DOI: 10. 11686/cyxb2025427 http://cyxb. magtech. com. cn
黄小云, 梁政翔, 吴志锋, 等. 象草氮磷钾化学计量特征及主要饲用品质对沼液添加的响应. 草业学报, 2026, 35(10): 167－179.
HUANG Xiao-yun, LIANG Zheng-xiang, WU Zhi-feng, *et al*. Effects of biogas slurry addition on nitrogen, phosphorus, and potassium stoichiometry and feed quality of *Pennisetum purpureum*. Acta Prataculturae Sinica, 2026, 35(10): 167－179.

象草氮磷钾化学计量特征及主要饲用品质对沼液添加的响应

黄小云[1],梁政翔[1],吴志锋[2],周柳婷[1],陈长福[3],林嘉丽[1],罗涛[1],黄秀声[1*]
(1. 福建省农业科学院资源环境与土壤肥料研究所,福建省丘陵地区循环农业工程技术研究中心,福建 福州 350013;2. 龙岩市土壤肥料技术站,福建 龙岩 364000;3. 龙岩市动物疫病预防控制中心,福建 龙岩 364000)

摘要:为研究象草养分及饲用品质对沼液添加的响应机制,以'桂闽引'象草为研究对象开展田间小区试验,设5个沼液氮添加水平(0、50、100、150和200 kg N·hm^{-2}·次$^{-1}$),依次记为CK、N_{50}、N_{100}、N_{150}和N_{200},在45 d的刈割周期内施用3次。象草刈割两茬,测定植株茎、叶的氮(N)、磷(P)、钾(K)、粗蛋白(CP)、中性洗涤纤维(NDF)和酸性洗涤纤维(ADF)含量,分析沼液添加对象草CP和相对饲喂价值(RFV)与N、P、K含量及其化学计量特征的影响。结果表明:沼液添加显著提高了象草茎秆的CP和N含量($P<0.05$),且不同茬次、不同器官的响应有显著差异($P<0.001$)。N_{50}处理可显著降低第2茬叶片的ADF含量($P<0.05$),且不同器官间有显著差异($P<0.001$)。第2茬叶片RFV在N_{100}处理下最高,显著高于N_{200}($P<0.05$)。对于CP和RFV,两者显著正相关,其在茎秆中与N、K、N/P和K/P显著正相关,在叶片中与N、P显著正相关,在茎、叶中与NDF和ADF显著负相关($P<0.05$)。逐步回归分析和结构方程模型表明,茎、叶的N含量可显著正向影响CP含量($P<0.001$),其总效应值分别为0.92和0.32。茎秆P含量、叶片K/P和P含量共同影响RFV,其总效应值分别为－0.86、0.59和0.57。综上,沼液施用主要通过影响象草茎、叶的N、P含量和叶片的K/P,从而直接或间接调控其主要饲用品质。

关键词:象草;沼液;氮磷钾;化学计量比;饲用品质

Effects of biogas slurry addition on nitrogen, phosphorus, and potassium stoichiometry and feed quality of *Pennisetum purpureum*

HUANG Xiao-yun[1], LIANG Zheng-xiang[1], WU Zhi-feng[2], ZHOU Liu-ting[1], CHEN Chang-fu[3], LIN Jia-li[1], LUO Tao[1], HUANG Xiu-sheng[1*]
1. *Fujian Engineering and Technology Research Center for Recycling Agriculture in Hilly Areas, Institute of Resources, Environment and Soil Fertilizer, Fujian Academy of Agricultural Sciences, Fuzhou* 350013, *China*; 2. *Longyan Soil and Fertilizer Station, Longyan* 364000, *China*; 3. *Center for Animal Disease Control and Prevention, Longyan City, Longyan* 364000, *China*

Abstract: In this study, we investigated the effects of adding biogas slurry on the nutrient and feed quality of *Pennisetum purpureum*. Biogas slurry was applied to *P. purpureum* at five different rates (0, 50, 100, 150 and 200 kg N·ha^{-1} per application, denoted as CK, N_{50}, N_{100}, N_{150} and N_{200}, respectively) three times during a 45-day cutting cycle. The contents of nitrogen (N), phosphorus (P), potassium (K), crude protein (CP), neutral detergent fiber

收稿日期:2025-10-18;改回日期:2025-11-20
基金项目:福建省科技计划项目(2022R1021002,2024R1024001,2025R1067,2025R1023002和2026R1070),福建省人民政府-中国农业科学院"5511"协同创新工程(XTCXGC2021010和XTCXJSGG202603)和龙岩市科技计划项目(2020LYF9020)资助。
作者简介:黄小云(1989－),女,福建泉州人,助理研究员,硕士。E-mail: 954945394@qq. com
*通信作者 Corresponding author. E-mail: hxs706@163. com

(NDF), and acid detergent fiber (ADF) in stems and leaves were measured, and the effects of biogas slurry addition on CP, relative feeding value (RFV), and the N, P and K stoichiometry of *P. purpureum* were analyzed. The results show that the addition of biogas slurry significantly increased the CP and N contents of *P. purpureum* stems ($P<0.05$), and there were significant differences in responses among different cutting periods and different organs ($P<0.001$). The N_{50} treatment led to a significant reduction in the ADF content in the leaves at the second cutting ($P<0.05$) and significant differences in ADF contents among different organs ($P<0.001$). At the second cutting, the RFV of leaves was highest in the N_{100} treatment, and was significantly higher than that in the N_{200} treatment ($P<0.05$). There was a significant positive correlation between CP and RFV. Both CP and RFV were significantly positively correlated with N, K, N:P and K:P in stems and N and P in leaves, and negatively correlated with NDF and ADF in both organs ($P<0.05$). A stepwise regression analysis and structural equation model showed that the N contents of stems and leaves significantly and positively affected the CP content of *P. purpureum* ($P<0.001$), with total effect values of 0.92 and 0.32, respectively. The stem P content and leaf K:P and P content jointly affected RFV, with total effect values of −0.86, 0.59, and 0.57, respectively. In conclusion, application of biogas slurry affected the N and P contents of stems and leaves and the K:P of leaves, thereby directly or indirectly regulating the feed quality of *P. purpureum*.

Key words: *Pennisetum purpureum*; biogas slurry; nitrogen, phosphorus and potassium; stoichiometric ratio; feed quality

沼液(biogas slurry)是以畜禽粪污、作物秸秆等为主要原料经厌氧发酵后的残留液,不仅氮(nitrogen, N)、磷(phosphorus, P)、钾(potassium, K)等作物必需的营养元素丰富,而且富含钙(calcium, Ca)、镁(magnesium, Mg)、硫(sulfur, S)等微量元素和腐殖酸、生长激素、有机质等[1-2],被认为是良好的有机肥料。随着畜禽养殖业的快速发展和厌氧发酵技术的持续推广,沼液的产生量随之增大,其有效处理成为亟待解决的关键问题。沼液的大规模应用受到运输成本高及贮存过程中温室气体(如CH_4和N_2O)逃逸等问题的限制,相比之下,还田利用因其直接性和经济可行性,成为沼液资源化赋值的优先途径[3]。研究表明,不同作物对沼液的消纳能力存在差异,其中牧草的消纳能力显著高于谷物,而蔬菜和水果则表现出中等消纳水平[3-5]。象草(*Pennisetum purpureum*)是热带、亚热带地区广泛种植的多年生禾本科狼尾草属牧草,具有营养丰富、适口性好和再生能力强等优势,是畜禽喜食的优质饲料资源[6-7]。根据其水肥需求大、生长迅速和抗逆性强的特性[8-9],南方许多规模化养殖场在周边种植象草以消纳沼液,构建“畜−沼−草−畜”的循环利用途径[10],使之成为解决沼液还田“最后一公里”的关键纽带。

粗蛋白(crude protein, CP)、中性洗涤纤维(neutral detergent fiber, NDF)以及酸性洗涤纤维(acid detergent fiber, ADF)等是评价牧草营养价值、适口性和消化率的重要指标[11-13],而相对饲喂价值(relative feeding value, RFV)通过整合NDF与ADF来量化和预测饲草品质[14]。一般而言,高CP、RFV与低NDF、ADF表征更优的牧草饲用价值。牧草品质的形成受施肥措施、水分管理等环境条件的影响[15-18]。水培大麦(*Hordeum vulgare*)饲草的养分优化试验表明,氮钾和磷钾对CP的曲面效应影响极显著($P<0.01$)[16];合理的施氮量和基肥/追肥有助于提高青贮玉米(*Zea mays*)的饲用品质[17];适宜的水肥管理措施能优化小黑麦(*Triticale*×*Triticosecale*)+毛苕子(*Vicia villosa*)和燕麦(*Avena sativa*)+箭筈豌豆(*Vicia sativa*)这2种豆禾混播牧草的营养组成,降低NDF、ADF含量,提高RFV[18]。N、P、K作为植物必需的大量元素,在牧草生长和品质形成过程中发挥着重要作用。N是蛋白质、核酸、辅酶、叶绿素分子及一些植物激素的基本构成组分[19]。P与植物的各种代谢过程紧密相关,是细胞重要成分如磷脂、核酸等的组成部分[20]。K则在促进植物体内糖分转化、纤维合成及果实发育中起着重要作用[21]。这些元素之间并非独立调控,而是通过协同作用维持植物的营养动态平衡,其化学计量特征的分配差异,反映了植物对养分的吸收和转运策略,并直接或间接影响饲草品质[22]。

