

DOI: 10.11686/cyxb2024324

http://cyxb.magtech.com.cn

项凌飞, 张峰举, 麻冬梅, 等. 氮磷钾配施对盐碱地湖南稷子生产性能和营养品质的影响. 草业学报, 2025, 34(7): 185—195.

XIANG Ling-fei, ZHANG Feng-ju, MA Dong-mei, et al. Effects of nitrogen, phosphorus and potassium rationing on production performance and nutritional quality of *Echinochloa frumentacea* in saline soil. Acta Prataculturae Sinica, 2025, 34(7): 185—195.

氮磷钾配施对盐碱地湖南稷子生产性能和营养品质的影响

项凌飞¹, 张峰举², 麻冬梅², 刘金龙³, 兰剑¹, 邓建强¹, 胡海英¹, 王斌¹, 蔡春江¹, 马巧利^{1*}

(1. 宁夏大学林业与草业学院, 宁夏 银川 750021; 2. 宁夏大学生态环境学院, 宁夏 银川 750021; 3. 宁夏千叶青农业科技发展有限公司, 宁夏 平罗 753400)

摘要:宁夏北部地区由于盐碱地分布广泛,造成土壤肥力差、肥料利用率低等问题,严重制约我国饲草安全。湖南稷子作为一种适应性广、耐盐碱性强的植物,是盐碱地改良和发展草畜产业的重要材料。为探究在盐碱地上适宜湖南稷子生长的施肥量,本试验采用“3414”设计,研究了不同施肥处理对湖南稷子生产性能及营养品质的影响。结果表明: $N_2P_1K_1$ (N: 180 kg·hm⁻²; P₂O₅: 45 kg·hm⁻²; K₂O: 30 kg·hm⁻²)处理的平均株高最高,为1.58 m。 $N_2P_1K_1$ 处理的鲜草和干草平均产量较不施肥处理分别显著提高了67.24%、62.09%。氮磷钾肥配施可显著提高($P < 0.05$)湖南稷子的营养价值,粗蛋白、粗灰分含量最高的处理均为 $N_2P_0K_2$ (N: 180 kg·hm⁻²; P₂O₅: 0 kg·hm⁻²; K₂O: 60 kg·hm⁻²),分别为5.77%、8.75%,而相对饲喂价值与干物质消化率、总可消化养分、泌乳净能均在 $N_0P_2K_2$ (N: 0 kg·hm⁻²; P₂O₅: 90 kg·hm⁻²; K₂O: 60 kg·hm⁻²)处理下最高。经主成分综合分析得出,在 $N_2P_1K_1$ 处理下排名最高,说明在配施N 180 kg·hm⁻², P₂O₅ 45 kg·hm⁻², K₂O 30 kg·hm⁻²时,最适宜湖南稷子在宁夏北部盐碱地生长。

关键词:湖南稷子; 氮磷钾配施; 生产性能; 营养品质; 综合评价

Effects of nitrogen, phosphorus and potassium rationing on production performance and nutritional quality of *Echinochloa frumentacea* in saline soil

XIANG Ling-fei¹, ZHANG Feng-ju², MA Dong-mei², LIU Jin-long³, LAN Jian¹, DENG Jian-qiang¹, HU Hai-ying¹, WANG Bin¹, CAI Chun-jiang¹, MA Qiao-li^{1*}

1. College of Forestry and Prataculture, Ningxia University, Yinchuan 750021, China; 2. College of Ecological Environment, Ningxia University, Yinchuan 750021, China; 3. Ningxia Qianyeqing Agricultural Science and Technology Development Co., Ltd, Pingluo 753400, China

Abstract: The northern region of Ningxia has widely distributed saline and alkaline lands. Salinity, in turn, imposes limitations on use of land for crop and forage production, and such land typically has low soil fertility and low fertilizer response. These limitations seriously restrict the capacity for forage grass production in China. As a plant with wide adaptability and strong salinity tolerance, Hunan Jizi (*Echinochloa frumentacea*) is an important forage species for

收稿日期: 2024-08-26; 改回日期: 2024-11-11

基金项目: 宁夏回族自治区重点研发计划(2022BDE92070, 2023BCF01012, 2019NYYZ0401), 宁夏大学草学一级学科建设项目(NXYLXK2017A01)和清华大学水沙科学水利水电工程国家重点实验室及宁夏银川水联网数字治水联合研究院联合开放研究基金(sklhse-2022-Iow05)资助。

作者简介: 项凌飞(1998—), 男, 宁夏盐池人, 在读硕士。E-mail: xlf_waooo@163.com

* 通信作者 Corresponding author. E-mail: mql_2008@126.com

saline-alkaline land improvement and development of the forage and livestock industries. This experiment investigated the suitable fertilization rate for *E. frumentacea* on saline-alkaline land, using the '3414' incomplete factorial experimental design to clarify the effects of different fertilization combinations of N, P and K on the production performance and nutritional quality of *E. frumentacea*. It was found that the average plant height of $N_2P_1K_1$ (N: $180 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$, P_2O_5 : $45 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$, K_2O : $30 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$) was 1.58 m. The average yields of fresh herbage and hay in treatment $N_2P_1K_1$ were, respectively, 67.24% and 62.09% higher than those of the no-fertilizer treatment ($P < 0.05$). Nitrogen-phosphorus-potassium fertilizer application significantly increased the nutritive value of Hunan Jizi, and the treatments with the highest crude protein and crude ash contents were $N_2P_0K_2$ (N: $180 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$, P_2O_5 : $0 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$, K_2O : $60 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$), with gains of 5.77% and 8.75%, respectively, compared to no fertilizer. Meanwhile, the relative feeding value and dry matter digestibility, total digestible nutrients, and net lactation energy were all highest under treatment $N_0P_2K_2$ (N: $0 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$, P_2O_5 : $90 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$, K_2O : $60 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$). Multivariate principal component analysis indicated the highest overall ranking was obtained under the treatment $N_2P_1K_1$. Based on these results, the recommended fertilizer combination for growing Hunan Jizi on saline and alkaline land in northern Ningxia is: N $180 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$, P_2O_5 $45 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$, and K_2O $30 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$.

Key words: *Echinochloa frumentacea*; combining application of nitrogen, phosphorus and potassium fertilizers; production performance; nutritional quality; comprehensive assessment

近年来,食物安全问题成为我国面临的重大挑战,随着消费水平的上升,人们对肉蛋奶的需求日益增长,致使对饲草的需求量上升,处于供不应求的状态,需大力发展饲草种植,提高饲草生产力,缓解饲草短缺,推进畜牧业发展。“十四五”发展规划^[1]初步预测,我国对优质饲草需求量将超过1.2亿t,缺口率高达41.6%。因此,提高草地生产性能是目前亟待解决的关键问题。宁夏引黄灌区是我国重要的畜牧业生产基地之一,其生产效益与当地的发展水平紧密联系,而在银北地区土地盐碱化最为严重,显著影响作物生长和发育,限制了饲草生产,而盐碱地的改良对农业可持续健康发展和保障粮食安全具有重要的理论价值和实践意义。湖南稷子(*Echinochloa frumentacea*)作为一年生饲草,具有产草量高、适应性广、耐盐碱、耐瘠薄、耐干旱等特点^[2],被认为是一种理想的盐碱地改良植物^[3]。因此,探寻合理的管理方式对提高湖南稷子产量、营养品质,稳定饲草生产力,保障畜牧业健康可持续发展意义重大。

