

DOI:10.11686/cyxb2025309

http://cyxb.magtech.com.cn

马江萍, 曹立娟, 张文文, 等. 补播与施磷对退化苜蓿草地生产力及土壤理化性质的影响. 草业学报, 2026, 35(7): 92—104.

MA Jiang-ping, CAO Li-juan, ZHANG Wen-wen, *et al.* Effects of reseeding and phosphorus application on productivity and soil in improvement of degraded alfalfa stands. Acta Prataculturae Sinica, 2026, 35(7): 92—104.

补播与施磷对退化苜蓿草地生产力及土壤理化性质的影响

马江萍^{1,2,3}, 曹立娟⁴, 张文文⁵, 赵梦雨⁵, 王腾飞^{1,2,3}, 张译尹^{1,2,3}, 王斌^{1,2,3}, 李佳旺^{1,2,3}, 王小兵^{1,2,3}, 兰剑^{1,2,3*}

(1. 宁夏大学林业与草业学院, 宁夏 银川 750021; 2. 宁夏草业工程研究中心, 宁夏 银川 750021; 3. 农业农村部饲草高效生产模式创新重点实验室, 宁夏 银川 750021; 4. 宁夏回族自治区草原工作站, 宁夏 银川 750021; 5. 石嘴山市惠农区农业技术推广服务中心, 宁夏 石嘴山 753000)

摘要:退化草地修复是草地复壮更新以及实现生态可持续发展的关键,补播和施磷是恢复和提升退化草地生产力的重要措施,针对黄土高原雨养区苜蓿草地中度退化问题,本研究于2018—2020年以苇状羊茅为试验材料,采用双因素随机区组试验设计,设置3个补播量(R_1 : 20.2 kg·hm⁻²; R_2 : 40.4 kg·hm⁻²; R_3 : 60.6 kg·hm⁻²),4个施磷梯度(F_0 : 0 kg·hm⁻²; F_1 : 75 kg·hm⁻²; F_2 : 150 kg·hm⁻²; F_3 : 225 kg·hm⁻²),对草地生产力、产量稳定性、可持续性 & 土壤养分进行研究。结果表明,补播和施磷均可在一定程度上促进牧草的株高和密度;2018年干草产量在 R_3F_3 处理时为最高,达9.3 t·hm⁻²,2019—2020年处理为 R_2F_2 时干草产量和总干草粗蛋白产量均达到最高(11.1、11.4 t·hm⁻²和2.4、2.2 t·hm⁻²),较 F_0R_1 分别提高了60.4%、51.8%和62.5%、59.1%;且该处理的变异系数较 F_0R_1 分别降低了50.0%和40.2%,产量可持续指数则分别提高了4.7%和7.7%。补播和施磷对0~20 cm和20~40 cm的土壤理化性质均产生影响,土壤有机质、全氮含量和土壤容重随补播量和施肥量的增加均先升高后降低,土壤孔隙度随补播量的变化趋势与之相反,随施磷量的增加而上升。综上,黄土高原雨养区退化苜蓿草地苇状羊茅补播量为40.4 kg·hm⁻²、施磷量为150 kg·hm⁻²是提高草地生产力、增加草地植被覆盖度、促进草地可持续生产和改良土壤环境的最佳补播量和施磷量。

关键词:退化苜蓿地;补播;施磷;生产力;产量稳定性;土壤理化性质

Effects of reseeding and phosphorus application on productivity and soil in improvement of degraded alfalfa stands

MA Jiang-ping^{1,2,3}, CAO Li-juan⁴, ZHANG Wen-wen⁵, ZHAO Meng-yu⁵, WANG Teng-fei^{1,2,3}, ZHANG Yi-yin^{1,2,3}, WANG Bin^{1,2,3}, LI Jia-wang^{1,2,3}, WANG Xiao-bing^{1,2,3}, LAN Jian^{1,2,3*}

1. College of Forestry and Grassland, Ningxia University, Yinchuan 750021, China; 2. Ningxia Grassland and Pasture Engineering Research Center, Yinchuan 750021, China; 3. Key Laboratory of Innovation of Forage Efficient Production Model, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Yinchuan 750021, China; 4. Grassland Workstation of Ningxia Hui Autonomous Region, Yinchuan 750021, China; 5. Shizuishan Huinong District Agricultural Technology Extension Service Center, Shizuishan 753000, China

Abstract: The restoration of degraded grassland is the key to the rejuvenation and renewal of grassland and the

收稿日期:2025-07-22;改回日期:2025-09-29

基金项目:宁夏高等学校一流学科建设(草学学科)项目(NXYLXK2017A01),草-畜禽种养结合生态循环模式研究与示范项目(2022BEG02011)和“一年两熟”人工草地可持续发展模式研究与示范项目(2021BBF02001)资助。

作者简介:马江萍(1998—),女,甘肃陇西人,在读硕士。E-mail: 15193473869@163.com

* 通信作者 Corresponding author. E-mail: ndlanjian@163.com

realization of ecological sustainable development. Reseeding and phosphorus application are important measures to restore and improve the productivity of degraded grassland. In order to address the problem of moderate degradation of alfalfa (*Medicago sativa*) stands in the rain-fed area of the Loess Plateau, this study used *Festuca arundinacea* as the experimental renovation species. The research was carried out from 2018 to 2020, using a two-factor randomized block experimental design, and three reseeded rates (R_1 : $20.2 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$; R_2 : $40.4 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$; R_3 : $60.6 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$) and a gradation of four phosphorus application rates (F_0 : $0 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$; F_1 : $75 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$; F_2 : $150 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$; F_3 : $225 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$). The grassland productivity, yield stability, sustainability and soil nutrients were studied. The results showed that reseeded and phosphorus application significantly promoted the plant height and density of forage. In 2018, the hay yield was highest in the R_3F_3 treatment, at $9.3 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$. In 2019–2020, the hay yield and crude protein yield of total hay were highest in the R_2F_2 treatment (11.1 、 $11.4 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$ 和 2.4 、 $2.2 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$, respectively), and these values were, respectively, 60.4% , 51.8% and 62.5% , 59.1% higher than those of F_0R_1 . The coefficients of variation of this treatment were 50.0% and 40.2% lower than those of F_0R_1 , respectively, and the yield sustainability index was increased by 4.7% and 7.7% , respectively. The soil physical and chemical properties of 0–20 cm and 20–40 cm horizons were affected by reseeded and phosphorus application. Soil organic matter, total nitrogen content and soil bulk density increased initially and then decreased with increased reseeded and fertilizer application rates. By contrast, the pattern of change in soil porosity with reseeded rate was the opposite, and these properties increased with increased phosphorus application rate. In summary, the reseeded rate of $40.4 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ and phosphorus application rate of $150 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ were the best treatments for improving grassland productivity, increasing grassland vegetation cover, sustainability of grassland production and improving the soil environment in degraded alfalfa grassland in the rain-fed area of the Loess Plateau.