茎秆和叶片作为植物的关键器官,具有明显的功能异质性:叶片主要进行光合作用和蛋白质的合成,是光合产物的“源”;而茎秆主要提供支撑与运输,结构性碳水化合物占比较高,是光合产物的“库”[23]。茎、叶中的化学计

量特征能够反映牧草体内的元素分配及各元素间的相互作用关系，可通过影响光合产物的源库分配来调控蛋白质或纤维组分的积累模式，是理解牧草饲用品质形成的重要理论基础[24]。目前，已有较多在器官尺度上开展的化学计量特征响应机制的关联报道，例如，许爱云等[25]研究发现氮添加并不是直接影响蒙古冰草（*Agropyron mongolicum*）非结构性碳水化合物含量的主导因素，而是通过叶片 P 含量、根系 N 含量及两个器官内的 N/P 产生间接影响。在滇西北地区开展的藜麦（*Chenopodium quinoa*）氮磷钾生态化学计量特征的物候期动态研究表明，藜麦各器官间 N、P、K 分配比和生物量分配比存在紧密耦合[26]。王淼等[27]探究了不同放牧强度对羊草（*Leymus chinensis*）草甸草原植物茎、叶器官的碳（carbon，C）、N、P 含量及化学计量特征的影响，结果表明，适度放牧降低了茎叶 C/N，增加了茎叶的 C/P 和 N/P，有利于草地生态功能的可持续发展。

沼液施用会影响牧草的养分吸收和品质。37.5 kg·hm^{-2}化肥与 100.5 t·hm^{-2}沼液配施与单施化肥相比，多花黑麦草（*Lolium multiflorum*）的 CP 含量提高 10.35%、粗纤维含量下降约 10%（$P<0.05$）[28]；350% 沼液替代化肥可显著提高青饲玉米（*Z. mays*）的 RFV（$P<0.05$）[29]。沼液施用改变了土壤养分状况，象草可能通过调整茎、叶养分分配，进而影响 CP 含量与纤维品质。然而，现有研究大多停留在整株植物或单元素效应层面[8,16,30]，难以揭示沼液添加背景下象草器官尺度的养分化学计量特征与饲用品质的关联机制，尤其是养分互作对蛋白质和纤维组分的影响。基于此，本研究通过田间小区试验，探究沼液不同施用水平对象草茎、叶养分含量及饲用品质的影响，旨在揭示氮磷钾化学计量特征与 CP、RFV 的关联机制，解析多茬次施用下品质响应的动态规律，以期为建立以狼尾草（*Pennisetum alopecuroides*）为纽带的种养结合循环模式提供理论依据。

1　材料与方法

1.1　试验地概况

本试验于 2021 年 5－9 月在龙岩市新罗区雁石镇后路村某规模化养猪场（25°9′9″ N，117°7′3″ E，海拔 447 m）进行，该地属亚热带季风气候区，年平均气温 16～20 ℃，年平均降水量 1500～1900 mm，平均无霜期 291 d。试验地为坡耕地，土壤为山地红壤。基础土壤理化性质为：有机质 27.83 g·kg^{-1}，全氮 1.60 g·kg^{-1}，全磷 1.15 g·kg^{-1}，全钾 5.97 g·kg^{-1}，碱解氮 129.11 mg·kg^{-1}，有效磷 163.18 mg·kg^{-1}，速效钾 190.03 mg·kg^{-1}，pH 6.04。

1.2　试验材料

供试的牧草品种为‘桂闽引’象草（*P. purpureum* ‘Guiminyin’）。供试沼液取自猪场污水处理系统中的储液池。该猪场采用干清粪工艺，排出的粪污经固液分离后，液体部分进入沼气池发酵，在储液池静置 3 个月以上，达到腐熟、无害化后再进行还田利用。沼液的基本理化指标如下：有机碳 212.24 mg·L^{-1}，全氮 776.20 mg·L^{-1}，全磷 59.97 mg·L^{-1}，全钾 239.21 mg·L^{-1}，铵态氮 524.32 mg·L^{-1}，硝态氮 16.48 mg·L^{-1}，pH 8.48。

1.3　试验设计

采用田间随机区组试验设计，以每次施用沼液折算的纯氮量设 5 个处理，分别为 0、50、100、150 和 200 kg N·hm^{-2}，依次记为 CK、N_{50}、N_{100}、N_{150} 和 N_{200}，每个处理 3 次重复，共 15 个小区，每个小区面积为 15 m^2（5 m×3 m）。为防止相邻小区间出现串水现象，小区四周做埂，并用地膜覆盖相隔，小区间隔 1 m。取象草茎节进行扦插育苗，成活 30 d 后挑选长势相对一致的草苗移栽到试验小区，种植株行距为 0.5 m×1.0 m。象草刈割周期为 45 d，每隔 15 d 按照设计的沼液添加水平全量施用 1 次，一个刈割周期内共施用 3 次。第一周期按 200 kg N·hm^{-2} 换算出 N_{200} 处理每个小区所需沼液的体积为 386 L，依次推算出 N_{50}、N_{100}、N_{150} 处理每个小区对应的沼液体积，分别为 97、193 和 290 L，余量加水补充至与 N_{200} 处理相同体积后施用，CK 处理浇灌等体积清水。象草刈割一次后，再开展第二周期沼液添加试验，实施方法同第一周期。各小区其他田间管理措施均保持一致。

1.4　样品采集与分析

每个小区随机选取 5 株象草刈割，留茬约 10 cm，第 2 茬取样与第 1 茬刈割的象草一致。茎叶分离后，于烘箱内 105 ℃杀青后，65 ℃烘干至恒重，研磨后分别过 0.42 和 1.00 mm 筛待用。象草茎、叶的全氮（total nitrogen，TN）、全磷（total phosphorus，TP）和全钾（total potassium，TK）含量参照 NY/T 2017－2011[31]方法测定；粗蛋白（CP）含量按照全氮含量乘以 6.25 折算；中性洗涤纤维（NDF）含量参照 GB/T 20806－2022[32]方法测定；酸性洗

涤纤维(ADF)含量参照NY/T 1459－2022[33]方法测定。

相对饲喂价值(RFV)的计算公式为:RFV＝(DDM×DMI)/1.29,式中:DDM为消化性干物质(digestible dry matter,%),其可通过ADF进行换算:DDM＝88.9－0.779ADF;DMI为干物质采食量(dry matter intake,%),其可通过NDF进行换算:DMI＝120/NDF。上述公式参数均以干物质100%为基础计算。

1.5 数据统计分析

用Excel 2016对试验数据进行整理,再利用SPSS 25.0检验象草茎、叶的N、P、K及其比例和主要饲用品质等指标的正态性(Kolmogorov-Smirnov)和方差齐性(homogeneity),然后用单因素方差(one-way ANOVA)分析中的多重比较(least significant difference,LSD)法对上述指标进行显著性分析($P<0.05$)。茎与叶间、刈割茬次间的显著性差异采用独立样本t检验。采用Pearson法对茎、叶中N、P、K及其比例与主要饲用品质等指标进行相关性分析后,再进行逐步回归分析,筛选出影响象草主要饲用指标的关键因子。采用AMOS 26.0软件构建结构方程模型(structural equation modeling,SEM),分析沼液用量、象草茎和叶的化学计量特征对CP和RFV的影响过程及路径系数。使用GraphPad Prism 9.0绘制柱状图、使用R语言的corrplot包绘制相关性热图、运用Microsoft Visio专业版2019绘制结构方程模型图。

2 结果与分析

2.1 沼液添加对象草氮、磷、钾含量及其化学计量特征的影响

由图1可知,象草茎和叶的TN、TP、TK含量随沼液施用量的增加整体呈上升趋势。TN含量方面,两茬茎秆的沼液处理均显著高于CK($P<0.05$),分别提高28.09%～50.47%和33.73%～60.49%。茬次间,茎秆第2茬显著高于第1茬($P<0.001$)。器官间,两茬的叶片均显著高于茎秆($P<0.001$);TP含量方面,两茬茎秆和第1茬叶片在N_{200}含量最高,均显著高于CK($P<0.05$),分别提高45.10%、78.60%和24.23%。茬次间,茎秆第2茬显著高于第1茬($P<0.001$),叶片的变化趋势相反($P<0.001$)。器官间,第2茬的叶片显著高于茎秆($P<0.001$);TK含量方面,各处理间差异不显著,但第2茬均显著高于第1茬($P<0.001$),茎秆均显著高于叶片($P<0.001$)。