施肥是提高饲草生产性能的必要管理措施^[4],合理施肥不仅能给植株提供生长发育所需的营养元素,还能丰富牧草营养^[5]。氮、磷、钾作为植物的主要养分,对其的吸收、同化与转运直接影响着作物的生长发育、产量和品质^[6]。最佳氮磷钾肥配比可以直接影响作物光合作用^[7]、养分吸收^[8]和生长特性^[9],进而提高作物产量。孟凯等^[10]研究表明,在 $N_2P_1K_1$ (N= $30 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、P= $165 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、K= $37.5 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)处理下苜蓿(*Medicago sativa*)产量达到最高,为 $11.70 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$,较不施肥处理提高了21.20%。薛垠鑫等^[11]研究表明,在氮、磷、钾肥分别施 $360 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、 $90 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、 $150 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 条件下,玉米(*Zea mays*)的株高与光合速率均达到最大值,分别为3.5 m、 $37.1 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 。李恒锐等^[12]研究发现,氮、磷、钾配施比单施效果更好,其出苗率、分蘖率、有效茎数量均高于单纯施肥,且配比施肥对土壤养分、土壤肥力也有一定促进作用。综上,施肥对饲草生长具有明显促进作用。然而,施肥量的多少,对盐碱地改良至关重要。此外,不同的施肥对比对土地的供给也存在差异^[13],因此,研究合理的氮磷钾施肥量对提高盐碱地饲草产量和改善营养价值具有重要意义。目前,在盐碱地湖南稷子种植实践中,施肥管理还需进一步完善。“3414”施肥试验具有处理少效率高的优点,是目前国内外应用最为广泛的田间施肥效应方案,有助于提供最佳施肥模式,实现精准施肥^[14]。因此,本研究将采取“3414”施肥方案,通过研究湖南稷子在不同氮磷钾配施条件下生产性能和营养品质的变化,旨在明确湖南稷子在宁夏银北盐碱荒地的最佳氮磷钾配比组合,以期为该区域饲草生产提供理论依据和技术支撑。

1 材料与方 法

1.1 试验地概况

试验地位于宁夏平罗县高庄乡千叶青农业科技发展有限公司盐碱地草畜一体化实验基地(105°57' E, 38°36' N, 海拔 1100 m), 属于典型的中温带半干旱荒漠性气候, 年均气温 9.4 °C, 年均日照时数 3008.6 h, 平均霜冻期为 194.6 d, 无霜期 171 d, 年蒸发量 1825 mm 左右, 年均降水量 173.2 mm, 主要集中在 6—9 月, 该地区常年干旱、降水量少、蒸发量大、日照时数长、昼夜温差大(图 1)。土壤类型主要为灌淤土, 全盐含量为 1.07 g·kg⁻¹, 电导率为 4.6 dS·m⁻¹。播前 0~20 cm 土层全氮含量为 0.68 g·kg⁻¹、碱解氮含量为 54.55 mg·kg⁻¹、速效磷含量为 25.21 mg·kg⁻¹、pH 值为 8.1、全磷含量为 1.25 g·kg⁻¹、全钾含量为 13.17 g·kg⁻¹、速效钾含量为 78.35 mg·kg⁻¹、有机质含量为 18.82 g·kg⁻¹。

1.2 试验设计

本试验所选用湖南稷子品种为“海子一号”, 由宁夏千叶青农业科技发展有限公司提供。试验地于 2020 年 4 月种植, 设置氮、磷、钾 3 个因素; 4 个施肥水平, 分别为 0、1、2、3。其中 0 水平指不施肥, 2 水平指常规施肥量, 1 水平=2 水平×0.5, 3 水平=2 水平×1.5。试验区习惯施肥量即 2 水平确定为 N:180 kg·hm⁻²、P₂O₅:90 kg·hm⁻²、K₂O:60 kg·hm⁻², 详见表 1。

田间试验小区采用完全随机区组设计排列, 每个小区设置一个处理, 每个处理重复 3 次, 共计 42 个小区。小区面积为 6 m×8 m=48 m², 每个处理施肥量见表 2。小区四周设 2 m 宽保护行, 以减少田间试验干扰。氮肥为普通尿素(N 46%), 磷肥为重过磷酸钙(P₂O₅ 46%), 钾肥为硫酸钾(K₂O 50%)。70% 氮肥和全部磷钾肥作基肥, 30% 氮肥在拔节期一次追施, 生育期灌水 2 次, 均在施肥当天进行, 灌水量分别为 120 和 150 mm。

1.3 主要指标及测定方法

1.3.1 农艺性状 株高: 于抽穗期在每个小区随机选取 10 株生长良好的湖南稷子, 用卷尺测量植株顶端与地面垂直高度, 取其平均值。鲜草产量和干草产量: 每个小区随机选取 1 m×1 m 样段, 人工刈割, 留茬 5 cm 左右, 称鲜重; 在刈割的鲜草中随机称取 1 kg, 于烘箱中 105 °C 杀青 30 min, 后 65 °C 烘干至恒重, 称量干草产量, 根据鲜干比折算每 hm² 干草产量(kg·hm⁻²)。叶绿素: 于抽穗期每个处理取样 5 株, 使用叶

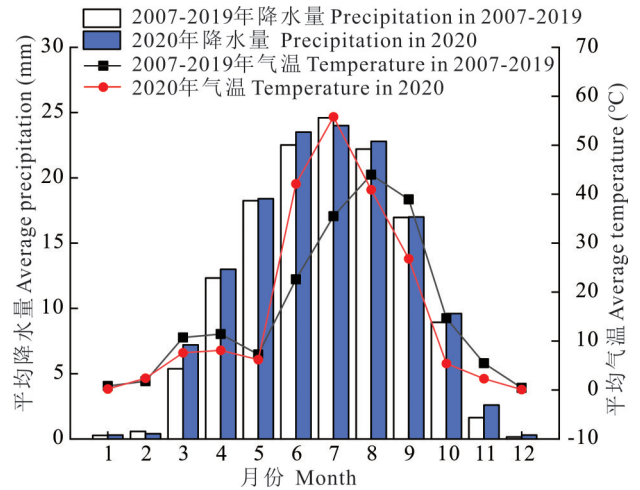


图 1 2020 年试验区不同月份降水量和温度

Fig. 1 Precipitation and temperature in different months of the pilot area in 2020

表 1 “3414”试验各因素施肥水平

Table 1 Fertilization level of each factor in “3414” experiment (kg·hm⁻²)

处理 Treatments	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
0	0	0	0
1	90	45	30
2	180	90	60
3	270	135	90

表 2 “3414”试验设计方案

Table 2 “3414” experimental design scheme (kg·hm⁻²)

编号 Code	处理 Treatments	施肥量 Fertilizer		
		N	P ₂ O ₅	K ₂ O
1	N ₀ P ₀ K ₀	0	0	0
2	N ₀ P ₂ K ₂	0	90	60
3	N ₁ P ₂ K ₂	90	90	60
4	N ₂ P ₀ K ₂	180	0	60
5	N ₂ P ₁ K ₂	180	45	60
6	N ₂ P ₂ K ₂	180	90	60
7	N ₂ P ₃ K ₂	180	135	60
8	N ₂ P ₂ K ₀	180	90	0
9	N ₂ P ₂ K ₁	180	90	30
10	N ₂ P ₂ K ₃	180	90	90
11	N ₃ P ₂ K ₂	270	90	60
12	N ₁ P ₁ K ₂	90	45	60
13	N ₁ P ₂ K ₁	90	90	30
14	N ₂ P ₁ K ₁	180	45	30

绿素测定仪(TYS-B,浙江托普云农科技股份有限公司)测定湖南稷子第二片叶片的叶绿素 SPAD(soil and plant analyzer development)值。测定部位是叶片的中间部位(避开叶片的叶脉部位)。

