578854-12	SWIFT	加拿大 Canada	565052-20	DJ-4155	俄罗斯 Russia
578854-19	SWIFT	加拿大 Canada	565052-28	DJ-4155	俄罗斯 Russia

H: 高粗蛋白株系 High crude protein strain; L: 低粗蛋白株系 Low crude protein strain; 下同 The same below.

1.2 试验地点

试验材料种植于内蒙古包头市内蒙古农业大学职业技术学院科技园区,试验点地处北纬40°39',东经109°49',海拔1019 m,属山前冲积平原,地势平坦,光照充足,昼夜温差大,属典型大陆性半干旱季风气候,土壤肥力中等,全氮1.7 g·kg⁻¹,速效磷6.4 mg·kg⁻¹,速效钾205.6 mg·kg⁻¹,pH 7.6,有机质26.6 g·kg⁻¹,有正常的灌溉条件。

1.3 试验方法

于2024年5月16日抽穗期齐地面刈割取样,混合后将叶片放入烘箱中105℃杀青30 min,之后65℃持续烘干至恒重,烘干样品经球磨仪(格瑞德曼GT300,北京)粉碎并过0.15 mm筛,用于氨基酸含量测定。参照GB/T 18246—2019(茚三酮法)对样品中的17种氨基酸进行测定,使用赛里安Artemis 6000全自动氨基酸分析仪(荷兰)测定不同新麦草种质的氨基酸组分。另依据GB/T 15400—2018(分光光度法)对样品中的色氨酸含量进行单独测定。每个样品测定3个生物学重复。

1.4 营养价值评价

根据氨基酸的测定结果,计算氨基酸总量(total amino acid, T)、必需氨基酸(essential amino acid, EAA)、非必需氨基酸(non-essential amino acids, NEAA)、药效氨基酸(medicinal amino acids, MAA)及支链氨基酸(branched-chain amino acids, BCAA)含量。其次,根据味觉类型,计算鲜味氨基酸(umami amino acid, UAA)、甜味氨基酸(sweet amino acids, SAA)、苦味氨基酸(bitter amino acid, BAA)、芳香族氨基酸(aromatic amino acid, AAA)含量以及风味平衡指数 $(UAA+SAA)/BAA$ ^[13-14]。计算公式如下:

$EAA = \text{苏氨酸} + \text{缬氨酸} + \text{蛋氨酸} + \text{异亮氨酸} + \text{亮氨酸} + \text{苯丙氨酸} + \text{赖氨酸} + \text{色氨酸}$

$SAA = \text{苏氨酸} + \text{丝氨酸} + \text{甘氨酸} + \text{丙氨酸} + \text{赖氨酸} + \text{脯氨酸}$

$UAA = \text{天冬氨酸} + \text{谷氨酸}$

$BAA = \text{缬氨酸} + \text{蛋氨酸} + \text{异亮氨酸} + \text{亮氨酸} + \text{苯丙氨酸} + \text{组氨酸} + \text{精氨酸}$

$MAA = \text{天冬氨酸} + \text{谷氨酸} + \text{甘氨酸} + \text{蛋氨酸} + \text{异亮氨酸} + \text{亮氨酸} + \text{苯丙氨酸} + \text{赖氨酸} + \text{精氨酸} + \text{色氨酸}$

$AAA = \text{苯丙氨酸} + \text{酪氨酸} + \text{色氨酸}$

$BCAA = \text{亮氨酸} + \text{异亮氨酸} + \text{缬氨酸}$

利用FAO/WHO的必需氨基酸模式^[15],计算样品中必需氨基酸比值(ratio of essential amino acid, RAA)、氨基酸比值系数(ratio coefficient of amino acid, RC)、比值系数分(score of ratio coefficient, SRC)^[16]和必需氨基酸指数(essential amino acid index, EAAI)^[17]。

$RAA = \text{某必需氨基酸含量} / (\text{FAO/WHO中相应的氨基酸含量})$

$RC = \text{某必需氨基酸RAA} / \text{各种氨基酸RAA的平均值}$

$SRC = 100 - RSD \times 100$

$$EAAI = \sqrt[n]{\frac{a_1 \times a_2 \times a_3 \times \cdots \times a_n}{b_1 \times b_2 \times b_3 \times \cdots \times b_n}}$$

式中: RSD (relative standard deviation)为 RC 的相对标准差; n 为比较的氨基酸个数, $n \leq 8$; a_n 为试验中必需氨基酸的含量; b_n 为标准蛋白质(FAO/WHO评分模式)中与 a_n 相应的必需氨基酸含量。

1.5 数据统计分析

测定数据利用Microsoft Excel 2010进行整理并绘制表格,通过IBM SPSS Statistics 26的 t 检验比较两类新麦草种质不同氨基酸组分占比的差异显著性,使用Origin 64软件和ChiPlot(<https://www.chipplot.online/>)绘图。

2 结果与分析

2.1 新麦草种质叶片氨基酸组分分析

测定高CP和低CP新麦草种质共16个株系的粗蛋白及氨基酸含量(表2),结果表明,新麦草叶片所含氨基酸种类齐全,包含全部的8种必需氨基酸。其中高CP种质的CP含量平均为29.63%,氨基酸总量平均为25.24%,必需氨基酸含量平均为10.42%;低CP种质的CP含量平均为13.81%,氨基酸总量平均为13.29%,必需氨基酸含量平均为5.67%。新麦草共包含10种药效氨基酸, $(UAA+SAA)/BAA$ 两者平均值均接近1.5。对不同新麦草种质粗蛋白及氨基酸组分的统计分析发现,18种氨基酸含量变异程度各不相同,其中半胱氨酸(cysteine, Cys)的变异系数为1,在18种氨基酸中最高,组氨酸(histidine, His)的变异系数最低,为0.08。此外依据功能氨基酸含量分析,风味平衡指数的变异系数最低,为0.01,鲜味氨基酸变异系数最高,为0.34。