对于TN、TP、TK的化学计量比,茎、叶的N/P和N/K随沼液施用量的增加整体呈先升后降的趋势,K/P整体呈下降趋势。N/P方面,两茬茎秆的数值分别为5.81～8.16和10.16～14.73,分别在N_{50}和N_{150}为最大值,显著高于N_{200}($P<0.05$),两茬叶片的数值分别为9.46～11.11和8.47～9.63,处理间差异不显著。茬次间和器官间比较,茎秆的第2茬显著高于第1茬($P<0.001$),叶片的变化趋势相反($P<0.01$)。第1茬叶片显著高于茎秆,第2茬变化趋势相反($P<0.001$);N/K方面,两茬茎秆的数值分别为0.38～0.58和0.30～0.42,第1茬的沼液处理均显著高于CK($P<0.05$),提高34.64%～55.86%。两茬叶片的数值分别为1.41～1.49和0.59～0.66,处理间差异不显著。茬次间和器官间比较,第1茬显著高于第2茬($P<0.001$),叶片显著高于茎秆($P<0.001$);K/P方面,两茬茎秆的数值分别为10.74～16.23和23.91～37.88,第1茬的N_{100}、N_{150}和N_{200},以及第2茬的N_{200},均显著低于CK($P<0.05$),两茬叶片的数值分别为6.49～7.72和14.53～15.42,处理间差异不显著。茬次间和器官间的变化趋势与N/K相反,第1茬显著低于第2茬($P<0.001$),茎秆显著高于叶片($P<0.001$)。

2.2 沼液添加对象草主要饲用品质的影响

象草主要饲用品质CP、NDF、ADF和RFV的变化如图2所示,茎、叶的CP和RFV随沼液施用量的增加整体呈上升趋势,NDF和ADF随沼液施用量的增加整体呈先降后升的趋势。CP的变化趋势与N含量变化相似,两茬茎秆的沼液处理均显著高于CK($P<0.05$)。茬次间和器官间比较,茎秆第2茬显著高于第1茬($P<0.001$)。叶片均显著高于茎秆($P<0.001$);NDF含量方面,第2茬的叶片在N_{50}和N_{100}处含量较低,较N_{200}分别显著降低1.48%和1.52%($P<0.05$)。茬次间和器官间比较,茎、叶的第1茬均显著高于第2茬($P<0.001$)。第1茬的茎秆显著高于叶片($P<0.001$);ADF含量方面,叶片均在N_{50}含量最低,显著低于第1茬的N_{100}和第2茬的CK($P<0.05$)。茬次间和器官间比较,茎秆第1茬显著高于第2茬($P<0.001$)。茎秆均显著高于叶片($P<0.001$);RFV方面,第2茬叶片在N_{100}处理下最高,显著高于N_{200}($P<0.05$)。茬次间和器官间比较,第1茬显著低于第2茬($P<0.001$),第1茬茎秆显著低于叶片($P<0.001$)。

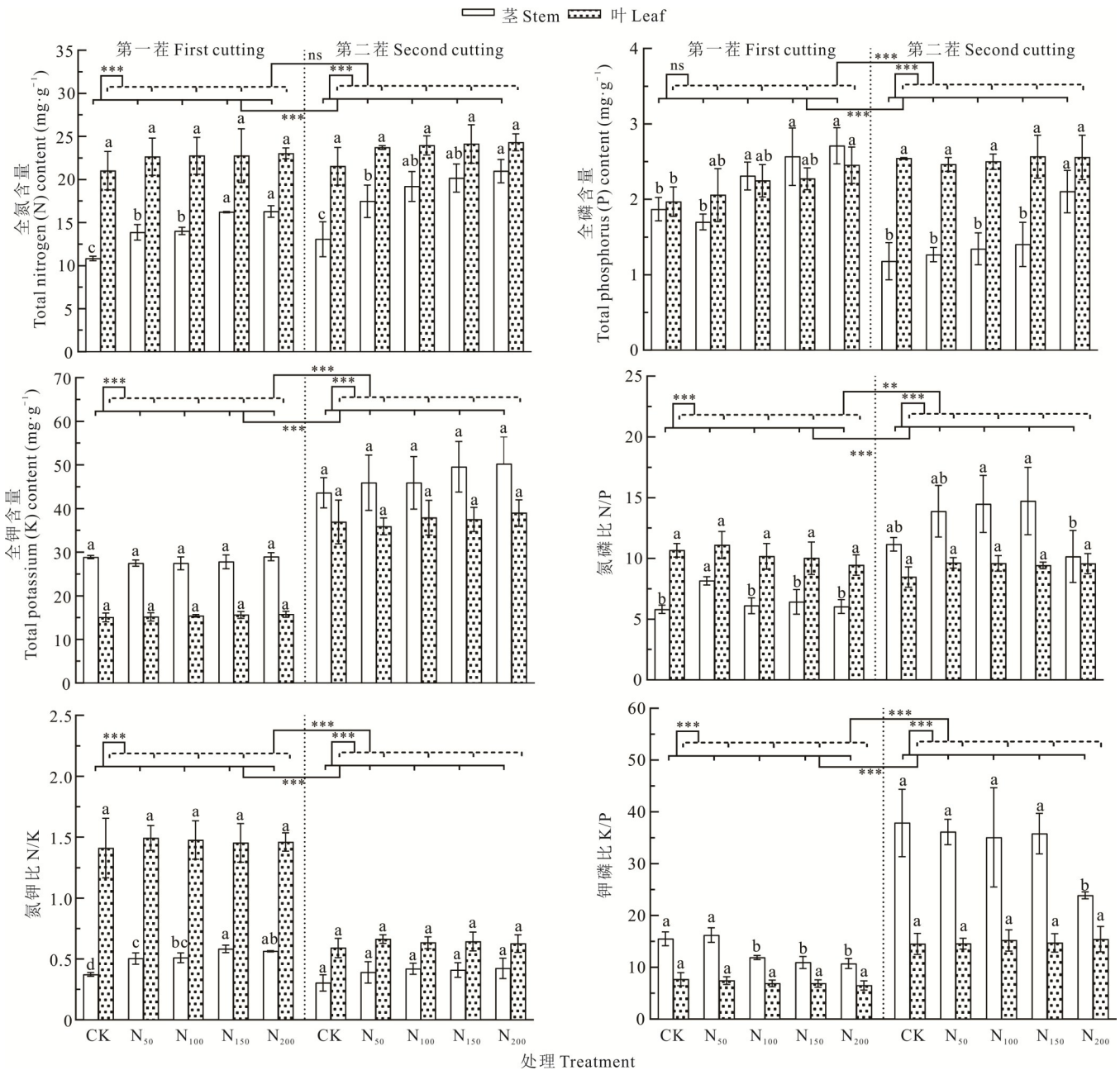


图 1　沼液施用下象草茎、叶的氮、磷、钾含量及其化学计量比

Fig. 1　Total nitrogen, phosphorus, potassium content and stoichiometric ratio in stems and leaves of *P. purpureum* under biogas slurry application

不同小写字母表示同茬同器官不同处理间差异显著($P<0.05$)；不同器官间(实线与虚线之间)以及同一器官不同茬次间(实线之间或虚线之间)的显著性差异采用独立样本 t 检验，显著性标记中 ns 表示 $P>0.05$，*表示 $P<0.05$，**表示 $P<0.01$，***表示 $P<0.001$。下同。Different lowercase letters indicate significant differences among different treatments of the same cutting and the same organ ($P<0.05$). Significant differences between organs (solid vs dashed lines) and between cuttings within the same organ (lines of the same type) were determined using independent-sample t-tests. Significance levels are denoted as follows: ns, $P>0.05$; *, $P<0.05$; **, $P<0.01$; ***, $P<0.001$. The same below.