Key words: degraded alfalfa grassland; reseeded; phosphorus application; productivity; yield stability; soil physicochemical properties

栽培草地是生态系统的重要组成部分,在提供草畜产品的同时,还是人类社会的生态环境屏障,也是维持区域生态安全及农业生产力的重要自然资源^[1–2]。黄土高原地区多为雨养农业,地形复杂,水土流失严重,面临环境保护和可持续发展的重大挑战^[3]。21 世纪以来,以控制大规模水土流失、提高贫瘠土壤肥力为目标的退耕还林(草)工程在黄土高原雨养区得到了广泛实施^[4]。紫花苜蓿(*Medicago sativa*)作为多年生豆科牧草,因其产草量高、营养丰富、适口性好,在涵养水源、培肥地力、生态恢复等方面发挥着重要作用^[5]。然而,随着苜蓿生长年限的持续增长,苜蓿草地的经济和生态效益达到顶峰时,其产量和质量开始急剧下降,发生不同程度的退化,严重威胁着草地生产力的稳定及生态功能的可持续发挥^[6]。因此,有必要探索提高退化紫花苜蓿草地生态功能和维持可持续生产的有效途径。

补播是在短期内改善牧草供给、恢复退化草地生态和经济可持续发展的有效措施之一,对提高草地植被盖度、加快植被恢复具有积极作用^[3]。同时,通过补播可促进退化草地植物生长,改善植被群落结构,维持生物多样性,实现草畜均衡发展^[7–8]。由于禾本科牧草具有较强的保水能力,补播后可以提高土壤氮素利用效率,减轻豆科牧草化感作用对苜蓿生长的抑制,促进牧草对磷、钾的吸收^[9–11]。同时,利用禾本科与豆科牧草的生态位互补效应,可提高群体资源利用效率,增加草地稳定性^[9–10]。研究表明,在退化苜蓿草地补播多年生黑麦草(*Lolium perenne*)、披碱草(*Elymus nutans*)、苇状羊茅(*Festuca arundinacea*)、无芒雀麦(*Bromus inermis*)和鸭茅(*Dactylis glomerata*),其中,补播苇状羊茅的产量最高,可达到 $14.04 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$;而补播鸭茅的饲草营养品质改善幅度最明显^[12]。在黄土高原丘陵地区补播禾草可改良退化苜蓿地的土壤理化性质,提高土壤有机质和全氮含量,增加土壤微生物活性^[3]。苇状羊茅作为多年生禾本科牧草,在草地改良中发挥着重要作用^[12]。然而,有研究发现,随着补播量的增加,退化草地植物的竞争强度也随之增强,造成生产力下降^[13]。因此,研究退化苜蓿草地苇状羊茅适宜

补播量对维持人工草地生产力和生态可持续性具有重要意义。在退化人工草地修复过程中,牧草生长所需养分的供应是一个关键问题。合理施肥不仅能够保证土壤养分的供给,还可维持生态系统物质循环平衡,实现牧草可持续生产^[7,14]。其中,磷素具有显著提高草地生产力和延缓草地退化的重要作用^[15]。种植多年的苜蓿由于其自身可以固氮,生产力和营养价值主要受磷限制的影响^[16]。施磷肥可以有效提高土壤全磷、速效磷的含量,改善土壤肥力。同时,施磷肥还可以增加苜蓿叶片中磷含量,促进苜蓿生长,使得饲草实现高产优质^[15]。但随着施磷量的增加,磷肥的利用率呈降低趋势。此外,在豆科与禾本科牧草种植体系中两者具有不同的冠层和根系结构,可能会引起牧草种间对水分和土壤养分的竞争,导致产量稳定性下降^[17-18]。因此,需要进一步优化退化苜蓿草地苇状羊茅的补播量及最佳施磷量,促进人工草地生态系统的可持续生产。基于此,本试验在退化苜蓿草地补播3种播量苇状羊茅,并设置4个施磷水平,研究补播和施磷对草地生产性能、群落稳定性以及土壤养分的影响,以期退化苜蓿草地复壮更新和生态可持续发展提供科学指导和技术支撑。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于2018、2019、2020年在宁夏隆德县神林乡(N 35°21', E 106°15', 海拔 2100 m)进行,地形东高西低,属中温带季风气候。如图1所示,试验期间,3年年降水量分别为585、627、717 mm,多年平均降水量534 mm。年均气温6.6℃,平均日照时数2303.5 h,无霜期125 d左右。试验样地为建植7年的陇东苜蓿(*M. sativa* cv. Longdong)草地,于2011年播种,播种量为22.5 kg·hm⁻²,行距为15 cm,播种深度2~3 cm。2018年该退化苜蓿草地有明显斑块,其中苜蓿覆盖度为60%~70%,草地生产力下降30%左右,属中度退化草地,无灌溉条件。土壤类型为黑垆土,土壤有机质、碱解氮、速效磷和速效钾含量分别为5.88 g·kg⁻¹、29.75 mg·kg⁻¹、18.89 mg·kg⁻¹和11.08 mg·kg⁻¹, pH值7.7, 0~20 cm土壤容重为1.53 g·cm⁻³。

1.2 试验设计

试验于2018年4月—2020年10月开展,采用二因素随机区组设计,设置4个P肥施用量水平(F₀: 0 kg·hm⁻²; F₁: 75 kg·hm⁻²; F₂: 150 kg·hm⁻²; F₃: 225 kg·hm⁻²),以及3个补播量水平(R₁: 20.2 kg·hm⁻²; R₂: 40.4 kg·hm⁻²; R₃: 60.6 kg·hm⁻²),共12个处理,每个处理4次重复,总计48个小区,每个小区面积为60 m²(6 m×10 m);在2018年4月15日进行补播试验,首先施尿素150 kg·hm⁻²(总氮≥46.0%)和硫酸钾150 kg·hm⁻²(K₂O≥50%),然后采用撒播方式在裸露斑块上补播苇状羊茅,再用旋耕机浅旋3~4 cm后镇压。供试磷肥为:过磷酸钙(P₂O₅≥12.0%)。补播多年生禾草品种为‘法恩’苇状羊茅,其千粒重为2.02 g,发芽率85%。牧草每年收获两茬(2018年6月20日、9月2日;2019年6月3日、8月22日;2020年6月5日、8月25日)。