2.2 不同新麦草种质氨基酸组分含量的占比分析

两类新麦草种质中,18种氨基酸含量与其氨基酸总量占比的差异显著性分析见图1,高CP种质(H)和低CP种质(L)在氨基酸组成及占比上呈相似特征。其中,谷氨酸在两类新麦草中的占比最高,均超过了10%,半胱氨酸占比最低,为新麦草限制性氨基酸。两组材料间,谷氨酸、脯氨酸、半胱氨酸、苯丙氨酸、组氨酸、赖氨酸、精氨酸、色氨酸含量占比存在显著性差异($P < 0.05$),其中苯丙氨酸、组氨酸、赖氨酸、色氨酸在L中的占比显著高于H;谷氨酸、脯氨酸、半胱氨酸、精氨酸在L中的占比显著低于H,其余氨基酸含量占比无显著差异。

表2 新麦草种质氨基酸组分含量及粗蛋白含量

Table 2 The amino acid and crude protein content of different *P. juncea* germplasms

指标 Index	H (%)	L (%)	M (%)	SD (%)	CV	指标 Index	H (%)	L (%)	M (%)	SD (%)	CV
天冬氨酸 Asp#	2.78	1.41	2.09	0.69	0.33	赖氨酸 Lys*#	1.21	0.73	0.97	0.24	0.25
苏氨酸 Thr*	1.36	0.69	1.03	0.33	0.32	精氨酸 Arg#	1.70	0.76	1.23	0.47	0.38
丝氨酸 Ser	1.34	0.69	1.02	0.32	0.32	色氨酸 Trp*#	0.71	0.47	0.59	0.12	0.20
谷氨酸 Glu#	3.28	1.56	2.42	0.86	0.36	氨基酸总量 TAA	25.24	13.29	19.26	5.97	0.31
脯氨酸 Pro	0.79	0.36	0.58	0.22	0.37	必需氨基酸 EAA	10.42	5.67	8.05	2.38	0.30
甘氨酸 Gly#	1.59	0.86	1.23	0.36	0.30	非必需氨基酸 NEAA	14.81	7.62	11.22	3.60	0.32
丙氨酸 Ala	1.91	1.06	1.48	0.42	0.28	药效氨基酸 MAA	16.80	8.72	12.76	4.04	0.32
半胱氨酸 Cys	0.03	0.00	0.02	0.02	1.00	甜味氨基酸 SAA	8.19	4.40	6.30	1.90	0.30
缬氨酸 Val*	1.62	0.85	1.23	0.38	0.31	鲜味氨基酸 UAA	6.06	2.96	4.51	1.55	0.34
蛋氨酸 Met*#	0.30	0.15	0.23	0.08	0.33	苦味氨基酸 BAA	9.33	4.96	7.15	2.18	0.31
异亮氨酸 Ile*#	1.26	0.69	0.98	0.29	0.29	芳香族氨基酸 AAA	3.10	1.80	2.45	0.65	0.27
亮氨酸 Leu*#	2.48	1.26	1.87	0.61	0.33	支链氨基酸 BCAA	5.36	2.79	4.08	1.28	0.31
酪氨酸 Tyr	0.91	0.49	0.70	0.21	0.29	风味平衡(UAA+SAA)/BAA	1.53	1.49	1.51	0.02	0.01
苯丙氨酸 Phe*#	1.49	0.84	1.16	0.33	0.28	粗蛋白 Crude protein	29.63	13.81	21.72	7.91	0.36
组氨酸 His	0.49	0.42	0.45	0.03	0.08						

M: 均值 Mean; SD: 标准差 Standard deviation; CV: 变异系数 Coefficient of variation; *: 必需氨基酸 Essential amino acids; #: 药效氨基酸 Medicinal amino acids; 下同 The same below.

2.3 不同新麦草种质功能类氨基酸含量的占比分析

分析两类种质中各种功能类氨基酸含量占其氨基酸总量的比例(图2),高CP种质的E/T、N/T、M/T、S/T、U/T、B/T、A/T、BCAA/T的平均值分别为41.29%、58.71%、66.56%、32.48%、24.03%、36.97%、12.29%、21.23%。低CP种质的E/T、N/T、M/T、S/T、U/T、B/T、A/T、BCAA/T的平均值分别为42.67%、57.33%、65.62%、33.10%、22.32%、37.32%、13.55%、21.03%。其中U/T值两组之间存在显著差异($P<0.05$),其余指标两组间差异不显著。

2.4 不同新麦草种质必需氨基酸与FAO/WHO氨基酸模式谱比较

将高CP和低CP种质的必需氨基酸含量与FAO/WHO氨基酸模式谱进行对比(表3)。两类种质中大部分必需氨基酸含量均接近或超过模式谱标准,赖氨酸和蛋氨酸+半胱氨酸含量普遍低于模式谱标准值。分析其与模式谱标准的差值,表明蛋氨酸+半胱氨酸为新麦草的第一限制性氨基酸,另一限制性氨基酸为赖氨酸。其中仅有低CP组中的531828-17样本的赖氨酸含量高于模式谱标准,其余样本的赖氨酸含量均低于标准。

2.5 不同新麦草种质与理想蛋白质标准的比较

将高CP与低CP种质的必需氨基酸与总氨基酸比例(E/T)、必需与非必需氨基酸比例(E/N)与FAO/WHO理想蛋白质标准进行对比。高CP种质的E/T值为40.55%~42.04%(表4),E/N值为68.21%~72.52%,均高