2.3　象草氮、磷、钾含量及其化学计量比与主要饲用品质的关系

对两次刈割的象草茎、叶中 TN、TP、TK 含量及其比例与主要饲用品质进行相关性分析(图 3)。结果表明，在茎秆中，TK、NP 与 TN，TP 与 NK，NP、KP 与 TK，NP 和 KP 之间均呈显著正相关关系，而 TK、NP 与 TP，TK、NP 与 NK，TP、NK 与 KP 之间则呈显著负相关关系，其中 KP 与 TP、NK 的相关系数分别为−0.87、−0.69。此外，CP 与 TN、TK、NP 和 KP 之间呈显著正相关关系，其中与 TN 的相关系数为 0.92。NDF 和 ADF 显著正相关，

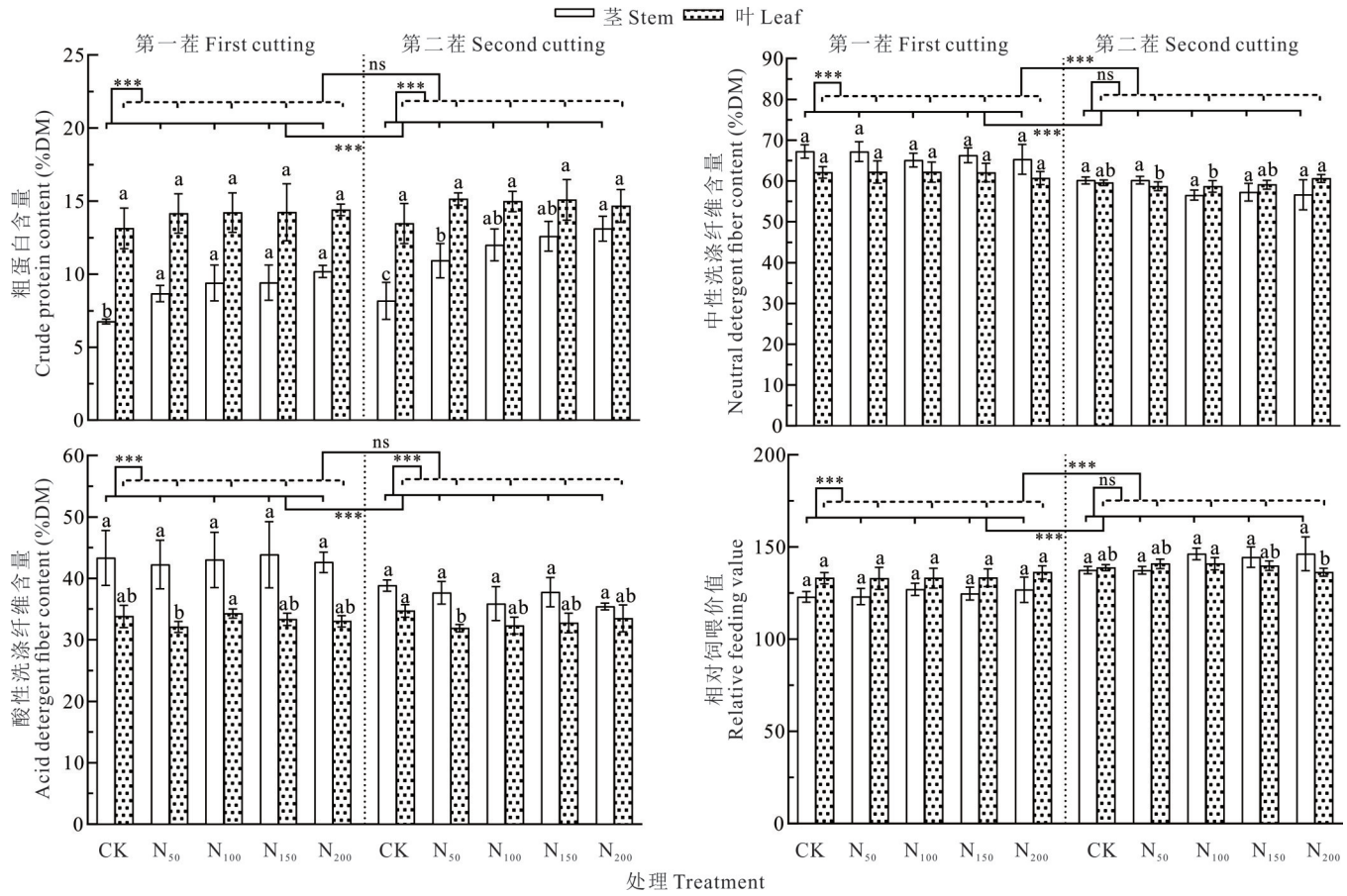


图2 沼液施用下象草茎、叶的主要饲用指标含量

Fig. 2 The main forage quality indices in stems and leaves of *P. purpureum* under biogas slurry application

相关系数为0.62，且两者分别与TP、NK显著正相关，而与TN、TK、NP、KP和CP显著负相关，NDF和ADF与TK的相关系数分别为－0.84和－0.73。RFV与TN、TK、NP、KP和CP显著正相关，而与其他指标均显著负相关，RFV与TK和NDF的相关系数分别为0.84和－1.00。

在叶片中，TN、TK和KP均与TP显著正相关，NP与NK、TK与KP也显著正相关，其中TK与KP的相关系数为0.97。TP和TK均与NP、NK显著负相关，NK与KP亦显著负相关，NK与TK、KP的相关系数分别达－0.97、－0.96。在主要饲用指标方面，CP与TN、TP显著正相关，其中与N的相关系数为0.96。NDF与NK、ADF显著正相关，而与TN、TP、TK、KP和CP显著负相关。ADF与TN、CP显著负相关。RFV与TN、TP、TK、KP和CP显著正相关，而与NK、NDF和ADF显著负相关，其与TK和NDF的相关系数分别为0.64和－1.00(图3)。

2.4 沼液添加影响象草主要饲用品质的途径

对主要饲用品质与茎、叶TN、TP、TK含量及其比例进行逐步回归分析并建模(表1)。以象草茎、叶的TN、TP、TK含量及其比例为自变量，分别以CP、NDF、ADF和RFV为因变量进行多元线性逐步回归分析。其中，CP含量回归模型由茎、叶的TN含量2个因子构成，回归关系达到极显著水平($P<0.001$)，对CP含量变化的解释度为88.30%。NDF含量回归模型由叶片TK和TP含量2个因子构成，回归关系达到极显著水平($P<0.001$)，对NDF含量变化的解释度为87.90%。ADF含量回归模型由茎秆TK含量1个因子构成，回归关系达到极显著水平($P<0.001$)，对ADF含量变化的解释度为55.70%。RFV回归模型由叶片TK和TP含量2个因子构成，回归关系达到极显著水平($P<0.001$)，对RFV变化的解释度为87.40%。

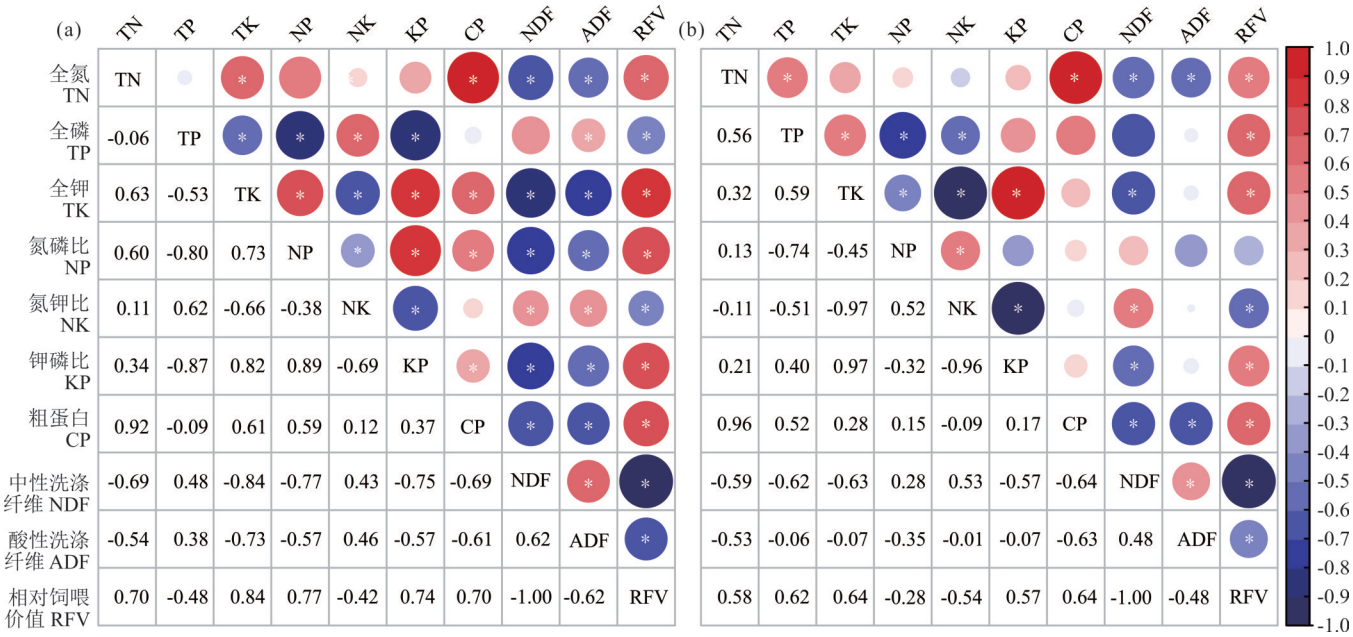


图 3　象草茎、叶的氮、磷、钾含量及其化学计量比与主要饲用指标间的相关性热图

Fig. 3　Correlation heat map between the content of total nitrogen, phosphorus, potassium and their stoichiometric ratios and the main forage quality indices in stems and leaves of *P. purpureum*

(a)为茎秆,(b)为叶片。下三角方框内的数值为相关系数。上三角方框内圆圈的大小和颜色强度与相关系数呈正比,正、负相关关系分别以红色、蓝色显示。*表示 $P<0.05$。TN:全氮;TP:全磷;TK:全钾;NP:氮磷比;NK:氮钾比;KP:钾磷比;CP:粗蛋白;NDF:中性洗涤纤维;ADF:酸性洗涤纤维;RFV:相对饲喂价值。(a) is the stem and (b) is the leaf. The values in the lower triangle box are the correlation coefficients. The size and color intensity of the circles in the upper triangle box are directly proportional to the correlation coefficient, and the positive and negative correlations are shown in red and blue, respectively. * represented $P<0.05$. TN: Total nitrogen; TP: Total phosphorus; TK: Total potassium; NP: N/P; NK: N/K; KP: K/P; CP: Crude protein; NDF: Neutral detergent fiber; ADF: Acid detergent fiber; RFV: Relative feeding value.