1.3 测定指标及方法

1.3.1 农艺性状指标测定 下列各农艺性状指标均在紫花苜蓿初花期(苇状羊茅是抽穗期)刈割时测定。

株高:每个小区随机选取有代表性的30株紫花苜蓿和10个苇状羊茅单茎,测定其从地面至顶端的绝对高度,取平均值。

密度:每个小区随机取有代表性的1 m样段,测定样段内紫花苜蓿和苇状羊茅的密度,取平均值。

1.3.2 产量测定 干草产量:在每个小区垂直行向取6 m²样方,留茬高度10 cm,每个小区6次重复,将所采集的紫花苜蓿和苇状羊茅鲜草分开,风干至恒重后称其干重,换算为每hm²干草产量。

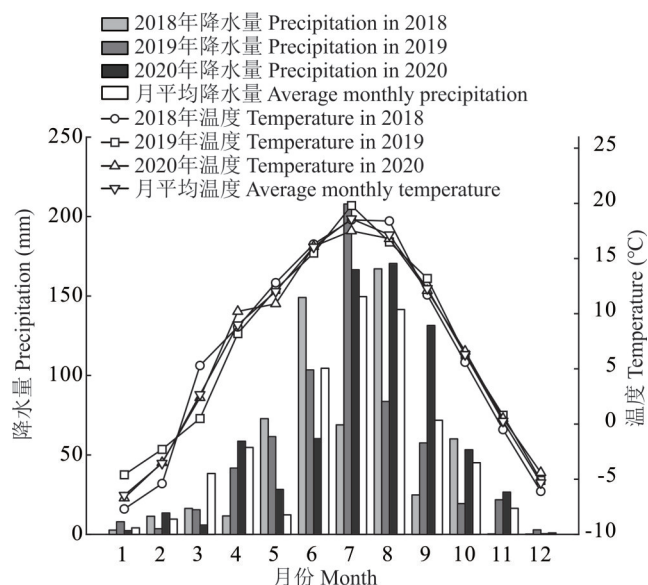


图1 试验区不同月份降水量和温度

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

1.3.3 粗蛋白产量测定 粗蛋白产量(crude protein yield, CPY)计算公式如下^[19]:

$$CPY = CP \times DM$$

式中:CP 为牧草粗蛋白(crude protein),使用极光手持近红外仪(SN 117618,德国)测定,单位为%;DM 为混合牧草干物质产量(dry yield),单位为 $t \cdot hm^{-2}$ 。

1.3.4 产量稳定性和可持续性 用变异系数(coefficient of variation, CV)和产量可持续指数(sustainable yield index, SYI)评价种植制度生产力的稳定性,计算公式如下^[18]:

$$CV_{DM} = \sigma_{DM} / \bar{Y}_{DM} \times 100$$

$$CV_{CPY} = \sigma_{CPY} / \bar{Y}_{CPY} \times 100$$

$$SYI_{DM} = (\bar{Y}_{DM} - \sigma_{DM}) / Y_{max}$$

$$SYI_{CPY} = (\bar{Y}_{CPY} - \sigma_{CPY}) / Y_{max}$$

式中: CV_{DM} 和 CV_{CPY} 分别为混合牧草干物质产量和粗蛋白产量变异系数; σ 为标准差,单位为 $kg \cdot hm^{-2}$, $\bar{Y}_{DM}$ 和 $\bar{Y}_{CPY}$ 为混合牧草平均干草产量和粗蛋白产量,单位为 $t \cdot hm^{-2}$; SYI_{DM} 和 SYI_{CPY} 分别为混合牧草产量和粗蛋白产量可持续指数; Y_{max} 为所有年份中产量的最大值,单位为 $t \cdot hm^{-2}$ 。 CV 越小,产量稳定性越高; SYI 从 0 到 1, SYI 越大,表明具有越高的产量可持续性。

1.3.5 土壤理化指标测定 均在退化苜蓿草地补播苇状羊茅建植第 3 年,即于 2020 年测定。

土壤容重、土壤孔隙度:于 9 月中旬在每个处理小区选取 5 点,用环刀法^[20]取 0~20 cm、20~40 cm 土壤测定。

土壤有机质含量:采用重铬酸钾容量法测定^[20]。

土壤全氮:于 9 月中旬在每个处理小区选取 5 点,分别取 0~20 cm、20~40 cm 深度的土壤样本,利用凯氏定氮法测定^[5]。

1.4 数据统计分析

利用 Microsoft Excel 2019 整理数据,株高、密度是两茬牧草平均值,干草产量、粗蛋白产量是两茬牧草总和值。用 SPSS Statistics 25.0 软件进行方差分析、显著性分析和 Duncan 多重比较,用 Origin 2021 作图。通过结构方程模型(structural equation modeling, SEM)分析总密度、土壤养分对干草产量和产量稳定性以及可持续性的影响,分析前对所有指标进行 Z-score 标准化处理,借助 Amos 27.0 软件进行 SEM 拟合分析。

2 结果与分析

2.1 补播—施磷对牧草生长发育的影响

2.1.1 补播—施磷对苜蓿和苇状羊茅株高的影响 2018 年苜蓿株高在 F_2R_3 处理下最高(76.1 cm),显著高于 F_0R_1 处理($P < 0.05$),其次为 F_3R_3 、 F_2R_2 ;2019 年在 F_3R_1 处理下最高(77.1 cm),其次为 F_3R_2 、 F_2R_2 ;2020 年在 F_2R_2 处理下达最高,为 74.0 cm,显著高于其他各处理($P < 0.05$)。不同补播量下,2018 年 R_2 、 R_3 较 R_1 分别提高 5.0%、10.8%;2019 年 R_3 较 R_1 、 R_2 分别提高 0.8%、3.7%;2020 年分别提高 0.4%、4.5%。不同施磷量下,2018 年 F_1 、 F_2 和 F_3 较 F_0 分别增加 9.6%、20.1%、21.3%;2019 年分别增加 9.1%、19.4%、23.4%;2020 年分别增加 6.1%、19.8%、18.3%。补播—施磷均不同程度提高了苜蓿株高,苇状羊茅补播量增加时其苜蓿株高整体表现为先升高后降低,随施磷量增加株高整体上呈升高趋势(图 2)。