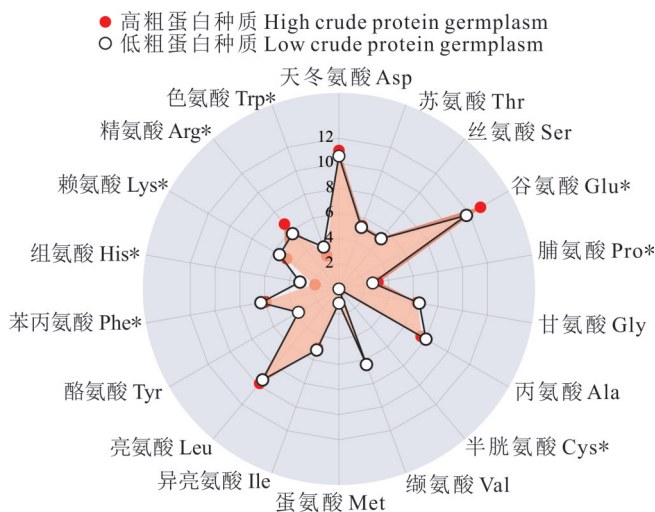


图1 不同新麦草种质18种氨基酸占比雷达图

Fig. 1 Radar chart of 18 kinds of amino acids in different *P. juncea* germplasms*: $P<0.05$.

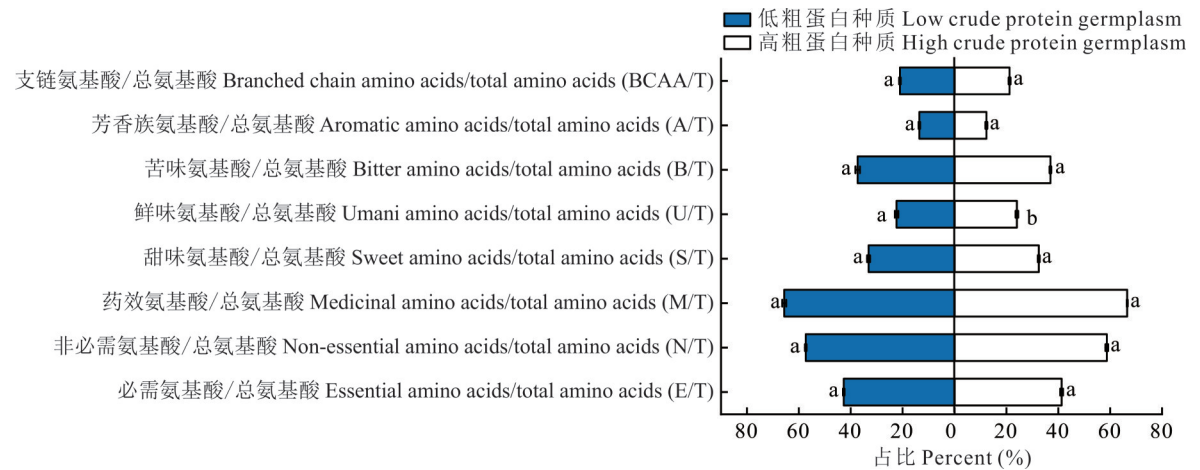


图2 不同新麦草种质功能氨基酸的占比

Fig. 2 The functional amino acid proportion of different *P. juncea* germplasms

不同小写字母表示不同种质间同一指标占比存在显著差异 ($P<0.05$) Different lowercase letters indicate significant differences in the proportion of the same index among different germplasms ($P<0.05$).

表3 不同新麦草种质各种必需氨基酸与联合国粮食及农业组织与世界卫生组织推荐氨基酸的模式谱比较

Table 3 Comparison of the pattern spectra of essential amino acids in different *P. juncea* germplasms with the amino acids recommended by the Food and Agriculture Organization and the World Health Organization

类型	株系	异亮氨酸	亮氨酸	赖氨酸	蛋氨酸+半胱氨酸	苯丙氨酸+酪氨酸	苏氨酸	缬氨酸	色氨酸
Item	Strain	Ile (4.0)	Leu (7.0)	Lys (5.5)	Met+Cys (3.5)	Phe+Tyr (6.0)	Thr (4.0)	Val (5.0)	Trp (1.0)
H	502572-1	+0.25	+0.84	-1.58	-2.52	+1.35	+0.25	-0.10	+1.32
	502573-1	-0.03	+0.94	-1.53	-2.67	+1.44	+0.30	+0.29	+0.93
	502576-11	-0.07	+0.56	-1.88	-2.35	+1.40	+0.27	-0.07	+1.45
	565060-7	+0.38	+1.59	-1.63	-2.66	+2.25	+0.55	+0.73	+1.11
	565051-6	+0.45	+1.72	-1.23	-2.65	+2.38	+0.79	+0.81	+1.65
	578854-8	+0.62	+2.25	-0.88	-1.45	+3.25	+1.14	+1.16	+2.20
	578854-12	+0.06	+1.11	-1.44	-2.25	+3.11	+0.52	+0.30	+1.17
	578854-19	-0.05	+0.91	-1.55	-2.64	+1.56	+0.30	-0.02	+1.11
L	619483-7	+0.85	+1.96	-0.65	-2.38	+2.59	+0.85	+0.60	+2.32
	531828-17	+0.72	+1.71	+1.03	-2.41	+3.43	+1.08	+1.17	+2.34
	565052-20	+0.90	+1.67	-0.60	-2.75	+3.04	+0.90	+1.03	+2.54
	565052-28	+0.99	+2.27	-0.15	-2.07	+3.98	+0.99	+1.41	+2.74
	531828-1	+1.17	+2.30	-0.33	-2.47	+4.34	+1.17	+1.55	+2.38
	619483-19	+0.94	+2.17	-0.56	-2.44	+3.88	+0.94	+1.35	+2.28
	531828-7	+1.20	+2.37	-0.30	-2.11	+4.41	+1.20	+1.25	+2.44
	531828-9	+1.04	+2.31	-0.46	-2.72	+3.31	+1.04	+0.82	+2.26

+, - 表示测定值与联合国粮食及农业组织与世界卫生组织标准值(括号内数值)之间的增减情况,下同。+ 和 - represents the increase or decrease between the measured value and the Food and Agriculture Organization and World Health Organization standard value (value in bracket), and the same below.