表 1　象草主要饲用指标与茎秆、叶片的氮、磷、钾含量及其比例的逐步回归分析

Table 1　Stepwise regression analysis of main forage indexes and total nitrogen, phosphorus, potassium content and stoichiometry in stems and leaves of *P. purpureum*

指标 Index	回归方程 Regression equation	R^2	F	P
CP	$Y_{CP}=0.773X_{SN}^{***}+0.281X_{LN}^{***}$	0.883	110.118	<0.001
NDF	$Y_{NDF}=36.444-0.679X_{LK}^{***}-0.365X_{LP}^{***}$	0.879	106.779	<0.001
ADF	$Y_{ADF}=45.658-0.757X_{SK}^{***}$	0.557	37.479	<0.001
RFV	$Y_{RFV}=98.455+0.689X_{LK}^{***}+0.350X_{LP}^{***}$	0.874	101.297	<0.001

注:CP、NDF 和 ADF 分别代表象草地上部的粗蛋白、中性洗涤纤维和酸性洗涤纤维含量,根据公式(茎秆含量×茎秆干重+叶片含量×叶片干重)/(茎秆干重+叶片干重)计算所得。RFV 为上述的 NDF 和 ADF 换算所得。SN 为茎秆全氮含量;LN 为叶片全氮含量;LK 为叶片全钾含量;LP 为叶片全磷含量;SK 为茎秆全钾含量。变量右上角的"***"表示回归系数在 $P<0.001$ 水平下显著。

Note: CP, NDF and ADF represented the crude protein, neutral detergent fiber and acid detergent fiber content of the aboveground parts of *P. purpureum*, respectively, and were calculated according to the following formula: (stem content×stem dry weight+leaf content×leaf dry weight)/(stem dry weight+leaf dry weight). The relative feeding value (RFV) was the conversion of NDF and ADF described above. SN was the total nitrogen content of the stems; LN was the total nitrogen content of leaves; LK was the total potassium content of leaves; LP was the total phosphorus content of leaves; SK was the total potassium content of the stems. The '***' above a variable indicates that its regression coefficient was significant at $P<0.001$.

构建结构方程模型以进一步明确沼液施用量如何通过象草茎、叶的 TN、TP、TK 及其化学计量特征来影响牧草的 CP(图 4a)和 RFV(图 4c)。结果表明,上述 2 个模型对 CP 和 RFV 的总解释度分别为 90% 和 88%。其中,沼液添加通过显著正向影响茎秆氮含量(stem nitrogen content,SN)($P<0.001$)而间接影响 CP($P<0.001$),其路径相关系数分别为 0.67 和 0.59,也可通过显著正向影响 SN($P<0.001$)和叶片氮含量(leaf nitrogen content,LN)

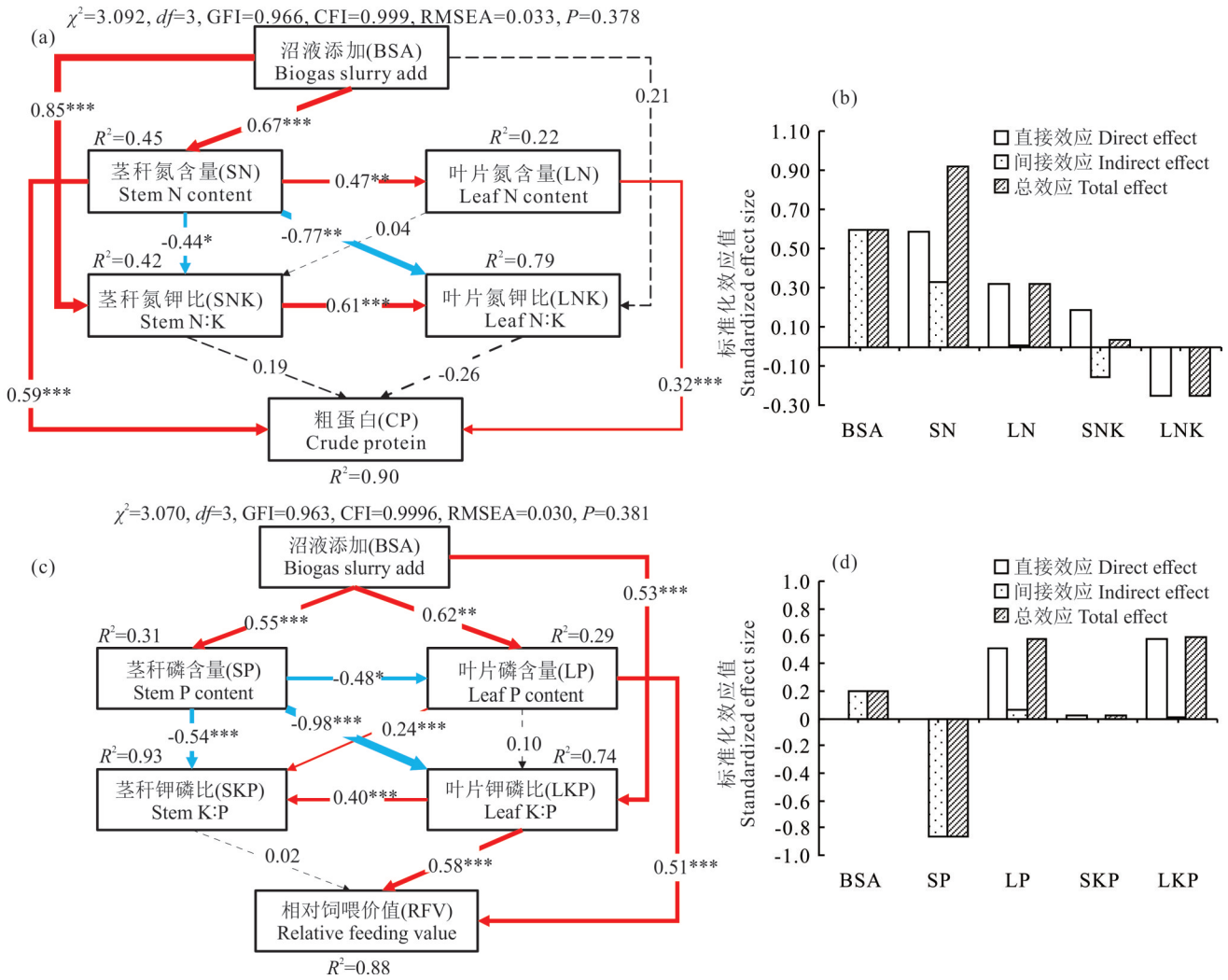


图4 沼液影响象草粗蛋白和相对饲喂价值的结构方程模型及各因子的标准化效应值

Fig. 4 Structural equation modelling (SEM) of biogas slurry influencing crude protein and relative feeding value of *P. purpureum* and the standardized effect values of each factor

χ^2:卡方值;*df*:自由度;GFI:适配度指数;CFI:相对拟合指标;RMSEA:近似误差均方根,*P*:*P*值。$1<\chi^2/df<2$、$P>0.05$、GFI>0.90、CFI>0.95和RMSEA<0.05表示模型具有较好的拟合度;红色、蓝色及虚线箭头线分别表示显著正、负及不显著的路径关系。数值为标准化路径系数,箭头线粗细代表标准化路径系数的相对大小,R^2表示解释率。*,**,***分别表示$P<0.05$,$P<0.01$和$P<0.001$。χ^2: Chi-square; *df*: Degrees of freedom; GFI: Goodness-of-fit; CFI: Comparative fit index; RMSEA: Root mean square error of approximation; *P*: *P*-value. $1<\chi^2/df<2$, $P>0.05$, GFI>0.90, CFI>0.95 and RMSEA<0.05 indicate that the model has a good fit; Red, blue, and dashed arrow lines indicate significant positive, negative, and non-significant effect, respectively. The numerical value is the normalized path coefficient, the thickness of the arrow line represents the relative size of the normalized path coefficient, and R^2 represents the interpretation rate. *, **, and *** indicate statistically significant at $P<0.05$, $P<0.01$ and $P<0.001$, respectively.