2018 年苇状羊茅株高在 F_3R_2 处理下最高(107.5 cm),显著高于 F_0R_1 处理($P < 0.05$),其次为 F_3R_3 、 F_2R_3 ;2019 和 2020 年均在 F_2R_2 处理下达最高,分别为 108.0、102.8 cm。其补播量增加,株高总体呈先升高后降低趋势;随着施磷量的增加,株高较对照均表现为上升趋势(图 2)。

2.1.2 补播—施磷对苜蓿和苇状羊茅密度的影响 2018 和 2019 年苜蓿密度均在 F_2R_2 处理下达到最高(图 3),分别为 514.0 和 501.0 个 $\cdot m^{-2}$,2020 年苜蓿密度随补播量的增加先升高后降低,随施磷量的增加先升后降,在 F_2R_2 处理下最高(470.0 个 $\cdot m^{-2}$),显著高于 F_0R_1 处理($P < 0.05$)。不同补播量下,2018 年 R_1 和 R_2 较 R_3 分别提高

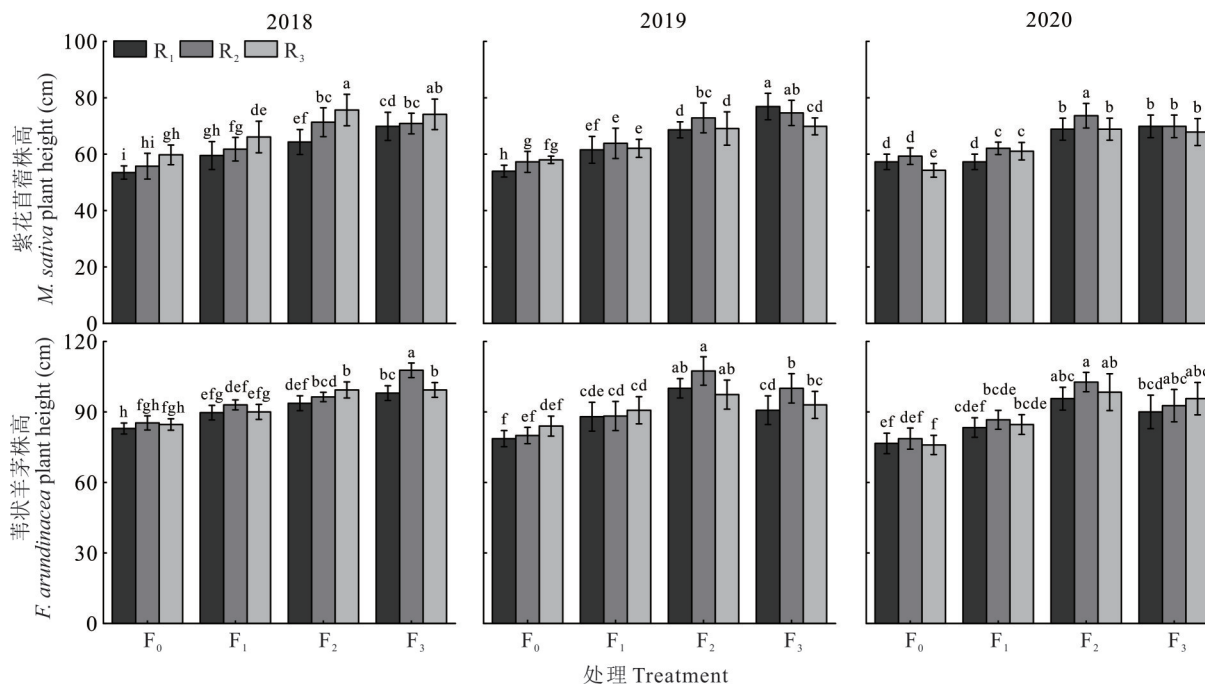


图2 补播-施磷对牧草株高的影响

Fig. 2 Effect of reseeding-phosphorus application on plant height of forage

不同小写字母代表各处理间差异显著 ($P < 0.05$), 下同。Different lowercase letters represent significant differences among different treatments ($P < 0.05$). The same below.

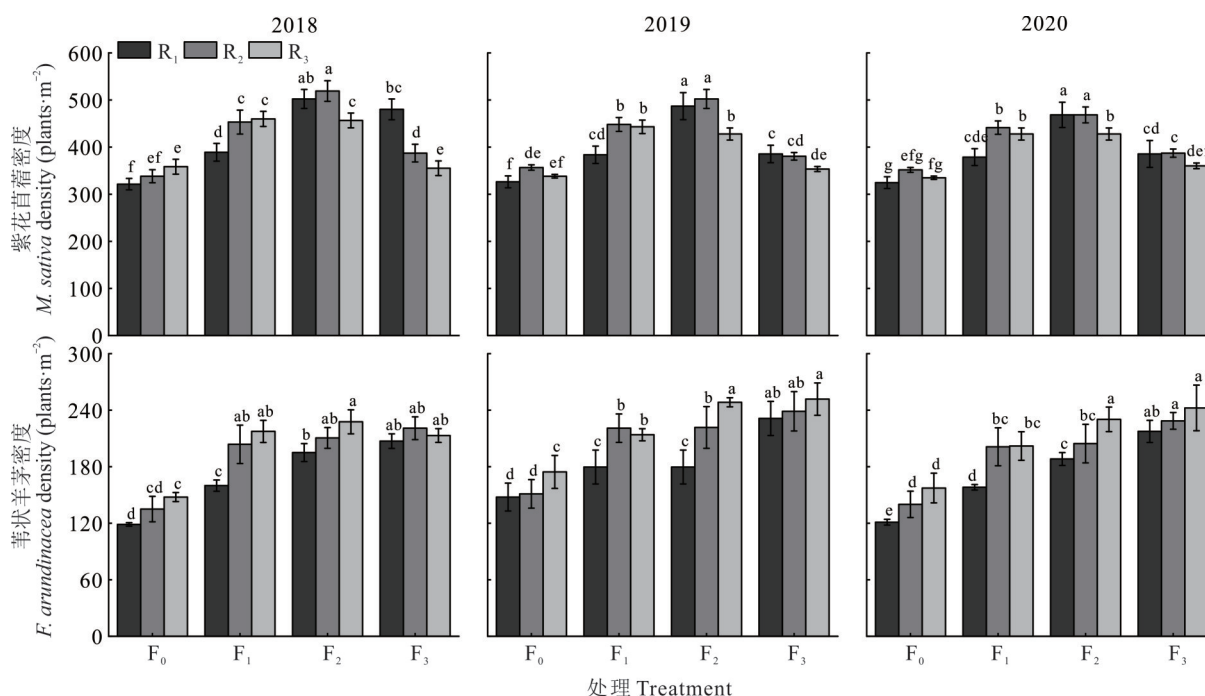


图3 补播-施磷对牧草密度的影响

Fig. 3 Effect of reseeding-phosphorus application on forage density

3.3%、3.4%；2019年分别提高1.3%、7.4%；2020年分别提高0.3%、6.4%。不同施磷量下，2018年F₁、F₂和F₃较F₀分别增加23.2%、31.5%和17.4%；2019年分别提高20.0%、28.3%和9.5%；2020年分别增加19.1%、26.5%和11.2%。苇状羊茅补播量增加时其紫花苜蓿密度表现为先升高后降低，随施磷量增加的密度整体上也呈先升高后降低的趋势。