1.3.2 营养品质测定 抽穗期标志着农作物从营养生长转为生殖生长的阶段,是评估作物营养状况的关键时期^[15]。因此,在抽穗期每个小区内随机取湖南稷子鲜草样品 500 g,将其剪至 4~5 cm 的小段,于烘箱 105 °C 下杀青 0.5 h 左右,65 °C 烘干至恒重。将烘干后的湖南稷子草样粉碎,过孔径 0.45 mm 筛。使用极光手持近红外仪(FOSS-NIRS DS 2500,FOSS 公司,丹麦)测定样品的营养成分,通过 WinISI IV 软件对湖南稷子样品的近红外原始光谱数据进行处理,将其光谱数据与各营养成分化学分析数据结合构建预测模型。定标集用于模型的构建及内部交叉验证,验证集用于模型外部验证。每个样品扫描 4 次后取平均值,并对每个样品进行 3 次技术重复分析。包括牧草粗灰分(crude ash, Ash)、粗蛋白(crude protein, CP)、粗脂肪(ether extract, EE)、中性洗涤纤维(neutral detergent fiber, NDF)和酸性洗涤纤维(acid detergent fiber, ADF)含量测定。依据中性洗涤纤维和酸性洗涤纤维计算饲料相对饲喂价值(relative feed value, RFV)。表达式为^[16]:

$$RFV = \frac{DMI \times DDM}{1.29} \quad (1)$$

式中:DMI(dry matter intake)为粗饲料干物质随意采食量,DDM(digestible dry matter)为干物质消化率,总可消化养分(total digestible nutrients, TDN),泌乳净能(net energy for lactation, NEL)表达式为^[17-18]:

$$DMI = \frac{120}{NDF} \quad (2)$$

$$DDM = 88.9 - 0.779 \times ADF \quad (3)$$

$$TDN = (-1.291 \times ADF) + 101.35 \quad (4)$$

$$NEL = [1.044 - (0.0119 \times ADF)] \times 2.205 \quad (5)$$

1.4 数据处理

利用 Microsoft Excel 2019 进行数据整理,采用 Origin 2021 作图,使用 SPSS 27.0 对不同肥料处理的原始数据进行差异显著性分析。

2 结果与分析

2.1 不同施肥水平对湖南稷子农艺性状的影响

2.1.1 施肥对湖南稷子株高的影响 由图 2 可知,氮磷钾配施对湖南稷子株高有显著影响, $N_2P_1K_1$ 处理的株高值最大,达到 1.58 m, $N_2P_0K_2$ 处理次之,为 1.55 m, $N_0P_2K_2$ 处理最低,为 1.18 m, $N_2P_1K_1$ 较 $N_0P_2K_2$ 提高 33.90%,较 $N_0P_0K_0$ 提高 15.83% ($P < 0.05$)。

2.1.2 不同施肥处理对湖南稷子鲜草产量与干草产量的影响 由图 3 可知,氮磷钾配施对湖南稷子鲜草产量和干草产量均有显著影响 ($P < 0.05$),鲜草产量在 $N_2P_1K_1$ 处理下达到最大,为 $48352.50 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, $N_2P_2K_3$ 处理次之,为 $42239.25 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,较 $N_0P_2K_2$ 处理 ($14171.75 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) 分别显著提高了 241.19%、198.05%;干草产量在 $N_2P_1K_1$ 和 $N_2P_1K_2$ 处理下最大,均为 $9594.50 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,在 $N_0P_2K_2$ 处理下最小,为 $2653.14 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,二者相差 $6941.36 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。

2.1.3 施肥对湖南稷子叶绿素的影响 由图 4 可知,氮磷钾配施对湖南稷子 SPAD 值有显著影响 ($P < 0.05$),SPAD 值为 33.97~45.93,在 $N_2P_0K_2$ 处理下 SPAD 达到最大,为 45.93。最小值则出现在处理 $N_2P_1K_1$,为 33.97,二者相差 11.96。

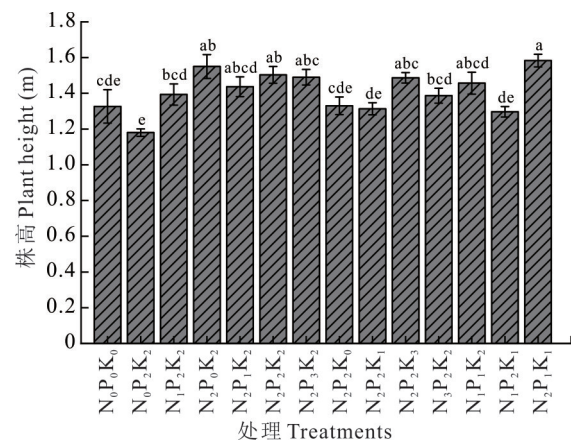


图 2 不同施肥水平对湖南稷子株高的影响

Fig. 2 Effect of different fertilization levels on plant height of *E. frumentacea*

不同小写字母表示不同施肥水平间差异显著 ($P < 0.05$), 下同。Different lowercase letters indicate significant differences among different fertilization levels ($P < 0.05$), the same below.

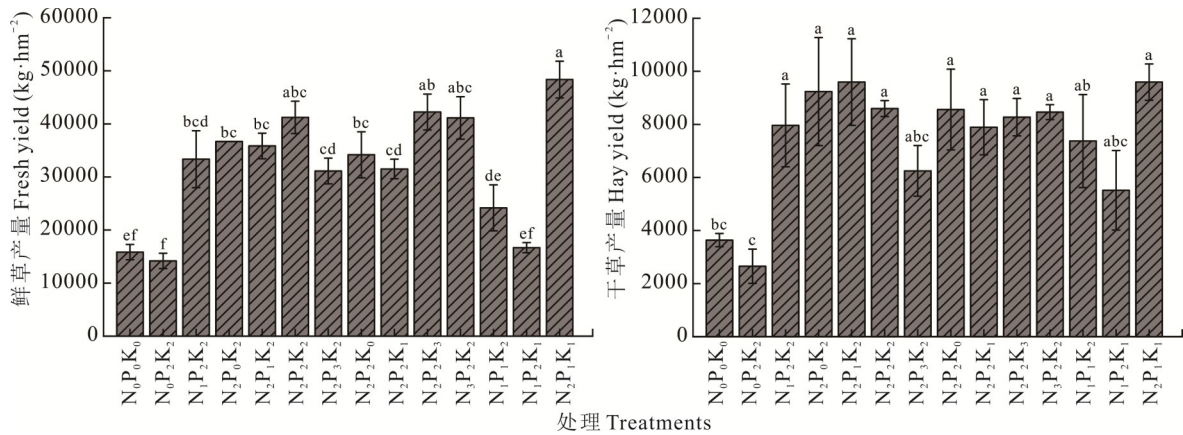


图 3 不同施肥水平对湖南稷子鲜草产量和干草产量的影响

Fig. 3 Effects of different fertilization levels on fresh and hay yields of *E. frumentacea*