($P<0.01$)来间接影响CP($P<0.001$),其路径相关系数分别为0.67、0.47和0.32;在对RFV的影响方面,沼液添加通过显著正向影响叶片磷含量(leaf phosphorus content,LP)($P<0.01$)或叶片钾磷比(leaf K/P,LKP)($P<0.001$)从而间接影响RFV($P<0.001$),其路径相关系数分别为0.62和0.51或0.53和0.58。沼液添加也可通过显著正向影响茎秆磷含量(stem phosphorus content,SP)($P<0.001$),再由SP显著负向影响LP($P<0.05$)或LKP($P<0.001$),从而间接影响RFV($P<0.001$),其路径相关系数分别为0.55、−0.48和0.51或0.55、−0.98和0.58。

基于结构方程中的标准路径系数,分别计算各因子对CP(图4b)和RFV(图4d)的直接效应、间接效应和总效应,结果表明,SN、沼液添加(biogas slurry add,BSA)和LN对CP的总效应值较高,分别为0.92、0.59和0.32,其

中 SN 和 BSA 分别起主要直接和间接作用。对于 RFV，SP、LKP 和 LP 的总效应值较高，分别为 0.86、0.59 和 0.57，其中 LKP 和 SP 分别起直接和间接作用。

3　讨论

3.1　象草氮、磷、钾含量及其化学计量比对沼液添加的响应特征

N、P、K 是植物各项生理活动必需的关键功能元素，其化学计量比是表征植物养分利用效率及元素分配特征的重要指标[26]。研究表明，施肥通过改变土壤－植物系统的营养交换，对植物组织中 N、P、K 特征产生重要影响，受肥料用量、植物生理结构和生长特性等因素的协同作用[34]。本研究结果表明，随着沼液施用比例的提高，象草茎、叶组织的 N、P、K 含量整体呈上升趋势。说明沼液中丰富的速效养分可被牧草直接吸收并有效利用，从而显著提高了茎、叶组织的 TN、TP 含量，在多花黑麦草（*L. multiflorum*）和柳枝稷（*Panicum virgatum*）的沼液施用研究结果也论证了上述观点[28,30]。牧草茎、叶器官中元素变化的敏感性代表着植物内稳态的强弱[35]，本研究中象草茎秆的 TN、TP 含量对沼液的响应比叶片更为敏感，说明叶片的 TN、TP 含量比茎秆更为稳定，不易受到外部环境的调控，这与 Tang 等[24]的研究结果一致。植物 K 含量与其自身的抗性密切相关，在其生理生化过程中也起着关键作用[36]。本研究中象草的 TK 含量在各沼液处理间差异不显著，这可能与 K 元素未直接参与 N、P 的吸收过程，而是通过影响这些元素的代谢和利用效率而发挥间接作用有关[22]。

通常将 N/P、N/K 和 K/P 作为判断植物养分限制的关键指标。施肥试验表明，当植物的 N/P＜14[37]或 N/P＜14.5、N/K＜2.1[38]时，植物生长主要受 N 限制。本研究中沼液各处理的象草茎、叶 N/P 数值分别为 6.04～14.73、9.46～11.11，而茎、叶 N/K 数值分别为 0.39～0.58、0.63～1.49，说明象草整体生长受 N 元素的限制。造成上述现象的原因可能有以下几方面：一是沼液中的氮素利用率偏低。沼液中 NH_4^+-N 占总氮的 70% 以上，施入土壤后易分解为氨气[39]，从而造成氮素损失。盆栽试验表明，施用沼液的氨挥发量是施用化肥的 1.57 倍[40]。此外，6%～12% 的沼液氮损失则以硝态氮的形式淋溶至深层土壤或地下水[41]。二是象草 P 吸收能力较强，导致 N/P 偏低。本研究中施用沼液的象草叶片 TN、TP 含量分别为 22.65～24.32 mg·g^{-1}和 2.06～2.56 mg·g^{-1}，我国草地植物 N、P 的平均水平分别为 27.60 mg·g^{-1}、1.90 mg·g^{-1}[42]，对比可知，本研究中存在 N 偏低而 P 较高的特点。三是沼液的氮素难以满足高生物量的象草生长需求。象草作为生长迅速、分蘖能力强的高大牧草，在其快速生长阶段需要吸收大量矿质元素，沼液养分仍可能难以满足其高效的生长效率及有机物合成需求[26]。

3.2　象草主要饲用品质对沼液添加的响应特征

粗蛋白（CP）含量和相对饲喂价值（RFV）是衡量牧草营养价值的关键指标，直接关系到其饲用价值与经济效益[43]。研究表明，适量施肥可通过提高 CP 含量、降低纤维水平来提升牧草的营养品质，进而改善其适口性与可消化率[44]。沼液含有大量的速效氮，其中 NH_4^+-N 含量占总氮量的 70% 以上[3]，可为牧草提供丰富的氮素进行蛋白质合成，本研究中象草茎、叶器官的 CP 积累对沼液添加的响应存在显著差异，叶片 CP 含量高但响应平稳，而茎秆响应敏感、增幅明显。究其原因，叶片作为光合作用的主要器官[45]，在光合反应的过程中涉及大量的蛋白质[46]，使叶片 CP 含量本底值较高且主要为功能性蛋白，上述成分在植物生长早期即已趋饱和，外源养分供应的变化难以显著影响 CP 累积量，而茎秆作为结构性器官，其 CP 含量（6.77%～13.11%）显著低于叶片（13.13%～15.14%），因此对沼液添加表现出较高的敏感性。

中性洗涤纤维（NDF）和酸性洗涤纤维（ADF）是评价牧草营养品质的重要指标，能够反映牧草纤维组分的含量及其组成特性。ADF 含量与反刍动物的干物质消化率在一定范围内呈负相关关系[47]。本研究中象草茎、叶的 NDF 和 ADF 含量随沼液用量的增加呈先降后升的变化趋势。说明施用中低量沼液可提高牧草的 N/P 和 N/K（图 1），缓解其氮限制状态，促进蛋白质、可溶性糖等细胞内容物的积累，从而稀释了纤维素、半纤维素及木质素等结构性碳水化合物的比例，导致纤维含量下降[48]。然而，高施用量的沼液带来的大量有机质和非氮矿质元素可能加剧碳氮比例失衡，改变植株光合产物的分配格局，从而强化纤维组分的合成，导致 NDF 和 ADF 含量增加[49]。此外，茎秆的 NDF 和 ADF 含量对沼液的响应不显著，与 Masoero 等[50]和 Xu 等[28]的研究结果相似。这可能与茎秆作为主要支撑功能器官，其纤维组分主要受遗传因素调控，而对外源性养分调节的敏感性较弱有关[17]。相对而

言,叶片的NDF和ADF含量对沼液添加的响应更为敏感,可能与其较高的代谢活性与细胞壁可塑性有关[51]。

RFV作为综合指标,被广泛应用于粗饲料的质量评价中,其值大于100时代表牧草的采食率和消化性能较佳[52]。经换算,本研究中两茬象草全株的RFV分别为126.00~129.82和137.92~144.57,说明其营养价值整体较好,且第2茬品质优于第1茬。值得关注的是,第2茬叶片的RFV随沼液添加量增加呈先升后降的变化趋势,且在N_{100}出现拐点。说明施用沼液的增量效果具有阈值性,施用过量可能引发养分吸收抑制或饲用品质的稀释效应[53]。Sun等[29]的研究也证实了类似的阈值效应:当沼液替代化肥氮的比例为350%时,青贮玉米(*Z. mays*)的RFV显著提升,且ADF含量明显降低,但超过该施用比例后,其增益效果趋于饱和。因此,沼液的施用应结合牧草种类及土壤养分状况,科学确定施用水平,以实现CP含量与RFV之间的最优平衡。