2018年苇状羊茅密度在 F_2R_3 处理下达到最高,为 $227.0\text{个}\cdot\text{m}^{-2}$,2019和2020年在 F_3R_3 处理下均为最高,分别达 253.0 和 $249.0\text{个}\cdot\text{m}^{-2}$,其次为 F_2R_3 ,均显著高于 F_0R_1 处理($P<0.05$)。随补播量的增加,密度整体上呈增加趋势;随着施磷量的增加,密度表现为增加趋势(图3)。

2.2 补播—施磷对草地生产的影响

2018年苜蓿干草产量均随补播量和施磷量的增加而增加(图4),其中在 F_3R_3 处理下最高,为 $7.1\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$;2019和2020年苜蓿干草产量均随补播量和施磷量的增加呈先升高后降低趋势,且均在 F_2R_2 处理下最高,分别为 9.0 和 $10.1\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。2018年 R_2 、 R_3 与 R_1 分别相差 0.1 和 $0.4\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$;2019年分别相差 0.4 和 $0.2\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$;2020年分别相差 0.3 和 $0.2\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。2018年 F_1 、 F_2 和 F_3 较 F_0 分别增加 25.8% 、 35.4% 和 42.2% ;2019年分别增加 25.4% 、 48.8% 和 43.9% ;2020年分别增加 116.4% 、 44.0% 和 39.6% 。

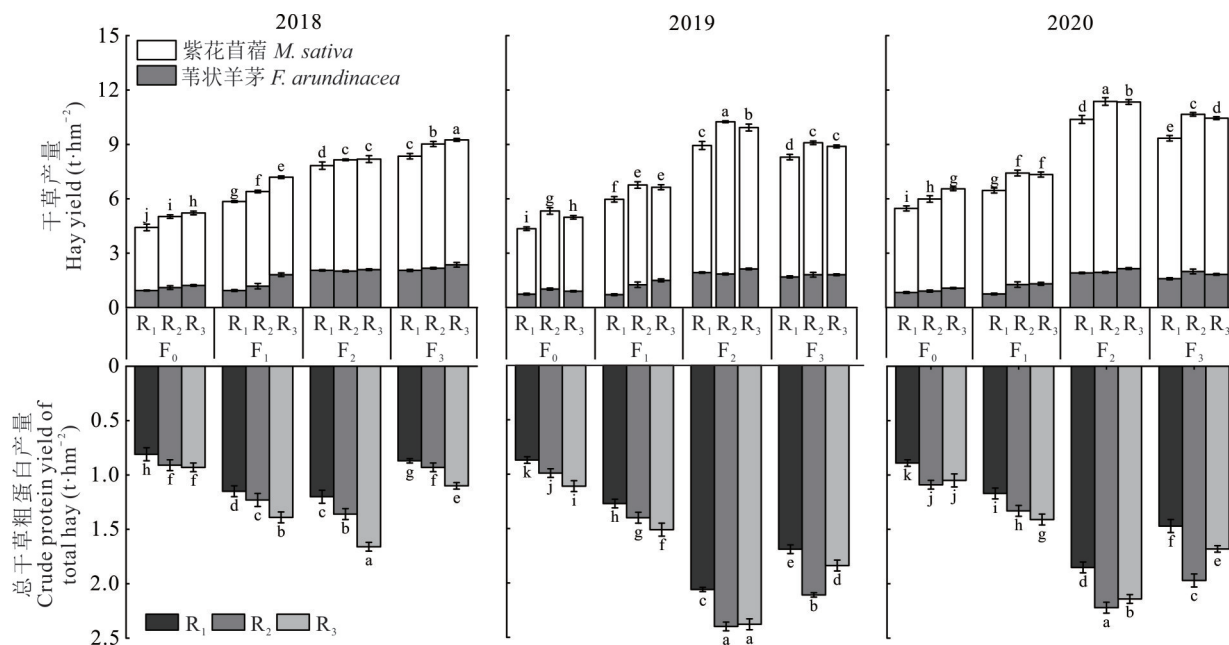


图4 补播—施磷对草地生产力和总干草粗蛋白产量的影响

Fig. 4 Effects of reseeding-phosphorus application on grassland productivity and total hay crude protein yield

苇状羊茅干草产量在2018—2019年均随补播量的增加而增加,2018年随施磷量的增加而增加,其中在 F_3R_3 处理下最高,为 $2.30\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$,2019年随施磷量的增加呈先上升后下降的趋势,其中在 F_2R_3 处理下最高,为 $2.24\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$;2020年随施磷量的增加呈先上升后下降趋势,其中在 F_2R_3 处理下最高,为 $2.15\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。2018年 R_2 、 R_3 与 R_1 分别相差 0.4 和 $0.5\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$;2019年分别相差 0.8 和 $0.4\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$;2020年分别相差 0.9 和 $0.8\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。2018年 F_1 、 F_2 和 F_3 较 F_0 分别增加 17.5% 、 55.4% 和 51.5% ;2019年分别增加 21.7% 、 53.9% 和 46.6% ;2020年分别增加 12.8% 、 54.2% 和 48.3% (图4)。

2018年苜蓿和苇状羊茅的总干草产量随补播量和施磷量的增加而增加,在 F_3R_3 处理下最高,达到 $9.3\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$,显著高于其他处理($P<0.05$);2019—2020年总干草产量均随补播量和施磷量的增加呈先升高后下降的趋势,均在 F_2R_2 处理下达到最高,分别为 11.1 和 $11.4\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$,显著高于其他处理($P<0.05$)。2018年 R_2 、 R_3 与 R_1 分别相差 1.8 和 $3.3\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$;2019年分别相差 4.0 和 $2.9\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$;2020年分别相差 3.4 和 $3.2\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。2018年 F_1 、 F_2 和 F_3 较 F_0 分别增加 24.3% 、 39.4% 和 44.5% ;2019年分别增加 24.8% 、 49.9% 和 44.4% ;2020年分别增加 16.4% 、 44.0% 和 39.6% (图4)。