2.2 不同施肥水平对湖南稷子营养品质的影响

由图 5 可知,氮磷钾配施对湖南稷子粗蛋白、粗灰分、相对饲喂价值均有显著影响($P < 0.05$),对粗脂肪无显著影响。粗蛋白含量在 $N_2P_0K_2$ 处理下最高,为 5.77%,显著高于其他处理($P < 0.05$),较处理 $N_0P_0K_0$ (4.41%) 提高 30.84%;粗灰分含量为 4.46%~8.75%,其中在 $N_2P_0K_2$ 处理下最高,为 8.75%,在 $N_0P_2K_2$ 处理下粗灰分含量最低,为 4.46%,较 $N_2P_0K_2$ 处理降低了 49.03%;粗脂肪含量为 1.31%~1.54%,其中在 $N_2P_2K_2$ 处理下粗脂肪含量最大,为 1.54%,在 $N_1P_2K_1$ 处理下粗脂肪含量最低,为 1.31%,二者相差 0.23%。各处理相对饲喂价值为 61.73~84.80,其中 $N_0P_2K_2$ 处理的相对饲喂价值最高,达到 84.80; $N_0P_0K_0$ 处理次之(75.60);最小的是 $N_2P_3K_2$ 处理,为 61.73, $N_0P_2K_2$ 较 $N_2P_3K_2$ 提高了 37.37%。

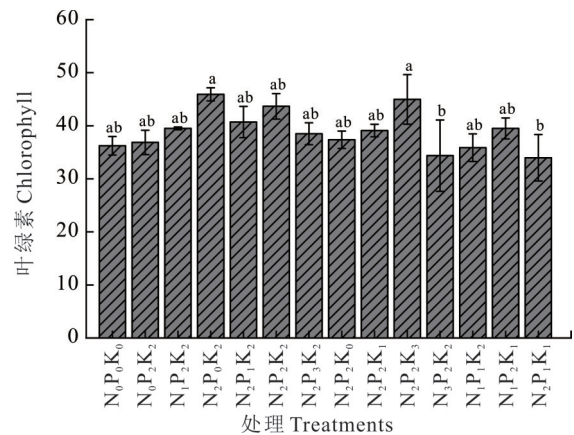


图 4 施肥对湖南稷子抽穗期叶绿素的影响

Fig. 4 Effect of fertilization on chlorophyll at heading stage of *E. frumentacea*

由图 6 可知,氮磷钾配施对湖南稷子干物质采食量、干物质消化率、中性洗涤纤维、酸性洗涤纤维、总可消化养分和泌乳净能均有显著影响($P < 0.05$)。干物质采食量为 1.51%~1.80%,其中在 $N_0P_2K_2$ 处理下最大,为 1.80%,在 $N_2P_3K_2$ 处理下最小,为 1.51%,二者相差 0.29%;干物质消化率在 $N_0P_2K_2$ 处理下最大,为 60.79%, $N_0P_0K_0$ 处理次之,为 57.86%,二者相差 2.93%;中性洗涤纤维含量为 66.71%~79.97%,在 $N_2P_3K_2$ 处理下最高,为 79.97%,在 $N_0P_2K_2$ 处理下达到最低,为 66.71%,二者相差 13.26%;就酸性洗涤纤维而言,在 $N_2P_0K_2$ 处理下最高,为 47.02%,在 $N_0P_2K_2$ 处理下最低,为 36.08%,较 $N_2P_0K_2$ 显著降低了 23.27%;总可消化养分含量为 40.64%~54.77%,其中在 $N_0P_2K_2$ 处理下最大,为 54.77%,在 $N_2P_0K_2$ 处理下最小,为 40.64%, $N_0P_2K_2$ 较 $N_2P_0K_2$ 提高了 34.77%;泌乳净能在 $N_0P_2K_2$ 处理下最大,为 1.36%,其次是 $N_0P_0K_0$ 处理,为 1.26%,在 $N_2P_0K_2$ 最小,为 1.07%,与 $N_0P_2K_2$ 和 $N_0P_0K_0$ 分别相差 0.29% 和 0.19%。

2.3 综合评价

2.3.1 相关性分析 如图 7 所示,株高、干草产量、粗灰分与中性洗涤纤维、酸性洗涤纤维之间呈显著正相关($P < 0.05$),与相对饲喂价值、干物质采食量、干物质消化率、总可消化养分、泌乳净能之间呈显著负相关($P < 0.05$);相对饲喂价值与干物质采食量、干物质消化率、总可消化养分、泌乳净能之间呈显著正相关($P < 0.05$),与酸性洗涤纤维、中性洗涤纤维呈显著负相关($P < 0.05$);中性洗涤纤维与干物质采食量、干物质消化率、总可消化养分、泌乳净能之间呈显著负相关($P < 0.05$);干物质采食量与干物质消化率、总可消化养分、泌乳净能之间呈显著正相关($P < 0.05$)。

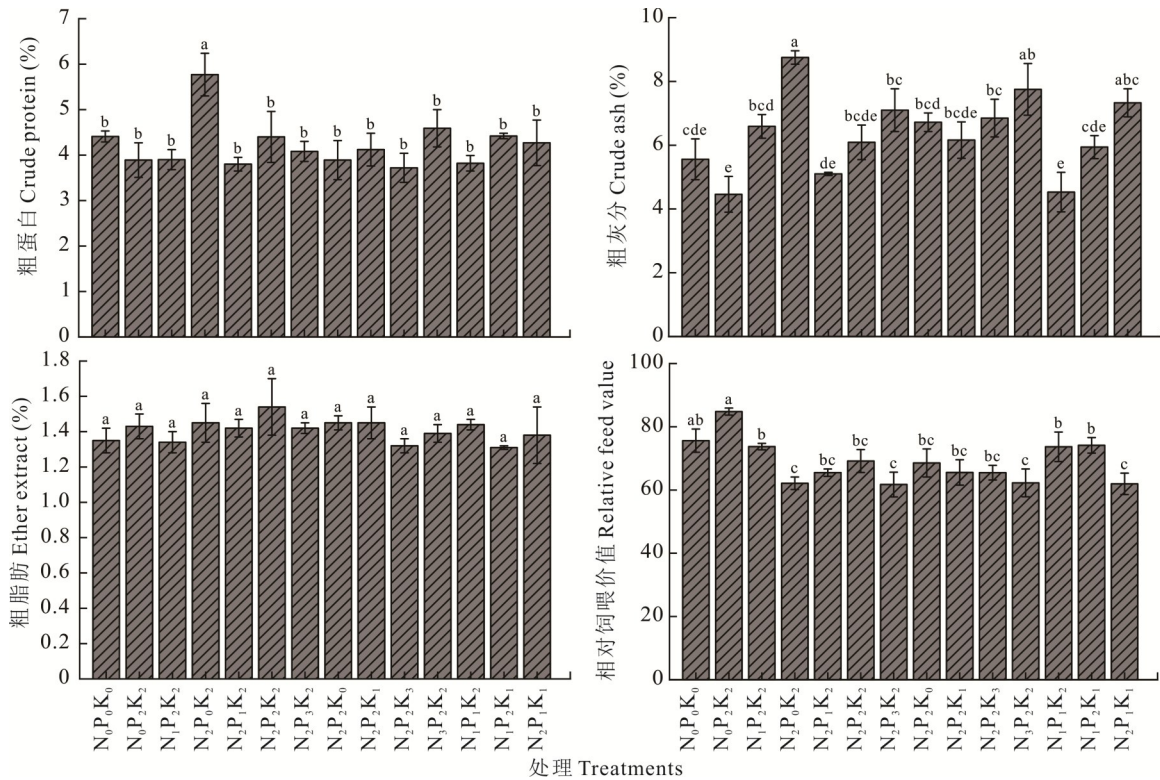


图5 施肥对湖南稷子抽穗期粗蛋白、粗灰分、粗脂肪和相对饲喂价值的影响

Fig. 5 Effect of fertilization on crude protein, crude ash, ether extract and relative feed value at heading stage of *E. frumentacea*