3.3 象草主要饲用品质与氮、磷、钾及其化学计量比的关系

牧草饲用品质与植物体内氮、磷、钾的积累与协同调控密切关联。N是植物体内氨基酸、蛋白质等有机物的重要组成元素,在植物生长过程中发挥关键作用[19]。本研究结果表明,象草CP含量与茎、叶TN含量显著正相关,相关系数分别达0.92和0.96;多元回归分析方程中,茎、叶TN含量对CP变化的解释率高达88.30%;结构方程模型也验证了茎、叶的TN含量对CP的正向决定作用,说明氮素供应是决定牧草CP积累的关键因素。国外学者对多年生豆科-禾本科混播牧草的研究也证实了上述观点,CP含量与氮肥用量呈线性正相关,且回归模型的决定系数达51.85%[54]。此外,P和K元素也与植物体内多种代谢过程密切关联[20-21],本研究中,RFV主要受茎秆TP含量、叶片K/P和P含量的协同调控。相关性分析和结构方程模型结果表明,RFV与茎秆TP含量显著负相关,与叶片P含量显著正相关。说明茎部富集P元素可能伴随更高比例的纤维组分,从而降低RFV,与之相反,叶片富含P元素则有助于提高光合效率和代谢活性[22],有助于提升饲草品质。此外,叶片K/P在调控RFV中起主要直接正向作用,说明充足的K/P有助于纤维组分的优化,提高RFV。这些结果与水培饲草试验中关于养分互作效应研究结论相似[16]。值得注意的是,本研究仅在单一地点和一年两茬条件下进行,尚缺乏长期、多环境的数据验证。沼液有机肥养分具有缓释特点,连续多年施用对土壤养分累积、环境效应及牧草品质的影响尚需进一步研究[55]。最后,从牧草利用角度出发,还需将本研究的品质改良效果与动物生产性能相关联,以全面论证沼液在牧草生产中的应用价值。

4 结论

本研究发现:1)象草茎、叶的TN、TP、TK与CP、RFV均随沼液施用量的增加整体呈上升趋势,其中养分含量呈现“叶优先富集N、茎优先富集K,P在茬次间呈反向调节”的特征;2)茎秆和叶片中,CP与TN显著正相关。NDF与N/K显著正相关,而与TN、TK和K/P显著负相关。ADF与TN显著负相关。RFV与TN、TK和K/P显著正相关,而与N/K显著负相关;3)本研究构建了2个结构方程模型,对CP与RFV的解释度分别达90%和88%。其中,沼液通过协同提升象草茎、叶的TN来提高CP,两者对CP的总效应值分别为0.92和0.32;RFV主要受茎秆TP含量的负向调节(总效应值为-0.86)和叶片TP含量与K/P的正向调节(总效应值分别为0.57与0.59)。

参考文献 References:

[1] Mancuso G, Habchi S, Maraldi M, *et al*. Comprehensive review of technologies for separate digestate treatment and agricultural valorisation within circular and green economy. Bioresource Technology, 2024, 409: 131252.

[2] Wang W, Chang J S, Lee D J. Anaerobic digestate valorization beyond agricultural application: Current status and prospects. Bioresource Technology, 2023, 373(8): 128742.

[3] Wang W G, Zhang Y H, Liu Y, *et al*. Managing liquid digestate to support the sustainable biogas industry in China: Maximizing biogas-linked agro-ecosystem balance. Global Change Biology Bioenergy, 2021, 13(6): 880-892.

[4] Genç Lermi A, Erkovan H I, Koç A. Determination of combined effects of organic and mineral fertilizer on forage yield and quality of annual ryegrass. Agronomy, 2023, 13(12): 1-15.

[5] Yang J, Xu X L, Liu M X, *et al*. Effects of Napier grass management on soil hydrologic functions in a Karst landscape,

southwestern China. Soil and Tillage Research, 2016, 157: 83－92.

[6] Tian J, Shen C L, Zhang J G. Study on the nutritional value of four *Pennisetum* grasses. Feed Research, 2021, 44(7): 114－118.
田静, 申成利, 张建国. 狼尾草属4种牧草饲用价值研究. 饲料研究, 2021, 44(7): 114－118.

[7] Hou X C, Teng K, Guo Q, *et al*. Research advances in forage *Pennisetum* resource. Chinese Bulletin of Botany, 2022, 57(6): 814－825.
侯新村, 滕珂, 郭强, 等. 狼尾草属牧草研究进展. 植物学报, 2022, 57(6): 814－825.

[8] Zhao L L, Zhao X, Huang L, *et al*. Transcriptome analysis of *Pennisetum americanum*×*Pennisetum purpureum* and *Pennisetum americanum* leaves in response to high-phosphorus stress. BMC Plant Biology, 2024, 24(1): 635.

[9] Jiang Z, Jiang D, Zhou Q H, *et al*. Enhancing the atrazine tolerance of *Pennisetum americanum* (L.) K. Schum by inoculating with indole-3-acetic acid producing strain *Pseudomonas chlororaphis* PAS18. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2020, 202(1): 110854.

[10] Chen H, Ye J, Liu P H, *et al*. System construction and technical practice of the circular agriculture of planting industry-animal husbandry-edible fungi in Fujian Province. Journal of Agro-Environment Science, 2023, 42(5): 966－973.
陈华, 叶菁, 刘朋虎, 等. 福建省“农－牧－菌”循环农业体系构建与技术实践. 农业环境科学学报, 2023, 42(5): 966－973.

[11] Wang S S, Gu H T, Xie H F, *et al*. Evaluation of forage yield and quality traits of 113 forage hexaploid triticale germplasm lines. Acta Prataculturae Sinica, 2023, 32(1): 192－202.
王珊珊, 谷海涛, 谢慧芳, 等. 113份饲草型六倍体小黑麦种质饲草产量与品质性状的评价. 草业学报, 2023, 32(1): 192－202.

[12] Dai L M. Evaluation of nutritional composition of three gramineous grasses and establishment of NIRS prediction models. Lanzhou: Lanzhou University, 2023.
代露茗. 三种禾本科牧草营养组成评价及NIRS预测模型的构建. 兰州: 兰州大学, 2023.

[13] Katoch R. Forage quality components. Techniques in forage quality analysis. Singapore: Springer Nature, 2023: 17－32. https://link.springer.com/book/10.1007/978-981-19-6020-8.

[14] Guan H, Xu D, Li H P, *et al*. A study of nutritional quality and rumen degradation characteristics of 17 oat varieties in high cold regions. Acta Prataculturae Sinica, 2024, 33(9): 185－198.
关皓, 许多, 李海萍, 等. 高寒地区17个燕麦品种营养品质及瘤胃降解特性研究. 草业学报, 2024, 33(9): 185－198.

[15] Shi Y, Ma Y L, Ma W H, *et al*. Large scale patterns of forage yield and quality across Chinese grasslands. Chinese Science Bulletin, 2013, 58(3): 226－239.
石岳, 马殷雷, 马文红, 等. 中国草地的产草量和牧草品质: 格局及其与环境因子之间的关系. 科学通报, 2013, 58(3): 226－239.

[16] Hou M H, Sun Y L, Yang K X, *et al*. Determination of optimal input levels of nitrogen, phosphorus and potassium for high yield and quality of hydroponic barley forage based on response surface methodology. Acta Prataculturae Sinica, 2024, 33(11): 172－185.
侯铭辉, 孙延亮, 杨开鑫, 等. 基于响应曲面法确定水培大麦饲草高产优质的氮磷钾养分投入量. 草业学报, 2024, 33(11): 172－185.

[17] Li Z L, Gao W, Jiang C Z, *et al*. Appropriate nitrogen application rate with decreased basal/topdressing ratio improves yield, quality, water productivity, and N-use efficiency of forage maize in a rainfed region. Agricultural Water Management, 2025, 317: 109629.

[18] Wu Q, Yao Z Y, Wei X T, *et al*. Effects of water and fertilizer cooperation on production performance and quality of legume-grass mixed pasture in North China Plain. Acta Agrestia Sinica, 2024, 32(11): 3547－3553.
吴琼, 姚泽英, 位晓婷, 等. 水肥协作对华北平原豆禾混播牧草生产性能和品质的影响. 草地学报, 2024, 32(11): 3547－3553.

[19] Kindred D R, Verhoeven T M O, Weightman R M, *et al*. Effects of variety and fertiliser nitrogen on alcohol yield, grain yield, starch and protein content, and protein composition of winter wheat. Journal of Cereal Science, 2008, 48(1): 46－57.

[20] Poirier Y, Bucher M. Phosphate transport and homeostasis in *Arabidopsis*. //The *Arabidopsis* book. Rockville: American Society of Plant Biologists, 2002.

[21] Clarkson D T, Hanson J B. The mineral nutrition of higher plants. Annual Review of Plant Biology, 1980, 31: 239－298.

[22] Chu C C, Wang Y, Wang E T. Improving the utilization efficiency of nitrogen, phosphorus and potassium: Current situation and future perspectives. Scientia Sinica (Vitae), 2021, 51(10): 1415-1423.
储成才, 王毅, 王二涛. 植物氮磷钾养分高效利用研究现状与展望. 中国科学: 生命科学, 2021, 51(10): 1415-1423.

[23] White A C, Rogers A, Rees M, *et al*. How can we make plants grow faster? A source-sink perspective on growth rate. Journal of Experimental Botany, 2016, 67(1): 31-45.

[24] Tang Z Y, Xu W T, Zhou G Y, *et al*. Patterns of plant carbon, nitrogen, and phosphorus concentration in relation to productivity in China's terrestrial ecosystems. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2018, 115(16): 4033-4038.