2.3 补播—施磷对总干草粗蛋白产量的影响

2018年,总干草粗蛋白产量随补播量的增加而增加,随施磷量的增加呈先升高后下降的趋势,其中在 F_2R_3 处

理下最高,达 $1.6\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$,显著高于其他各处理($P<0.05$)。2019和2020年总干草粗蛋白产量随补播量和施磷量的增加整体呈先上升后降低的趋势,均在 F_2R_2 处理下达到最高,分别为 2.4 和 $2.2\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。2018年 R_2 和 R_3 较 R_1 分别提高 9.1% 、 20.2% ;2019年分别提高 15.7% 、 14.9% ;2020年分别提高 18.2% 、 14.0% 。2018年 F_1 、 F_2 和 F_3 较 F_0 分别增加 30.6% 、 38.0% 和 9.1% ;2019年分别增加 29.4% 、 57.4% 和 46.5% ;2020年分别增加 22.5% 、 51.4% 和 41.0% (图4)。

2.4 补播—施磷对牧草产量稳定性与可持续性的影响

总干草产量变异系数为 $2.1\%\sim 4.0\%$,就补播量来说, R_2 较 R_1 和 R_3 分别降低 10.5% 、 9.6% ,在 F_2R_2 处理下最小(2.1%),显著低于不施肥处理($P<0.05$);对施磷量而言, F_1 、 F_2 和 F_3 较 F_0 分别降低 15.9% 、 38.2% 和 35.7% 。总干草粗蛋白产量变异系数为 $2.5\%\sim 4.2\%$,就补播量来说, R_2 较 R_1 和 R_3 分别降低 9.6% 、 11.6% ,在 F_2R_2 处理下最小(2.5%),显著低于不施肥处理($P<0.05$);对施磷量而言, F_1 、 F_2 和 F_3 较 F_0 分别降低 7.2% 、 31.6% 和 27.5% 。说明适宜的补播量和施磷量可以提高总干草产量和总干草粗蛋白产量的稳定性(图5)。

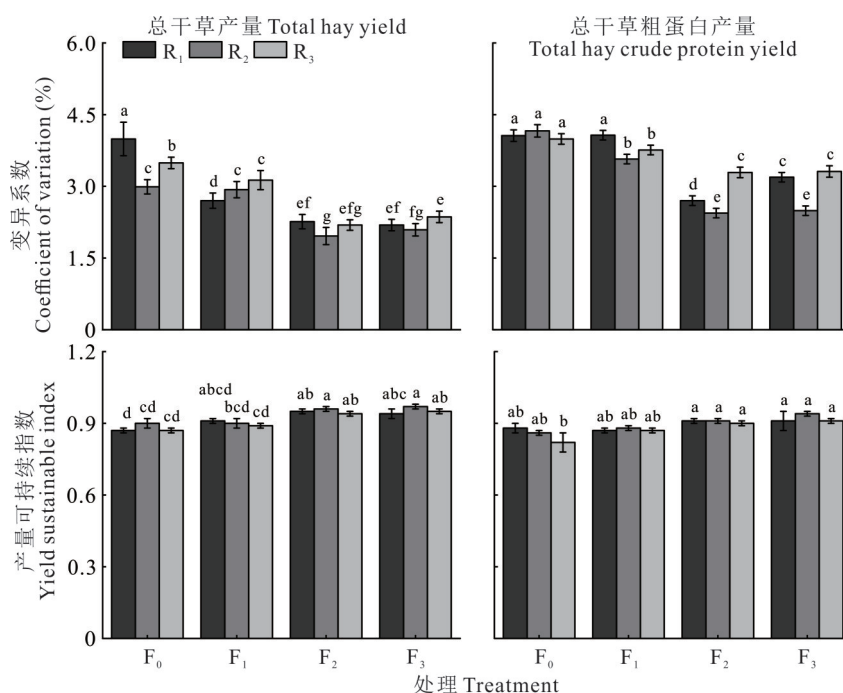


图5 补播—施磷对产量稳定性和可持续性的影响

Fig. 5 Effects of reseeding-phosphorus application on yield stability and sustainability

总干草产量可持续指数排序为 $F_2R_2>F_3R_2>F_2R_3>F_3R_3>F_2R_1>F_3R_1>F_1R_1>F_1R_2>F_1R_3>F_0R_2>F_0R_3>F_0R_1$,不同补播量下, R_2 较 R_1 和 R_3 分别提高 1.5% 、 1.0% ;不同施磷量下, F_2 较 F_0 、 F_1 和 F_3 分别增加 6.3% 、 4.2% 和 1.1% 。总干草粗蛋白产量可持续性指数由大到小顺序为 $F_3R_2>F_3R_1>F_3R_3>F_2R_2>F_2R_1>F_2R_3>F_1R_2>F_1R_3>F_1R_1>F_0R_1>F_0R_2>F_0R_3$,不同补播量下, R_2 较 R_1 和 R_3 分别提高 0.5% 、 2.2% ;不同施磷量下, F_2 较 F_0 、 F_1 和 F_3 分别增加 6.3% 、 4.0% 和 0.6% 。说明适宜的补播量和施磷量能够提高草地的可持续性(图5)。

2.5 年份、施磷量和补播量对牧草生长发育、产量以及产量稳定性和可持续性的方差分析

由方差分析可知,年份、施磷量和补播量均对苜蓿和苇状羊茅株高、密度、干草产量及总干草粗蛋白产量有极显著影响($P<0.01$);施磷量对总干草粗蛋白产量变异系数和总干草粗蛋白产量可持续指数有极显著影响($P<0.01$),对总干草产量变异系数和总干草可持续指数存在显著影响($P<0.05$);年份和施磷量交互作用对苜蓿和苇状羊茅株高、干草产量以及总干草粗蛋白产量均有极显著影响($P<0.01$);年份和补播量交互作用对紫花苜蓿株高、二者干草产量及总干草粗蛋白产量有极显著影响($P<0.01$);施磷量和补播量交互作用对二者密度、干草

产量以及总干草粗蛋白产量均有极显著影响($P<0.01$),对苇状羊茅株高无显著影响($P>0.05$);年份、施磷量和补播量的交互作用对苜蓿密度、苜蓿和苇状羊茅干草产量以及总干草粗蛋白产量均有极显著影响($P<0.01$,表1)。