2.3.2 主成分分析 对湖南稷子生长性能、营养品质等指标进行主成分分析。特征值、方差贡献率和载荷如表3所示,根据特征值大于1的原则,可提取3个主成分,累积方差贡献率达到86.951%,解释了总体信息的86.951%。第1主成分主要综合了酸性洗涤纤维、中性洗涤纤维、鲜草产量、干草产量、粗灰分,其载荷值较大,其权重系数分别为0.986、0.964、0.850、0.819和0.809;第2主成分主要综合了粗蛋白、叶绿素相对含量、粗脂肪,权重系数分别为0.783、0.637和0.261;第3主成分主要综合了粗脂肪、干草产量、鲜草产量,权重系数分别为0.750、0.355和0.273。

根据主成分综合评价方法^[19],将原始数据进行标准化后导入SPSS软件建立综合评价模型,得出公因子 Y_1 、 Y_2 和 Y_3 , Y_1 中 $N_2P_1K_1$ 得分最高, Y_2 中 $N_2P_1K_1$ 得分最高, Y_3 中 $N_2P_2K_2$ 得分最高;代入 $Y=(69.041Y_1+9.368Y_2+8.542Y_3)/86.951$ 计算,得出不同处理综合得分, $N_2P_1K_1$ 得分最高(3.15),14个不同施肥处理排名顺序为: $N_2P_1K_1 > N_2P_0K_2 > N_3P_2K_2 > N_2P_3K_2 > N_2P_2K_3 > N_2P_2K_2 > N_2P_1K_2 > N_2P_2K_1 > N_2P_2K_0 > N_1P_2K_2 > N_1P_1K_2 > N_1P_2K_1 > N_0P_0K_0 > N_0P_2K_2$ (表4)。

3 讨论

3.1 氮磷钾配施对湖南稷子饲草农艺性状、生产性能的影响

科学合理配施氮、磷、钾肥能促进作物生长发育,尤其对株高、茎粗等农艺性状具有显著影响^[20-21]。李春容等^[22]在康藏高原地区进行氮磷钾配施复合肥料试验,研究发现,在施肥90 d后,老芒麦(*Elymus sibiricus*)、披碱草(*Elymus dahuricus*)、黑麦草(*Lolium perenne*)、紫花苜蓿、燕麦(*Avena sativa*)、草地早熟禾(*Poa pratensis*)6种牧草的株高增长率达到60%~80%。潘多锋等^[23]在不同生育时期对4种禾本科牧草进行了施肥处理,其中在抽穗期羊草(*Leymus chinensis*)和扁穗冰草(*Agropyron cristatum*)的株高较不施肥处理分别高出12.9和6.0 cm,无芒雀麦(*Bromus inermis*)在返青期的株高较对照提高了13.72%。本试验结果显示,氮磷钾肥配合施用对湖南稷子株高有不同水平的提升,其中在 $N_2P_1K_1$ (N:180 kg·hm⁻²;P₂O₅:45 kg·hm⁻²;K₂O:30 kg·hm⁻²)处理下湖南稷子株

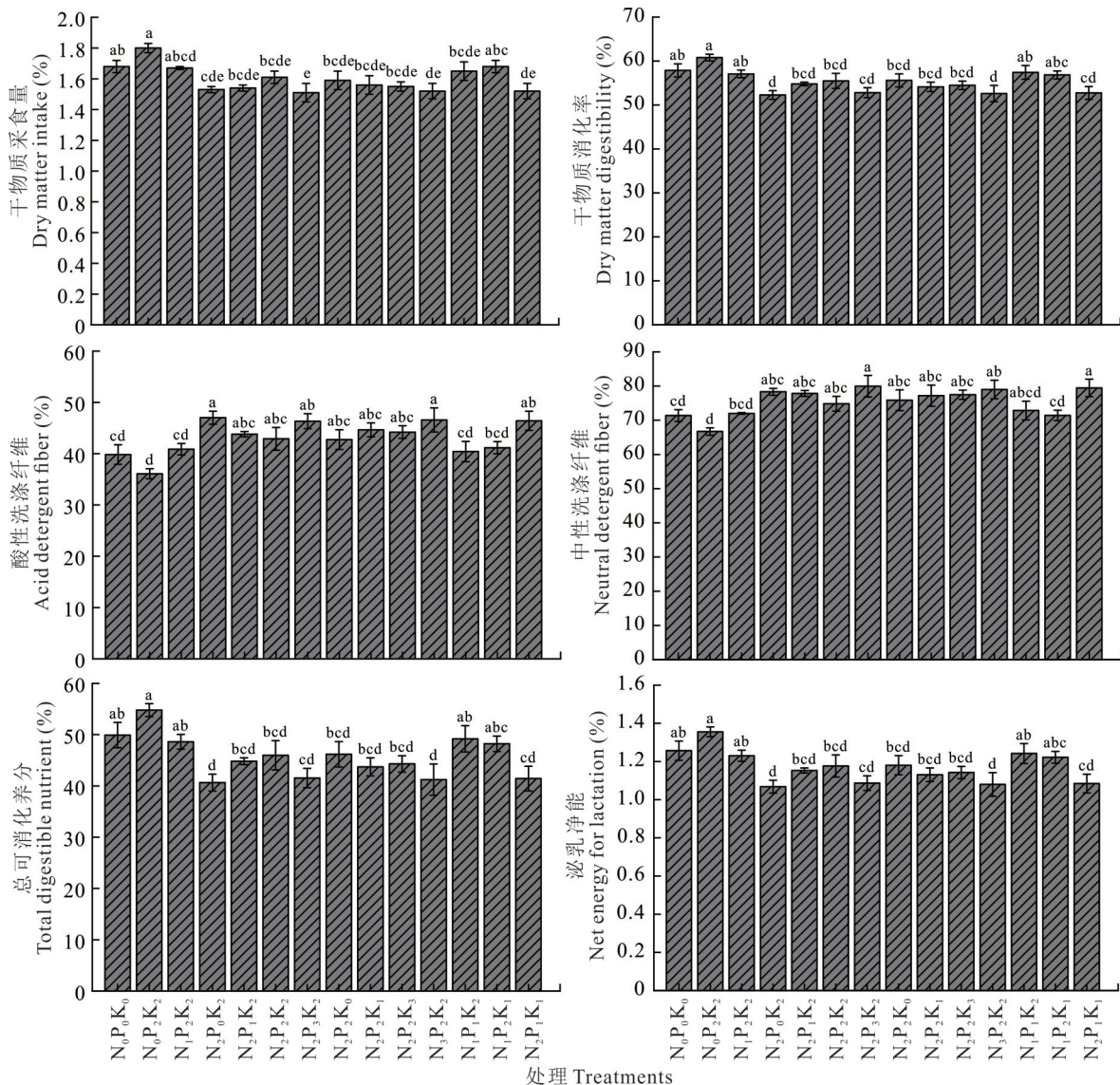


图 6 施肥对湖南稷子抽穗期干物质采食量、干物质消化率、酸性洗涤纤维、中性洗涤纤维、总可消化养分和泌乳净能的影响

Fig. 6 Effect of fertilization on dry matter intake, dry matter digestibility, acid detergent fiber, neutral detergent fiber, total digestible nutrient and net energy for lactation at heading stage of *E. frumentacea*

高最高,为 1.58 m,较不施肥处理(N₀P₀K₀)显著提高 15.83%。说明合理的氮磷钾肥配施可改善湖南稷子的生长环境,促进湖南稷子营养生长。此外,通过对湖南稷子株高达到最大值和最小值的施肥配比分析发现,在不施氮肥时,湖南稷子株高为最低,说明氮肥对湖南稷子的生长起主要作用。