于理想蛋白质标准。其中样本 578854-8 的 E/T(42.04%)和 E/N(72.52%)为同类新麦草中最高。低 CP 种质的 E/T 值为 42.20%~43.22%,E/N 值为 73.01%~76.11%,同样均高于理想蛋白质标准。其中样本 565052-28 的 E/T(43.22%)值和 E/N(76.11%)值为低 CP 新麦草中最高。高 CP 种质的 E/T 和 E/N 平均值(41.26%、70.25%)相较于低 CP 种质的 E/T 和 E/N 平均值(42.67%、74.44%)更低,但更接近理想蛋白质标准。

2.6 不同新麦草种质必需氨基酸比值系数分析

为深入了解新麦草的氨基酸营养价值,采用FAO/WHO提出的必需氨基酸模式评价体系—氨基酸比值系数法进行进一步综合评价。该评价体系以FAO/WHO必需氨基酸模式为基准,通过测算样本中必需氨基酸比值(RAA)、氨基酸比值系数(RC)及比值系数分(SRC),实现对其营养价值的评价。其中SRC作为核心评价指标,其数值越接近100,表明植物蛋白质的营养价值越高。高CP种质的SRC值为47.17~57.37(表5),样本502573-1的SRC值最高,为57.37。低CP种质的SRC值为35.31~43.47,且普遍低于高CP种质。

2.7 不同新麦草种质的必需氨基酸指数

饲草的必需氨基酸指数(EAAI)值越接近1,表明饲草蛋白质中必需氨基酸组成与标准蛋白质的匹配度越佳,其营养价值水平也相应越高,这类饲草为优质蛋白饲草。高CP种质的EAAI值为0.92~1.25(表6),平均为1.01,其中样本578854-12(1.01)是高CP种质中最接近1的样本,其必需氨基酸组成与标准蛋白质的匹配度最佳。低CP种质的EAAI值为1.11~1.26,平均为1.19,与标准蛋白质匹配度稍低。

3 讨论

3.1 新麦草氨基酸组成的营养优势与限制性分析

本研究对不同CP含量新麦草的18种氨基酸进行测定,结果中均检测出17种氨基酸,其中半胱氨酸(cysteine, Cys)含量低或未检测出, Balde等^[18]研究测定了16种紫花苜蓿(*Medicago sativa*)的氨基酸,发现均不含有Cys,本研究测定的新麦草的Cys含量较少,对总氨基酸含量影响不大。高CP种质的总氨基酸含量、必需氨基酸总量、非必需氨基酸总量等指标高于低CP种质,表明高CP种质在营养供给方面优势显著,能更好满足家畜生长需求。其中高CP种质的总氨基酸含量平均为25.24%,接近或略高于紫花苜蓿全株总氨基酸含量^[19],说明新麦草叶片氨基酸含量较高。关于药效功能的氨基酸,新麦草中检测出10种,种类丰富,含量均在65%以上,且高于冬虫夏草(*Cordyceps sinensis*)^[20]和红枣(*Ziziphus jujuba*)^[21],说明新麦草可能具有一定的药用价值。药效氨基酸的含量在维持动物生理机能、促进新陈代谢等方面作用关键,对动物健康意义非凡。在风味氨基酸上,高CP种质和低CP种质的(UAA+SAA)/BAA指标均接近1.5,略低于紫花苜蓿^[14]。严冬等^[20]在冬虫夏草的研究中,评价了天冬氨酸(aspartic, Asp)、谷氨酸(glutamic, Glu)、甘氨酸(glycine, Gly)和丙氨酸(alanine, Ala)等4种鲜味氨基酸的含量,冬虫夏草的此4种鲜味氨基酸含量在35%以上,决定了冬虫夏草味道鲜美,而新麦草叶片的这4种鲜味氨基酸的总含量均在37%以上,接近紫花苜蓿^[22],说明在氨基酸风味方面新麦草的适口性较好。风味氨基酸不仅影响牧草口感,还可能通过影响家畜采食偏好,间接影响其营养价值的发挥。

各类食品及饲料的蛋白质营养品质各异,其价值高低核心取决于必需氨基酸的构成模式,即种类是否齐全、含量是否达标以及相互间的比例是否平衡^[23]。本研究测定发现新麦草叶片含有全部的8种必需氨基酸,种类齐全。两组新麦草种质的必需氨基酸总量平均值为8.05%,高于杂交狼尾草(*Pennisetum × typhoideum*)(6.71%)、多花黑麦草(*Lolium multiflorum*)(4.91%)等牧草的叶片必需氨基酸总量,略低于紫花苜蓿(8.26%)的叶片必需氨基酸总量^[24]。功能性氨基酸调控生物体内的代谢平衡,各种氨基酸相互关联;当某种氨基酸缺乏时,会导致其他氨基酸营养失衡^[25-26]。与FAO/WHO氨基酸模式谱对比,新麦草叶片存在明显的限制性氨基酸,主要为蛋氨酸+半胱氨酸(methionine+cysteine, Met+Cys),新麦草的第一限制性氨基酸与紫花苜蓿^[24]相同,这一发现为以