表 1 牧草生长发育、产量以及产量稳定性和可持续性的方差分析

Table 1 Analysis of variance for forage growth and development, yield, and yield stability and sustainability

因素 Factor	H_A	H_F	D_A	D_F	DM_A	DM_F	CPY	CV_{DM}	CV_{CPY}	SYI_{DM}	SYI_{CPY}
年份 Year	**	***	***	***	***	***	***	ns	ns	ns	ns
施磷量 Phosphorus application	***	***	***	***	***	***	***	*	**	*	**
补播量 Reseeding rate	***	**	***	***	***	***	***	ns	ns	ns	ns
年份×施磷量 Year×phosphorus application	**	**	*	ns	***	***	***	ns	ns	ns	ns
年份×补播量 Year×reseeding rate	***	ns	*	ns	***	***	***	ns	ns	ns	ns
施磷量×补播量 Phosphorus application×reseeding rate	***	ns	***	***	**	***	***	ns	ns	ns	ns
年份×施磷量×补播量 Year×phosphorus application×reseeding rate	*	ns	***	ns	***	***	***	ns	ns	ns	ns

*: $P<0.05$; **: $P<0.01$; ***: $P<0.001$; ns: 不显著 No significance. H_A : 苜蓿株高 *M. sativa* plant height; H_F : 苇状羊茅株高 *F. arundinacea* plant height; D_A : 苜蓿密度 *M. sativa* density; D_F : 苇状羊茅密度 *F. arundinacea* density; DM_A : 苜蓿干草产量 *M. sativa* hay yield; DM_F : 苇状羊茅干草产量 *F. arundinacea* hay yield; CPY: 总干草粗蛋白产量 Crude protein yield of total hay; CV_{DM} : 总干草产量变异系数 Coefficient of variation of total hay yield; CV_{CPY} : 总干草粗蛋白产量变异系数 Coefficient of variation of crude protein yield of total hay; SYI_{DM} : 总干草产量可持续指数 Total hay yield sustainability index; SYI_{CPY} : 总干草粗蛋白产量可持续指数 Sustainable index of crude protein yield of total hay.

2.6 补播—施磷对土壤理化性状的影响

不同补播量和施磷量对不同土层的土壤容重影响显著($P<0.05$,图6),不同补播量下,0~20 cm的 R_2 、 R_3 较 R_1 分别降低2.0%、1.3%,20~40 cm时分别降低0.7%、2.1%;不同施磷量下, F_1 、 F_2 和 F_3 较 F_0 在0~20 cm分别降低5.7%、9.5%和8.2%,20~40 cm时分别降低5.3%、10.5%和9.2%。

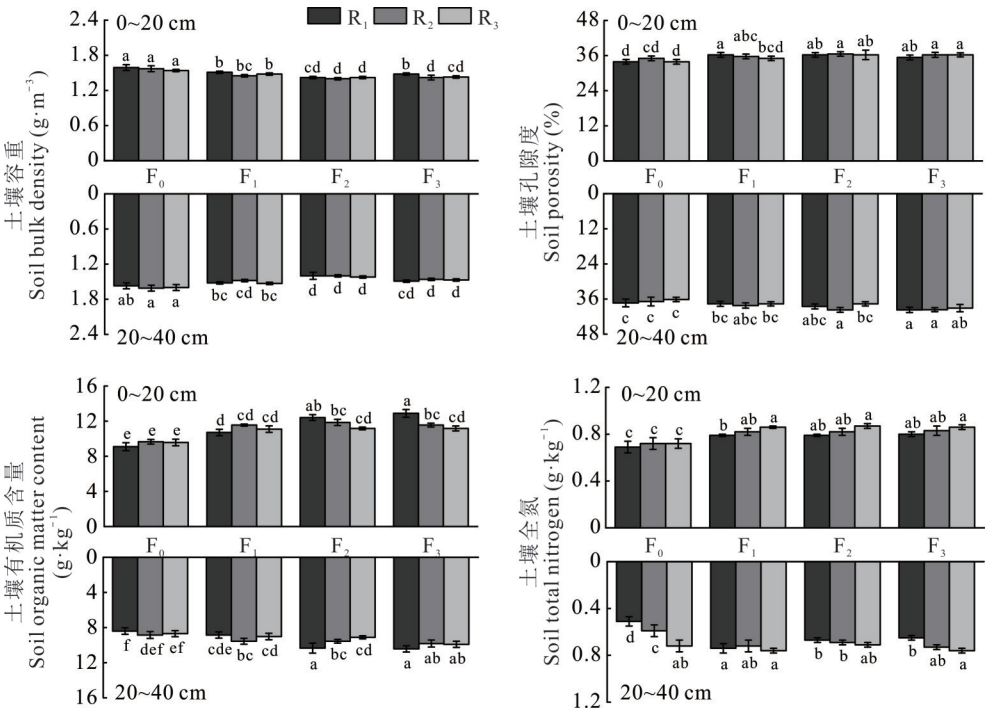


图 6 补播—施磷对土壤理化性状的影响

Fig. 6 Effects of reseeding-phosphorus application on soil physical and chemical properties

不同补播量下,土壤孔隙度在0~20 cm时 R_3 与 R_1 、 R_2 分别相差0.1%、0.5%,20~40 cm时分别相差0.4%、1.0%;不同施磷量下,0~20 cm时 F_1 、 F_2 和 F_3 较 F_0 分别增加3.6%、5.4%和5.3%,20~40 cm时分别增加2.1%、4.2%和6.1%(图6)。

不同补播量和施磷量对不同土层的土壤有机质含量影响显著($P<0.05$),不同补播量下,0~20 cm的 R_1 较 R_2 和 R_3 分别提高0.9%、2.9%,20~40 cm时分别提高3.6%、2.9%;不同施磷量下, F_1 、 F_2 和 F_3 较 F_0 在0~20 cm增加14.4%、19.4%和19.8%,20~40 cm时增加8.1%、12.8%和16.1%(图6)。

不同补播量下,土壤全氮含量在0~20 cm时 R_2 、 R_3 较 R_1 分别提高了2.5%、6.0%,20~40 cm时分别提高了3.0%、12.3%;不同施磷量下,0~20 cm时, F_1 、 F_2 和 F_3 与 F_0 均相差 $0.1 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,20~40 cm时均相差 $0.1 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ (图6)。