饲草产量是表征作物经济效益的主要指标。氮肥是作物高产的关键因素^[24],能促进作物的生长、发育和代谢^[25]。研究表明,将尿素和磷酸二氢钾以不同比例混施,老芒麦的鲜草产量与干草产量均显著升高,并在最优施肥处理下较不施肥处理分别显著提高了 41.68%、38.56%^[26]。郭宏伟等^[27]对小麦(*Triticum aestivum*)配施氮肥 120 kg·hm⁻²、磷肥 90 kg·hm⁻²、钾肥 135 kg·hm⁻²时发现,小麦的穗数、穗粒数以及产量均表现为不同程度的上升趋势。王秀娟^[28]进行小麦施肥效应试验发现,当施氮肥 135 kg·hm⁻²、磷肥 202.5 kg·hm⁻²、钾肥 81 kg·hm⁻²时,小麦产量最高,为 8326.17 kg·hm⁻²。本研究发现,湖南稷子在 N₂P₁K₁处理下鲜草产量和干草产量均最高,分别达 48352.50 和 9594.50 kg·hm⁻²,相较于不施氮肥处理(N₀P₂K₂)鲜草产量和干草产量显著提高了 70.69%、72.34%,说明适宜的氮磷钾配比可提高湖南稷子的饲草产量。研究中不施氮肥处理(N₀P₂K₂)饲草产量低于不施肥处理 N₀P₀K₀,表明氮肥的施入是影响湖南稷子饲草产量的主要原因,施氮可为湖南稷子生长提供充足营养,促进茎、叶

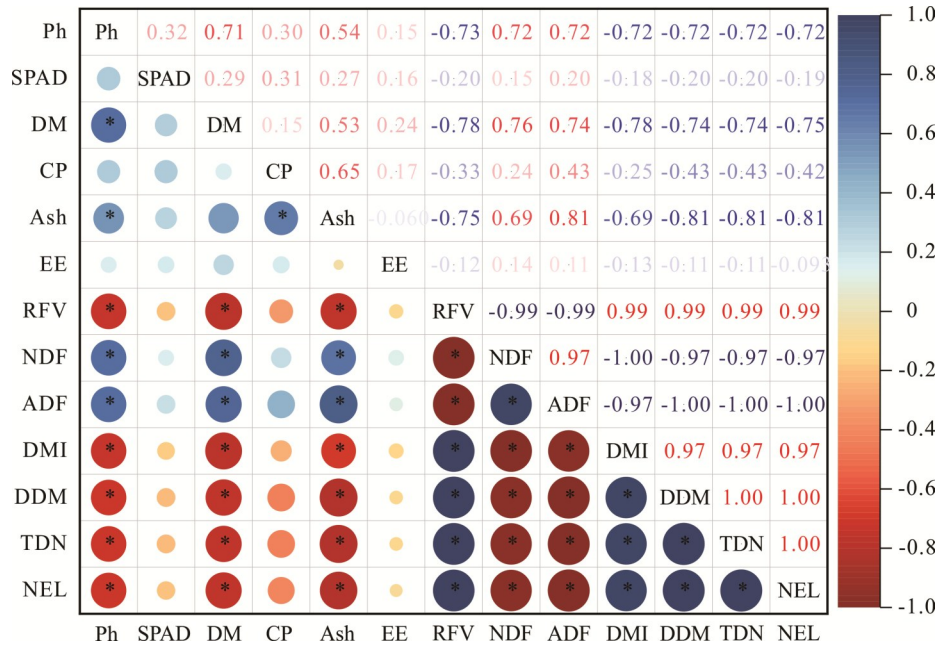


图7 相关性分析

Fig. 7 Correlation analysis

Ph: 株高 Plant height; SPAD: 叶绿素相对含量 Relative chlorophyll content; DM: 干草产量 Hay yield; CP: 粗蛋白 Crude protein; Ash: 粗灰分 Crude ash; EE: 粗脂肪 Ether extract; RFV: 相对饲喂价值 Relative feeding value; NDF: 中性洗涤纤维 Neutral detergent fiber; ADF: 酸性洗涤纤维 Acid detergent fiber; DMI: 干物质采食量 Dry matter intake; DDM: 干物质消化率 Dry matter digestibility; TDN: 总可消化养分 Total digestible nutrients; NEL: 泌乳净能 Net energy for lactation. *: $P < 0.05$.

表3 各因子载荷值主成分特征值和累计贡献率

Table 3 Feature vector of each factor, principal component eigenvalue and accumulative contribution rate

项目 Items	主成分 Principal component			项目 Items	主成分 Principal component		
	I	II	III		I	II	III
酸性洗涤纤维 Acid detergent fiber	0.986	-0.020	-0.114	粗灰分 Crude ash	0.809	0.299	-0.355
总可消化养分 Total digestible nutrients	-0.986	0.019	0.115	株高 Plant height	0.790	0.035	0.219
泌乳净能 Net energy for lactation	-0.986	0.020	0.114	粗蛋白 Crude protein	0.414	0.783	-0.295
干物质消化率 Dry matter digestibility	-0.986	0.020	0.114	叶绿素相对含量 Relative chlorophyll content	0.272	0.637	0.343
相对饲喂价值 Relative feeding value	-0.984	0.110	0.041	粗脂肪 Ether extract	0.155	0.261	0.750
干物质采食量 Dry matter intake	-0.967	0.172	0.001	特征值 Eigenvalue	9.666	1.312	1.196
中性洗涤纤维 Neutral detergent fiber	0.964	-0.193	-0.002	方差贡献率 Variance contribution rate (%)	69.041	9.368	8.542
鲜草产量 Fresh grass yield	0.850	-0.188	0.273	累积贡献率 Accumulative contribution rate (%)	69.041	78.409	86.951
干草产量 Hay yield	0.819	-0.133	0.355				

表4 不同处理公因子值及综合排名

Table 4 Common factor values and comprehensive ranking of different treatments

材料 Materials	Y ₁	Y ₂	Y ₃	Y	排名 Ranking	材料 Materials	Y ₁	Y ₂	Y ₃	Y	排名 Ranking
N ₀ P ₀ K ₀	-3.51	0.35	-1.37	-2.51	13	N ₂ P ₂ K ₀	-0.02	-0.60	0.54	-0.03	9
N ₀ P ₂ K ₂	-7.05	0.48	0.23	-4.80	14	N ₂ P ₂ K ₁	0.89	-0.28	0.25	0.61	8
N ₁ P ₂ K ₂	-1.64	-0.22	-0.18	-1.17	10	N ₂ P ₂ K ₃	1.57	-0.41	0.02	1.05	5
N ₂ P ₁ K ₁	4.18	3.16	-0.30	3.15	1	N ₃ P ₂ K ₂	2.90	-0.65	-1.30	1.83	3
N ₂ P ₁ K ₂	0.98	-0.97	1.20	0.69	7	N ₁ P ₁ K ₂	-2.31	-0.82	1.07	-1.58	11
N ₂ P ₂ K ₂	0.65	1.22	2.42	0.77	6	N ₁ P ₂ K ₁	-2.60	0.61	-1.57	-1.87	12
N ₂ P ₃ K ₂	2.49	-0.48	-0.55	1.63	4	N ₂ P ₀ K ₂	3.47	-1.39	-0.46	2.22	2