[25] Xu A Y, Zhang L H, Wang X J, *et al*. Responses of non-structural carbohydrates and C∶N∶P stoichiometry of *Agropyron mongolicum* to nitrogen addition. Acta Prataculturae Sinica, 2023, 32(2): 35-43.
许爱云, 张丽华, 王晓佳, 等. 蒙古冰草非结构性碳水化合物及碳氮磷化学计量特征对氮添加的响应. 草业学报, 2023, 32(2): 35-43.

[26] Li Z G, Yang W G, He G Q, *et al*. Phenological dynamics of nitrogen, phosphorus and potassium stoichiometry in *Chenopodium quinoa* in northwest Yunnan, China. Chinese Journal of Plant Ecology, 2023, 47(5): 724-732.
李兆光, 杨文高, 和桂青, 等. 滇西北藜麦氮磷钾生态化学计量特征的物候期动态. 植物生态学报, 2023, 47(5): 724-732.

[27] Wang M, Zhang Y, Li R Q, *et al*. Effects of grazing disturbance on the stoichiometry of nitrogen and phosphorus in plant organs of *Leymus chinensis* meadow steppe. Scientia Agricultura Sinica, 2022, 55(7): 1371-1384.
王淼, 张宇, 李瑞强, 等. 放牧强度对羊草草甸草原植物器官及群落氮磷化学计量的影响. 中国农业科学, 2022, 55(7): 1371-1384.

[28] Xu W Z, Zhu Y G, Wang X, *et al*. The effect of biogas slurry application on biomass production and forage quality of *Lolium multiflorum*. Sustainability, 2021, 13(7): 3605.

[29] Sun H, Shi K, Ding H R, *et al*. The effect of biogas slurry application on biomass production and the silage quality of corn. Animal Bioscience, 2023, 36(12): 1918-1925.

[30] Głowacka A, Szostak B, Klebaniuk R. Effect of biogas digestate and mineral fertilisation on the soil properties and yield and nutritional value of switchgrass forage. Agronomy, 2020, 10(4): 490.

[31] Ministry of Agriculture of the People's Republic of China. Determination of nitrogen, phosphorus and potassium in plants, NY/T 2017-2011. Beijing: China Agriculture Press, 2011.
中华人民共和国农业农村部. 植物中氮、磷、钾的测定, NY/T 2017-2011. 北京: 中国农业出版社, 2011.

[32] Standardization Administration of the People's Republic of China. Determination of neutral detergent fiber (NDF) in feeds, GB/T 20806-2022. Beijing: China Standard Press, 2022.
中国国家标准化管理委员会. 饲料中中性洗涤纤维(NDF)的测定, GB/T 20806-2022. 北京: 中国标准出版社, 2022.

[33] Ministry of Agriculture of the People's Republic of China. Determination of acid detergent fiber (ADF) in feeds, NY/T 1459-2022. Beijing: China Agriculture Press, 2022.
中华人民共和国农业农村部. 饲料中酸性洗涤纤维的测定, NY/T 1459-2022. 北京: 中国农业出版社, 2022.

[34] Li C Y, Miao Y, Xue Y L, *et al*. Ecological stoichiometric characteristics of soil-microorganism-plant system in the loess upland under long-term fertilization. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(1): 370-378.
李春越, 苗雨, 薛英龙, 等. 长期施肥黄土旱塬农田土壤-微生物-植物系统碳氮磷生态化学计量特征. 生态学报, 2022, 42(1): 370-378.

[35] Karimi R, Folt C L. Beyond macronutrients: Element variability and multielement stoichiometry in freshwater invertebrates. Ecology Letters, 2006, 9(12): 1273-1283.

[36] Johnson R, Vishwakarma K, Hossen M S, *et al*. Potassium in plants: Growth regulation, signaling, and environmental stress tolerance. Plant Physiology and Biochemistry, 2022, 172: 56-69.

[37] Koerselman W, Meuleman A F M. The vegetation N∶P ratio: A new tool to detect the nature of nutrient limitation. Journal of Applied Ecology, 1996, 33(6): 1441-1450.

[38] Olde Venterink H, Wassen M J, Verkroost A W M, *et al*. Species richness-productivity patterns differ between N-, P-, and K-limited wetlands. Ecology, 2003, 84(8): 2191-2199.

[39] Wang Z C, Sanusi I A, Wang J D, *et al*. Developments and prospects of farmland application of biogas slurry in China-A review. Microorganisms, 2023, 11(11): 2675.

[40] Zhou W, Sun G F, Wang X, *et al*. Risk of nitrogen loss under the combined application of biogas slurry and organic fertilizer. Journal of Agro-Environment Science, 2019, 38(8): 1743－1750.
周炜, 孙国峰, 王鑫, 等. 沼液与有机肥配施条件下氮损失风险的研究. 农业环境科学学报, 2019, 38(8): 1743－1750.

[41] Matsunaka T, Sawamoto T, Ishimura H, *et al*. Efficient use of digested cattle slurry from biogas plant with respect to nitrogen recycling in grassland. International Congress Series, 2006, 1293: 242－252.

[42] He J S, Fang J Y, Wang Z H, *et al*. Stoichiometry and large-scale patterns of leaf carbon and nitrogen in the grassland biomes of China. Oecologia, 2006, 149(1): 115－122.

[43] Li S L, Shi H T, Cao Z J, *et al*. Scientific utilization and evaluation technology of forage. Chinese Journal of Animal Nutrition, 2014, 26(10): 3149－3158.
李胜利, 史海涛, 曹志军, 等. 粗饲料科学利用及评价技术. 动物营养学报, 2014, 26(10): 3149－3158.

[44] Sun L, Wang R, Li J, *et al*. Reasonable fertilization improves the conservation tillage benefit for soil water use and yield of rain-fed winter wheat: A case study from the Loess Plateau, China. Field Crops Research, 2019, 242: 107589.

[45] Chapin F S, Autumn K, Pugnaire F. Evolution of suites of traits in response to environmental stress. The American Naturalist, 1993, 142: S78－S92.

[46] Evans J R, Clarke V C. The nitrogen cost of photosynthesis. Journal of Experimental Botany, 2018, 70(1): 7－15.

[47] Wei K T, Zhang C P, Yu Y, *et al*. Yield performance, nutritional quality, and soil physicochemical responses of oat (*Avena sativa*) cultivars in the Qinghai Lake-Gonghe Basin region. Acta Prataculturae Sinica, 2026, 35(1): 107－118.
魏孔涛, 张春平, 俞旸, 等. 环青海湖共和盆地不同燕麦品种的产量、营养价值及对土壤理化性质的影响. 草业学报, 2026, 35(1): 107－118.

[48] Leite R G, Cardoso A D S, Fonseca N V B, *et al*. Effects of nitrogen fertilization on protein and carbohydrate fractions of Marandu palisadegrass. Scientific Reports, 2021, 11(1): 14786.

[49] Li Y, Li Y. Nitrogen addition enhances soil carbon and nutrient dynamics in Chinese croplands: A machine learning and nationwide synthesis. Carbon Balance and Management, 2025, 20(1): 15.

[50] Masoero F, Gallo A, Zanfi C, *et al*. Effect of nitrogen fertilization on chemical composition and rumen fermentation of different parts of plants of three corn hybrids. Animal Feed Science and Technology, 2011, 164(3): 207－216.

[51] Podgórska A, Burian M, Gieczewska K, *et al*. Altered cell wall plasticity can restrict plant growth under ammonium nutrition. Frontiers in Plant Science, 2017, 8: 1344.

[52] Rohweder D A, Barnes R F, Jorgensen N. Proposed hay grading standards based on laboratory analyses for evaluating quality. Journal of Animal Science, 1978, 47(3): 747－759.

[53] Huo J Z, Yu A Z, Wang Y L, *et al*. Effect of organic manure substitution for chemical fertilizer on yield, quality, and nitrogen utilization of sweet maize in oasis irrigation areas. Acta Agronomica Sinica, 2025, 51(7): 1887－1900.
霍建喆, 于爱忠, 王玉珑, 等. 有机肥替代化肥对绿洲灌区甜玉米产量、品质及氮素利用的影响. 作物学报, 2025, 51(7): 1887－1900.

[54] Bijelić Z, Tomić Z, Ružic-Muslić D, *et al*. Forage quality and energy content of perennial legume-grass mixtures at three level of N fertilization. Biotechnology in Animal Husbandry, 2014, 30(3): 539－547.

[55] Kang W Q, Xu Y L, Xu X L, *et al*. Effects of different biogas slurry application rates on soil nutrients and soil bacterial community structure. Chinese Journal of Grassland, 2022, 44(10): 75－83.
康婉青, 徐娅玲, 徐晓玲, 等. 不同沼液施用量对土壤养分和土壤细菌群落结构的影响. 中国草地学报, 2022, 44(10): 75－83.