表4 必需氨基酸比例与理想蛋白质标准比较

Table 4 The proportion of essential amino acids and the ideal protein standards comparison

H	E/T (40)	E/N (60)	L	E/T (40)	E/N (60)
502572-1	+1.50	+10.95	619483-7	+3.01	+15.47
502573-1	+0.91	+9.23	531828-17	+2.90	+15.13
502576-11	+1.29	+10.32	565052-20	+2.20	+13.01
565060-7	+1.12	+9.83	565052-28	+3.22	+16.11
565051-6	+1.97	+12.32	531828-1	+2.52	+13.98
578854-8	+2.04	+12.52	619483-19	+2.55	+14.08
578854-12	+0.70	+8.62	531828-7	+2.49	+13.88
578854-19	+0.55	+8.21	531828-9	+2.48	+13.86
平均 Mean	+1.26	+10.25	平均 Mean	+2.67	+14.44

E/T: 必需氨基酸与总氨基酸比例 Essential and total amino acid ratio; E/N: 必需与非必需氨基酸比例 Essential and non-essential amino acid ratio.

表 5 不同新麦草种质各种必需氨基酸的必需氨基酸比值、氨基酸比值系数及比值系数分比较
Table 5 Comparison of ratio of essential amino acid, ratio coefficient of amino acid and score of ratio coefficient in different *P. juncea* germplasms

类型 Type	株系 Strain	指标 Item	Ile	Leu	Lys	Met+Cys	Phe+Tyr	Thr	Val	Trp	SRC
H	502572-1	RAA	1.06	1.12	0.71	0.28	1.22	1.06	0.98	2.32	50.59
		RC	0.97	1.02	0.65	0.26	1.12	0.97	0.89	2.12	
	502573-1	RAA	0.99	1.13	0.72	0.24	1.24	1.07	1.06	1.93	57.37
		RC	0.95	1.08	0.69	0.23	1.18	1.02	1.01	1.84	
	502576-11	RAA	0.99	1.08	0.66	0.33	1.23	1.07	0.99	2.45	47.56
		RC	0.90	0.98	0.60	0.30	1.12	0.97	0.90	2.23	
	565060-7	RAA	1.09	1.23	0.70	0.24	1.38	1.14	1.15	2.11	55.76
		RC	0.97	1.09	0.62	0.21	1.22	1.01	1.01	1.87	
	565051-6	RAA	1.11	1.25	0.78	0.24	1.40	1.20	1.16	2.65	47.96
		RC	0.91	1.02	0.64	0.20	1.14	0.98	0.95	2.17	
	578854-8	RAA	1.16	1.32	0.84	0.59	1.54	1.28	1.23	3.20	47.17
		RC	0.83	0.95	0.60	0.42	1.10	0.92	0.88	2.29	
	578854-12	RAA	1.01	1.16	0.74	0.36	1.35	1.13	1.06	2.17	56.60
		RC	0.90	1.03	0.66	0.32	1.20	1.01	0.95	1.93	
	578854-19	RAA	0.99	1.13	0.72	0.25	1.26	1.07	1.00	2.11	53.74
		RC	0.93	1.06	0.67	0.23	1.18	1.01	0.94	1.98	
L	619483-7	RAA	1.21	1.28	0.88	0.32	1.43	1.21	1.12	3.32	39.77
		RC	0.90	0.95	0.65	0.24	1.06	0.90	0.83	2.47	
	531828-17	RAA	1.18	1.24	1.19	0.31	1.57	1.27	1.23	3.34	43.47
		RC	0.83	0.88	0.84	0.22	1.11	0.90	0.87	2.36	
	565052-20	RAA	1.22	1.24	0.89	0.22	1.51	1.22	1.21	3.54	35.31
		RC	0.89	0.90	0.64	0.16	1.09	0.89	0.87	2.56	
	565052-28	RAA	1.25	1.32	0.97	0.41	1.66	1.25	1.28	3.74	38.26
		RC	0.84	0.89	0.65	0.27	1.12	0.84	0.86	2.52	
	531828-1	RAA	1.29	1.33	0.94	0.30	1.72	1.29	1.31	3.38	42.79
		RC	0.89	0.92	0.65	0.20	1.19	0.89	0.91	2.34	
	619483-19	RAA	1.24	1.31	0.90	0.30	1.65	1.24	1.27	3.28	42.66
		RC	0.88	0.94	0.64	0.22	1.18	0.88	0.91	2.35	
	531828-7	RAA	1.30	1.34	0.95	0.40	1.73	1.30	1.25	3.44	43.42
		RC	0.89	0.91	0.65	0.27	1.19	0.89	0.85	2.35	
	531828-9	RAA	1.26	1.33	0.92	0.22	1.55	1.26	1.16	3.26	41.22
		RC	0.92	0.97	0.67	0.16	1.13	0.92	0.85	2.38	

RAA: 必需氨基酸比值 Ratio of essential amino acid; RC: 氨基酸比值系数 Ratio coefficient of amino acid; SRC: 比值系数分 Score of ratio coefficient.