发育及光合效率,进而影响干物质积累。因此,湖南稷子饲草产量随着氮肥施入量的增加呈上升趋势,适宜施氮能获得较高的干物质积累量,而过量则不能产生较大贡献。

3.2 氮磷钾配施对湖南稷子营养品质的影响

优质饲草是维持草畜产业发展的先决条件,营养价值是评价饲草是否优良的重要指标,饲草的营养成分含量可反映饲料的饲用价值。其中,粗蛋白、粗脂肪、中性洗涤纤维及相对饲喂价值等指标是主要的饲草营养评价指标^[29-30]。粗蛋白含量高代表作物的营养品质好;相对饲喂价值数值越高,说明牧草品质越好;粗纤维含量低,饲草消化率高。研究证实,适量的施肥能够改善禾本科饲草的营养品质,提高粗蛋白含量,降低粗纤维含量,从而提高饲草的适口性和可消化率^[31]。本试验中,粗蛋白含量在 $N_2P_0K_2$ ($N:180\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$; $P_2O_5:0\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$; $K_2O:60\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)处理组相对较高,较不施肥处理显著提高了30.84%;而在 $N_0P_2K_2$ ($N:0\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$; $P_2O_5:90\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$; $K_2O:60\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)处理下中性洗涤纤维与酸性洗涤纤维均最低,相对饲喂价值最高,说明氮肥的施加虽然可以提高湖南稷子植株的粗蛋白含量,但不施氮肥湖南稷子的营养品质更好,出现此现象的原因可能是氮肥促进了湖南稷子茎秆的发育,增加了木质部的形成,提高了纤维含量。杨开虎等^[32]研究发现,不同梯度氮肥均能提高猫尾草(*Phleum pratense*)粗蛋白含量,降低中性和酸性洗涤纤维含量,在猫尾草抽穗期和结实期,施氮量与牧草粗蛋白的含量呈正相关,在施氮量为 $180\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时,粗蛋白含量最高。赵京东等^[33]研究表明,增施氮肥能显著提高羊草的粗蛋白、粗脂肪、粗灰分含量,极显著降低酸性洗涤纤维与中性洗涤纤维含量,能显著改善羊草的营养质量,并且这些指标对氮肥的反应程度均随施氮量的升高而升高。此外,本研究还发现,氮磷钾配施对湖南稷子相对饲喂价值有显著影响,在 $N_0P_2K_2$ 处理下,相对饲喂价值最高,为84.8,由相关性分析可知,相对饲喂价值与酸性洗涤纤维和中性洗涤纤维呈显著负相关,说明酸性洗涤纤维与中性洗涤纤维含量越低,相对饲喂价值越高,饲草品质越好。总可消化养分是一种衡量牧草营养价值的重要指标,可通过评估饲草中的能量成分来帮助养殖者选择适当的饲料和调整饲养策略。在本试验中, $N_0P_2K_2$ 处理下总可消化养分最高,为54.77%,而 $N_2P_0K_2$ 总可消化养分最低,仅有40.64%。说明适宜的施磷肥能够增加湖南稷子的总可消化养分,而过量施氮肥会促进湖南稷子木质部的形成,降低总可消化养分。

4 结论

$N_2P_1K_1$ 处理下湖南稷子的株高、鲜重和干重最高;氮磷钾肥配施可有效提高湖南稷子植株的营养品质,粗蛋白含量和相对饲喂价值分别在 $N_2P_0K_2$ 和 $N_0P_2K_2$ 处理下最大。综合评价发现, $N_2P_1K_1$ ($N:180\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, $P_2O_5:45\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, $K_2O:30\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)处理下的湖南稷子草产量和品质效应最佳,可作为最适宜施肥模式加以推广和应用。

参考文献 References:

- [1] Raskin D, Wells M S, Grossman J M, et al. Yield and economic potential of spring-planted, pea-barley forage in short-season corn double-crop systems. *Agronomy Journal*, 2017, 109(6): 2486.
- [2] Zhang Y, Cao J, Li G, et al. Metabolomics analysis of root exudates in *Echinochloa frumentacea* seedling stage under saline-alkali stress. *Acta Ecologica Sinica*, 2024, 44(8): 3540-3549.
张杨, 曹靖, 李广, 等. 盐碱胁迫下湖南稷子苗期根系分泌物代谢组学. *生态学报*, 2024, 44(8): 3540-3549.
- [3] Jia X H, Zhang F J, Xie X W, et al. Effects of different nitrogen fertilizers on performance and nutrient uptake of *Echinochloa frumentacea* in saline-alkali land. *Acta Agrestia Sinica*, 2023, 31(1): 272-279.
贾晓辉, 张峰举, 谢小伟, 等. 施用不同氮肥对盐碱地湖南稷子生产性能以及养分吸收的影响. *草地学报*, 2023, 31(1): 272-279.
- [4] 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(10): 107589.
- [5] Zhao L, Wang M Y, Mao P S, et al. Selected nitrogen and phosphorus fertilizer applications affect seed yield, seed yield components and roots of *Elymus sibiricus*. *Acta Agrestia Sinica*, 2012, 20(4): 662-668.
赵利, 王明亚, 毛培胜, 等. 不同氮磷处理对老芒麦种子产量、产量组分及根系的影响. *草地学报*, 2012, 20(4): 662-668.
- [6] Zhang Y L, Yu T F, Hao F, et al. Effects of fertilization and legume-grass ratio on forage yield and NPK utilization efficiency.

Acta Prataculturae Sinica, 2020, 29(11): 91–101.

张永亮, 于铁峰, 郝凤, 等. 施肥与混播比例对豆禾混播牧草产量及氮磷钾利用效率的影响. 草业学报, 2020, 29(11): 91–101.