新麦草为基础日粮的精准营养补充提供了直接依据。在动物生产中,知晓限制性氨基酸种类是进行日粮优化配制的^[27]第一步。例如,在反刍动物日粮中,新麦草可与 Met+Cys 过瘤胃保护氨基酸添加剂^[27]或富含这些氨基酸的饲料(如某些饼粕类)搭配使用;在水产或单胃动物日粮中,亦可作为部分蛋白源,并通过添加合成氨基酸来平衡其不足,从而显著提高整个日粮的蛋白质利用效率,降低氮排放,符合当前节粮环保的养殖需求^[28]。高 CP 种质赖氨酸(lysine, Lys)占比全部低于标准,高 CP 种质虽在总氨基酸含量上占优,但 Lys 短板限制了其蛋白质利用

率,低 CP 种质中样本 531828-17 的 Lys 达标,可以为培育限制性氨基酸均衡型品种提供种质基础。以新麦草为主要饲料饲喂时,需额外关注这些氨基酸的补充,可通过合理搭配其他饲料或补充氨基酸添加剂解决,以保障家畜获得全面营养。

3.2 不同新麦草种质的营养差异及其育种价值

从必需氨基酸比例(E/T、E/N)来看,高 CP 和低 CP 种质的 E/T 和 E/N 平均值均高于理想标准,且高于紫花苜蓿^[14],说明新麦草氨基酸组成较均衡合理。这种均衡的氨基酸模式对于减少日粮配方的氨基酸浪费、提高蛋白质沉积效率至关重要^[29]。运用氨基酸比值系数法评价,高 CP 种质 SRC 值多在 50 以上,低 CP 种质波动较大,部分样本低于 40。

这反映出不同新麦草种质间氨基酸营养价值存在较大变异,高 CP 种质整体表现更优异。EAAI 值方面,高 CP (1.01)与低 CP 种质(1.19)的均值均接近 1,根据相关 EAAI 值实用评价标准:EAAI>0.95 为优质蛋白源,0.86<EAAI<0.95 为良好蛋白源,0.75<EAAI<0.86 为可用蛋白源,EAAI<0.75 为不适用蛋白源,所以可以判断新麦草饲草属于优质蛋白源^[30]。综合来看高蛋白新麦草种质更接近标准蛋白质,意味着其蛋白质质量更高,在饲料应用中更具优势。

新麦草不同种质间叶片的粗蛋白含量及氨基酸组成存在明显变异,除 His 和(UAA+SAA)/BAA 外,其余指标变异系数均高于 0.20,说明新麦草在氨基酸营养方面具有较高的改良潜力。高 CP 种质的总氨基酸含量、必需氨基酸总量等均高于低 CP 种质,其中样本 578854-8 的总氨基酸含量和必需氨基酸含量较优。这些指标的差异与新麦草属植物丰富的遗传多样性密切相关,张晨等^[31]通过 SSR 标记分析发现,新麦草核心种质的遗传相似系数为 0.52~0.89,表明不同株系在氨基酸合成相关基因的表达上存在显著分化。从氨基酸组成的均衡性来看,高 CP 种质的必需氨基酸比值系数分(SRC)多在 50 以上,高于低 CP 种质。值得注意的是,新麦草 SRC 普遍偏低的原因是其色氨酸(tryptophan, Trp)含量普遍高于 FAO/WHO 理想标准,现阶段有关饲草氨基酸组分研究中测定 Trp 含量的相对较少,如不考虑 FAO/WHO 理想模式中的 Trp 一项,新麦草的 SRC 分数接近紫花苜蓿^[14]。种质间的风味氨基酸差异也为新麦草适口性改良提供了依据,高 CP 种质的鲜味氨基酸含量占比(平均 24.03%)较低 CP 种质(平均 22.32%)高了 1.71%,推测其在放牧或加工为青贮饲料时更易被家畜接受。新麦草叶片中 Trp 含量高,占新麦草氨基酸总量的 3.06%,Trp 作为 5-羟色胺前体^[32],可调节动物食欲和睡眠周期,间接促进成长。此外,高 CP 新麦草中部分种质含有一定量的 Cys,该氨基酸是合成角蛋白和牛磺酸^[33]的重要原料,能促进动物的皮毛发育^[34],相较于许多牧草中缺乏 Cys 具有一定的营养优势。

4 结论

两类新麦草种质的氨基酸总量与必需氨基酸含量均存在显著差异,叶片中鉴定出 10 种药效氨基酸,总含量超过 65%,表明其具备良好的药用开发潜力。两类种质的必需氨基酸含量大都接近或超过 FAO/WHO 模式标准,但 Lys 与 Met+Cys 含量较低,为新麦草的主要限制性氨基酸。E/T 与 E/N 值均高于 FAO/WHO 推荐标准,且高 CP 种质在 SRC 值与 EAAI 指数上整体优于低 CP 种质,反映其蛋白质营养价值与利用率更高。特别地,高 CP 种质“578854-8”与低 CP 种质“531828-17”表现突出,氨基酸含量丰富、比例均衡,可作为新麦草品质遗传改良与专用品种培育的核心材料。综上,新麦草叶片氨基酸种类齐全、配比合理、营养价值高,是一种值得深度开发的优质蛋白饲草资源,研究结果为其在动物日粮中的科学利用及遗传育种提供了理论依据。

表 6 不同新麦草种质必需氨基酸指数比较

Table 6 Comparison of essential amino acid index of different *P. juncea* germplasms

H	EAAI	L	EAAI
502572-1	0.95	619483-7	1.14
502573-1	0.92	531828-17	1.21
502576-11	0.97	565052-20	1.11
565060-7	0.97	565052-28	1.26
565051-6	1.05	531828-1	1.21
578854-8	1.25	619483-19	1.18
578854-12	1.01	531828-7	1.26
578854-19	0.94	531828-9	1.12

EAAI: 必需氨基酸指数 Essential amino acid index.

参考文献 References:

- [1] Yang X H, Chen M J, Wu X R. Essential amino acids of several leguminous forages. *Aminoacid Journal*, 1993(4): 11—12.
杨晓贺, 陈默君, 吴显荣. 几种豆科牧草的必需氨基酸. *氨基酸杂志*, 1993(4): 11—12.
- [2] Qiu Y L. Amino acids are essential nutrients for animals such as livestock and poultry. *Cereal & Feed Industry*, 1990(5): 29.
裘永良. 氨基酸是畜禽等动物必需的营养物质. *粮食与饲料工业*, 1990(5): 29.
- [3] Chen X, Liang K H, Zhu H, *et al.* Analysis method and application of free amino acids. *Journal of Food Safety & Quality*, 2021, 12(18): 7298—7304.
陈雪, 梁克红, 朱宏, 等. 游离氨基酸检测方法及其应用. *食品安全质量检测学报*, 2021, 12(18): 7298—7304.
- [4] Penkov D, Pavlov D, Mihovsky T. Comparative study of the amino acid's true digestibility of different clover (*Trifolium*) varieties in experiments with ganders. *Journal of Central European Agriculture*, 2003, 4(2): 191—198.
- [5] Liu Y H, Chen J L, Zhang H R, *et al.* Study on the characteristics of amino acid composition and nutritional value of forage grass in Alashan desert grassland. *Acta Prataculturae Sinica*, 2008, 17(6): 25—33.
刘永红, 陈菊兰, 张洪荣, 等. 阿拉善荒漠草地牧草氨基酸组成特点与营养价值研究. *草业学报*, 2008, 17(6): 25—33.
- [6] Naya, Wang Z L, Sun Q Z, *et al.* A study on amino acid characteristics and nutritive value of forages in the desert grasslands of Alxa. *Chinese Journal of Grassland*, 2014, 36(3): 84—89.
那亚, 王宗礼, 孙启忠, 等. 草甸草原牧草青贮料氨基酸组成特点与营养价值研究. *中国草地学报*, 2014, 36(3): 84—89.
- [7] Mayland H F, Martin S A, Lee J, *et al.* Malate, citrate, and amino acids in tall fescue cultivars. *Agronomy Journal*, 2000, 92(2): 206—210.
- [8] Tian H, Zhang H S, Xiong J B, *et al.* Evaluation of amino acid composition and nutritional value of *Lespedeza formosa* in different phenological periods. *Chinese Journal of Grassland*, 2022, 44(6): 98—105.
田宏, 张鹤山, 熊军波, 等. 不同物候期美丽胡枝子氨基酸组成和营养价值评价. *中国草地学报*, 2022, 44(6): 98—105.
- [9] Huo L, Chen P, Peng S, *et al.* Analysis of protein and amino acid contents in different parts of *Ixeris chinensis*. *Science and Technology of Food Industry*, 2013, 34(19): 341—343, 348.
霍莉, 陈萍, 彭松, 等. 苦菜不同部位蛋白质和氨基酸含量分析. *食品工业科技*, 2013, 34(19): 341—343, 348.
- [10] Gao Z Q, Yun L, He R X, *et al.* Evaluation of reproductive traits of *Psathyrostachys juncea* hybrid population. *Grassland and Prataculture*, 2022, 34(3): 33—37.
高志琦, 云岚, 何茹雪, 等. 新麦草杂交后代群体繁殖性状评价. *草原与草业*, 2022, 34(3): 33—37.
- [11] Li Z, Yun L, Wang T, *et al.* Comprehensive evaluation of fertility yield and stability of *Psathyrostachys juncea* germplasm in different environments. *Journal of Northwest A & F University(Natural Science Edition)*, 2025, 53(2): 19—31.
李珍, 云岚, 王恬, 等. 不同环境下新麦草种质丰产性及稳产性的综合评价. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2025, 53(2): 19—31.
- [12] Yu X D, Zhang Y W. Research progress of *Psathyrostachys juncea*. *Prataculture & Animal Husbandry*, 2010(1): 5—8, 13.
于晓丹, 张蕴薇. 新麦草研究进展. *草业与畜牧*, 2010(1): 5—8, 13.
- [13] Zhen M Y, Zi Y Y. Understanding different regulatory mechanisms of proteinaceous and non-proteinaceous amino acid formation in tea (*Camellia sinensis*) provides new insights into the safe and effective alteration of tea flavor and function. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2020, 60(5): 844—858.
- [14] Sun J J, Alamusi, Zhao J M, *et al.* Analysis of amino acid composition and six native alfalfa cultivars. *Scientia Agricultura Sinica*, 2019, 52(13): 2359—2367.
孙娟娟, 阿拉木斯, 赵金梅, 等. 6个紫花苜蓿品种氨基酸组成分析及营养价值评价. *中国农业科学*, 2019, 52(13): 2359—2367.
- [15] FAO/WHO (1973) Energy and Protein Requirements. Report of a Joint FAO/WHO Adhoc Expert Committee. FAO Nutritional Meeting Report Series No. 52, Technical Report Series No. 522 Food and Agriculture Organization of the United Nation, Rome.
- [16] Zhu S T, Wu K. Nutritional evaluation of protein—ratio coefficient of amino acid. *Acta Nutrimenta Sinica*, 1998(2): 187—190.
朱圣陶, 吴坤. 蛋白质营养价值评价——氨基酸比值系数法. *营养学报*, 1998(2): 187—190.
- [17] Oser B L. Method for integrating essential amino acid content in the nutritional evaluation of protein. *Journal of the American Dietetic Association*, 1951, 27(5): 396—402.
- [18] Balde A T, Vandersall J H, Erdman R A, *et al.* Effect of stage of maturity of alfalfa and orchardgrass on *in situ* dry matter and