- [7] Fan Y F, Sun J Y, Gao J L, *et al.* Effects of potassium fertilizer on photosynthetic, fluorescent properties and potassium absorption efficiency of maize. *Molecular Plant Breeding*, 2023, 21(1): 337–348.
范雅芳, 孙继颖, 高聚林, 等. 钾肥对玉米光合、荧光特性及钾素吸收效率的影响. 分子植物育种, 2023, 21(1): 337–348.
- [8] Lu J Y. Effects of N and P fertilizations on leaf nutrient resorption of alfalfa at different growth stages in the Loess Plateau. Lanzhou: Lanzhou University, 2019.
陆皎云. 施氮磷肥对黄土高原不同生长阶段紫花苜蓿叶片养分重吸收的影响. 兰州: 兰州大学, 2019.
- [9] You Y L, Li Y, Zhao H M, *et al.* Effects of nitrogen and phosphate fertilizer application on yield and forage quality of forage triticale on the Haihe Plain. *Acta Prataculturae Sinica*, 2020, 29(3): 137–146.
游永亮, 李源, 赵海明, 等. 海河平原区施氮磷肥对饲用小黑麦生产性能及营养品质的影响. 草业学报, 2020, 29(3): 137–146.
- [10] Meng K, Li X Y, Ji X T, *et al.* Effect of nitrogen, phosphorus and potassium fertilizer on yield of Caoyuan No. 3 alfalfa. *Chinese Journal of Grassland*, 2019, 41(3): 107–114.
孟凯, 李星月, 冀晓婷, 等. 氮、磷、钾配施对草原3号苜蓿干草产量的影响. 中国草地学报, 2019, 41(3): 107–114.
- [11] Xue Y X, Liu G H, Wang X Y. Effects of combined application of nitrogen, phosphate and potash fertilizers on plant height, photosynthetic rate and yield of corn under drip irrigation. *Journal of Gansu Agricultural University*, 2020, 55(6): 77–85.
薛垠鑫, 刘根红, 王晓钰. 滴灌条件下氮磷钾肥配施对玉米株高、光合速率及产量的影响. 甘肃农业大学学报, 2020, 55(6): 77–85.
- [12] Li H R, Qiu W W, Ma W Q, *et al.* Effects of different types of fertilizers on yield and quality of sugarcane. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2014, 42(10): 83–85.
李恒锐, 邱文武, 马文清, 等. 不同类型肥料对甘蔗产量及品质的影响. 江苏农业科学, 2014, 42(10): 83–85.
- [13] Tang L F. Effects of different fertilization treatments on soil nutrients and wheat yield. *Bulletin of Agricultural Science and Technology*, 2019(7): 115–116.
唐岭峰. 不同施肥处理对土壤养分和小麦产量的影响研究. 农业科技通讯, 2019(7): 115–116.
- [14] Zhao J F, He H Y, Zhang M Z, *et al.* Study on the recommended fertilization amount of NPK for cut herbaceous peony (*Paeonia lactiflora* Pall.) based on ‘3414’ experiment. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2024(5): 70–77.
赵俊福, 何晗颖, 张明泽, 等. 基于“3414”试验的切花芍药氮磷钾推荐施肥量研究. 中国土壤与肥料, 2024(5): 70–77.
- [15] Zang Q, Wang G H, Zhang M J, *et al.* Effects of organic and inorganic fertilizers and temperature increase at heading stage on starch synthesis-related enzyme activities and starch quality formation in rice grains. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2022, 36(10): 2072–2083.
臧倩, 王光华, 张明静, 等. 有机无机肥料及抽穗期气温升高对水稻籽粒淀粉合成相关酶活性及淀粉品质形成的影响. 核农学报, 2022, 36(10): 2072–2083.
- [16] Wei K T, Yu X J, Bai M M, *et al.* Effect of mixed sowing ratio on the forage yield and quality of grazing mixed sowing grassland in semi-arid area. *Chinese Journal of Grassland*, 2022, 44(9): 56–65.
魏孔涛, 鱼小军, 白梅梅, 等. 混播比例对半干旱区放牧型混播草地草产量及品质的影响. 中国草地学报, 2022, 44(9): 56–65.
- [17] Niklas K J. Modelling below- and above-ground biomass for non-woody and woody plants. *Annals of Botany*, 2005, 95(2): 315–321.
- [18] Zhang W, Li X, Hou Y. A global meta-analysis of the effects of plant diversity on biomass partitioning in grasslands. *Environmental Research Letters*, 2021, 16(6): 64083–64089.
- [19] Wang B, Li M Y, Wang X P, *et al.* Combined ploughing and tilling to improve degraded alfalfa (*Medicago sativa*) stands in a semi-arid region. *Acta Prataculturae Sinica*, 2022, 31(1): 107–117.
王斌, 李满有, 王欣盼, 等. 深松浅旋对半干旱区退化紫花苜蓿人工草地改良效果研究. 草业学报, 2022, 31(1): 107–117.
- [20] Hao X Y, Yang T, Zhang J J, *et al.* Effects of different nitrogen, phosphorus and potassium treatments on yield, agronomic traits and economic benefit of chickpea (*Cicer arietinum* L.). *Xinjiang Agricultural Sciences*, 2023, 60(3): 555–566.
郝曦煜, 杨涛, 张俊杰, 等. 不同氮磷钾处理对鹰嘴豆产量、农艺性状及经济效益的影响. 新疆农业科学, 2023, 60(3):

555—566.

- [21] Xue X H, Chen J, Zhu X M. Effects of nitrogen, phosphorus and potassium on yield and agronomic characters of wheat cultivar Chuannong 10. *Guizhou Agricultural Sciences*, 2014, 42(5): 38—41.
薛晓辉, 陈静, 朱雪梅. 氮磷钾对川农10号小麦产量及农艺性状的影响. *贵州农业科学*, 2014, 42(5): 38—41.
- [22] Li C R, Luo Y Y, Wang Q N. Effects of different fertilization and soil moisture treatments on growth and yield of forage grasses in Xikang-Tibet Plateau. *Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica*, 2020, 29(7): 990—999.
李春容, 罗言云, 王倩娜. 不同施肥和土壤保湿处理对康藏高原牧草生长和产量的影响. *西北农业学报*, 2020, 29(7): 990—999.
- [23] Pan D F, Zhang Y X, Shen Z B, *et al.* Influences of fertilization period on growth characteristic and seed yield of four grass family forages. *Heilongjiang Agricultural Sciences*, 2009(5): 97—100.
潘多锋, 张月学, 申忠宝, 等. 施肥期对4种禾本科牧草生长特性及种子产量的影响. *黑龙江农业科学*, 2009(5): 97—100.
- [24] Yu F T, Zhang A M. Progress in the genetic studies of plant nutritional traits. *Crops*, 1998(1): 6—9.
于福同, 张爱民. 植物营养性状遗传研究的进展. *作物杂志*, 1998(1): 6—9.
- [25] Dhindsa R S, Pamela P D, Thorpe T A. Leaf senescence: Correlated with increased levels of membrane permeability and lipid peroxidation, and decreased levels of superoxide dismutase and catalase. *Journal of Experimental Botany*, 1981, 32(1): 93—101.
- [26] You M H, Liu J P, Bai S Q, *et al.* Effects of mixed application of fertilizers and herbicides on production performance of *Elymus sibiricus*. *Acta Prataculturae Sinica*, 2010, 19(5): 283—286.
游明鸿, 刘金平, 白史且, 等. 肥料和除草剂混施对老芒麦生产性能的影响. *草业学报*, 2010, 19(5): 283—286.
- [27] Guo H W, Chen X L, Liu Z S, *et al.* Effects of fertilization amount on yield and nutrient uptake of different wheat cultivars. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2023, 51(24): 38—43.
郭宏伟, 陈晓璐, 刘子山, 等. 施肥量对不同小麦品种产量及养分吸收的影响. *江苏农业科学*, 2023, 51(24): 38—43.
- [28] Wang X J. Effects of different fertilization rates and methods on the growth and yield of wheat. *Special Economic Animals and Plants*, 2024, 27(2): 25—27.
王秀娟. 施肥量和施肥方式对小麦生长发育和产量的影响. *特种经济动植物*, 2024, 27(2): 25—27.
- [29] Feng Q, Wang B, Wang T F, *et al.* Effects of mixed sowing of vetch and oat on production performance and nutrient quality of grassland. *Acta Agrestia Sinica*, 2022, 30(12): 3439—3446.
冯琴, 王斌, 王腾飞, 等. 不同播种量毛苕子与燕麦混播对草地生产性能及营养品质的影响. *草地学报*, 2022, 30(12): 3439—3446.
- [30] Carr P M, Horsle R D, Poland W W. Barley, oat, and cereal-pea mixtures as dryland forages in the northern Great Plains. *Agronomy Journal*, 2004, 96(3): 677—684.
- [31] Zhou H P, Hao B P, Guan C L, *et al.* Effect of fertilizer application on nutritive quality and growth of hybrid sorghum grass. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2009, 17(1): 60—63.
周怀平, 郝保平, 关春林, 等. 施肥对饲草高粱生长及营养品质的影响. *中国生态农业学报*, 2009, 17(1): 60—63.
- [32] Yang K H, Yu L, Zhang Q B, *et al.* Effects of nitrogen application on *Phleum pratense* pasture's forage yield and quality. *Pratacultural Science*, 2015, 32(12): 2071—2077.
杨开虎, 于磊, 张前兵, 等. 施氮对猫尾草栽培草地饲草产量和品质的影响. *草业科学*, 2015, 32(12): 2071—2077.
- [33] Zhao J D, Song Y T, Xu X L, *et al.* Effects of water and fertilizer addition on forage quality of *Leymus chinensis* artificial grassland of agro-pastoral ecotone in Northwest Liaoning. *Chinese Journal of Grassland*, 2022, 44(4): 85—94.
赵京东, 宋彦涛, 徐鑫磊, 等. 水肥添加对辽西北农牧交错带羊草人工草地牧草品质的影响. *中国草地学报*, 2022, 44(4): 85—94.