- crude protein degradability and amino acid composition. *Animal Feed Science and Technology*, 1993, 44(1/2): 29—43.
- [19] Li Z Z, Ma Q Z. Studies on the characteristics of amino acid content in alfalfa varieties. *Journal of Inner Mongolia Agricultural University*, 1996(3): 110—112.
李造哲, 马青枝. 紫花苜蓿品种氨基酸含量的特征性研究. *内蒙古农牧学院学报*, 1996(3): 110—112.
- [20] Yan D, Yang X Y. Analysis of amino acid composition and evaluation of nutritional quality in *Cordyceps sinensis* from different regions of Tibet. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2014, 30(3): 281—284.
严冬, 杨鑫岬. 西藏不同产地冬虫夏草中氨基酸成分分析及其营养价值评价. *中国农学通报*, 2014, 30(3): 281—284.
- [21] Tian Y H, Zhang L W, Tian Y, *et al.* Amino acid composition and principal component analysis of 11 kinds of jujube. *Molecular Plant Breeding*, 2018, 16(4): 1300—1306.
田艳花, 张立伟, 田叶, 等. 11种红枣氨基酸组成及主成分分析. *分子植物育种*, 2018, 16(4): 1300—1306.
- [22] Hao B H, Hao J F, Jia Y S, *et al.* Effect of amino acids on quality evaluation of alfalfa hay. *Feed Research*, 2022, 45(2): 97—101.
郝百贺, 郝俊峰, 贾玉山, 等. 氨基酸在紫花苜蓿干草品质评定中的作用. *饲料研究*, 2022, 45(2): 97—101.
- [23] Chen R, Wu Q N, Shen B. Amino acid composition and nutritional evaluation of *Semen euryales* from different regions. *Food Science*, 2011, 32(15): 239—244.
陈蓉, 吴启南, 沈蓓. 不同产地芡实氨基酸组成分析与营养价值评价. *食品科学*, 2011, 32(15): 239—244.
- [24] Liu Y, Wu X F, Chen X Z, *et al.* Nutrition value of leaves of forage grasses as feedstuffs. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2018, 34(17): 135—139.
刘远, 吴贤锋, 陈鑫珠, 等. 牧草叶作为饲料原料的营养价值分析. *中国农学通报*, 2018, 34(17): 135—139.
- [25] Wu G. Dietary requirements of synthesizable amino acids by animals: a paradigm shift in protein nutrition. *Journal of Animal Science and Biotechnology*, 2015, 6(1): 1—12.
- [26] Adeola O, Xue P C, Cowieson A J, *et al.* Basal endogenous losses of amino acids in protein nutrition research for swine and poultry. *Animal Feed Science and Technology*, 2016, 221(Part B): 274—283.
- [27] Peng H M, Zhang J Q, Zhang P, *et al.* Effects of rumen amino acids on growth performance, serum indexes, and rumen fermentation parameters of Hu sheep. *Feed Research*, 2024, 47(22): 1—6.
彭洪妹, 张建强, 张鹏, 等. 饲料中添加瘤胃氨基酸对湖羊生长性能、血清指标和瘤胃发酵参数的影响. *饲料研究*, 2024, 47(22): 1—6.
- [28] Adeola O, Cowieson A J. Board-invited review: Opportunities and challenges in using exogenous enzymes to improve nonruminant animal production. *Journal of Animal Science*, 2011, 89(10): 3189—3218.
- [29] Hou L L, Qiu H L, Dong J H, *et al.* *Lactiplantibacillus plantarum* ameliorated the negative effects of a low-protein diet on growth performance, antioxidant capacity, immune status, and gut microbiota of laying chicks. *Frontiers in Microbiology*, 2025, 16: 1507752.
- [30] Chen Q L, Li Z H, Chen S Q. Analysis of amino acid composition and nutritional evaluation in five local edible fungus. *Food & Machinery*, 2014, 30(6): 43—46.
陈巧玲, 李忠海, 陈素琼. 5种地产食用菌氨基酸组成比较及营养评价. *食品与机械*, 2014, 30(6): 43—46.
- [31] Zhang C, Yun L, Li Z, *et al.* Genetic diversity and structure analysis in *Psathyrostachys* population using SSR markers. *Journal of Plant Genetic Resources*, 2019, 20(1): 48—59.
张晨, 云岚, 李珍, 等. 新麦草种质的SSR遗传多样性及群体结构分析. *植物遗传资源学报*, 2019, 20(1): 48—59.
- [32] Jiang X H, Wang X B, Li H, *et al.* Effects of dietary tryptophan and methionine on growth performance, digestive ability, immune function and antioxidant capacity of Chinese mitten Crab (*Eriocheir sinensis*). *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2025, 37(3): 1929—1939.
蒋湘辉, 王兴兵, 李赫, 等. 饲料中添加色氨酸和蛋氨酸对中华绒螯蟹生长性能、消化能力、免疫功能及抗氧化能力的影响. *动物营养学报*, 2025, 37(3): 1929—1939.
- [33] Hu L G, Hu J J, Wei Y M, *et al.* The physiological functions and applications of taurine. *Feed Industry*, 2024, 45(18): 49—54.
胡立国, 胡俊杰, 魏玉明, 等. 牛磺酸的生理功能及其应用. *饲料工业*, 2024, 45(18): 49—54.
- [34] Kang J. Effects of cysteine and methionine on the growth and development of secondary hair follicle and hair dermal papilla cell and related gene expression in cashmere goat. *Baoding: Hebei Agricultural University*, 2024.
康佳. 半胱氨酸、蛋氨酸对绒山羊次级毛囊和毛乳头细胞生长发育及相关基因表达的影响. 保定: 河北农业大学, 2024.