2.7 相关性分析和结构方程模型

2018年干草产量与补播量和施磷量的回归分析表明,干草产量随补播量和施磷量的增加呈上升趋势,其中在补播量和施磷量最大时干草产量也达到最高,分别为 7.6 和 $8.9 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$;2019—2020年干草产量与补播量和施磷量的关系均呈非线性关系,随补播量和施磷量的增加呈先上升后下降的趋势,其中补播量为 $40.4 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时干草产量达最高,分别为 8.5 和 $7.9 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$,施磷量为 $150 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时最高,分别达 10.5 和 $9.6 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ (图7)。

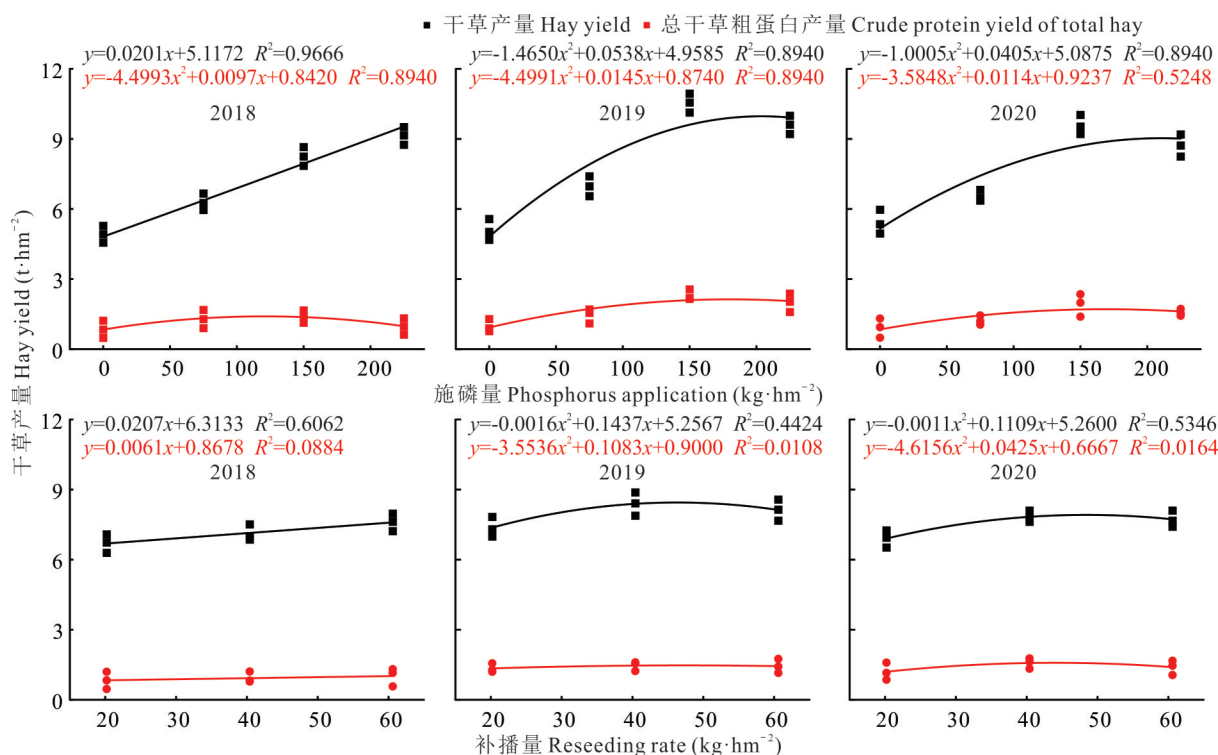


图7 干草产量和总干草粗蛋白产量与补播量和施磷量的关系

Fig. 7 The relationship between hay yield and crude protein yield of total hay and phosphorus application rate and reseeding rate

2018年总干草粗蛋白产量与补播量为线性关系,随补播量的增加呈上升趋势,其中补播量为 $60.6 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时总干草粗蛋白产量达到最高,为 $1.3 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$;2019—2020年总干草粗蛋白产量与补播量均为非线性关系,随补播量的增加呈先上升后下降趋势,其中补播量为 $40.4 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时达到最高,分别为 1.7 和 $1.6 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$;3年总干草粗蛋白产量与施磷量的关系均呈非线性,随施磷量的增加先升高后降低,其中施磷量为 $150 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时达最高,分别为 1.4 、 2.3 和 $2.1 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ (图7)。

结构方程模型表明(图8),总密度对干草产量有显著正效应($P<0.05$),对土壤有机质含量存在极显著直接正效应($P<0.001$),土壤有机质含量与土壤全氮间存在极显著直接正效应($P<0.001$),土壤有机质对产量变异

系数有极显著直接负效应($P<0.001$),对产量可持续指数有显著正效应($P<0.05$),土壤容重对干草产量、土壤孔隙度、总密度有极显著直接负效应($P<0.001$),土壤全氮与土壤孔隙度有极显著直接负效应($P<0.001$),产量变异系数对产量可持续指数存在极显著直接负效应($P<0.001$)。

3 讨论

3.1 补播—施磷对退化苜蓿草地生产的影响

株高、密度等是评价牧草生产性能的重要指标,可以反映牧草生长状况以及在植物群落中对光资源的竞争能力。本研究发现,退化苜蓿草地补播苇状羊茅促进了苜蓿生长,增加了草地密度,提高了草地生产力,同时补播量极显著影响苜蓿株高($P<0.01$)。首先,补播苇状羊茅增加了退化苜蓿草地植被覆盖度,减少了裸露面积,降低了水分蒸发效率,改善了群落结构^[21-22]。其次,补播补充了退化草地的空缺生态位,促使群落演替向良性方向发展,最终提高了草地生产性能^[23-24]。此外,补播苇状羊茅改变了牧草群体中光资源的分配,实现牧草对光的分层以及立体利用,使有限的环境资源得到高效利用^[25]。在本研究中,补播量对草地总干草产量有极显著影响($P<0.01$),2018年草地总干草产量随着补播量的增加呈上升趋势,而2019和2020年表现为先上升后下降趋势,其中补播量为 $40.4\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时总干草产量达到最高,较 $20.2\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时分别提高11.7%、10.9%。说明适宜的补播量能够促进退化苜蓿草地生产力的形成,而补播量过大,群体对可利用资源的竞争加剧,导致牧草产量降低^[26]。此外,磷素作为牧草生长的主要限制因子之一,其循环显著影响生态系统的物种组成、生产力和物种多样性^[27],通过向退化苜蓿草地提供磷肥可增加牧草的种群高度和密度^[21-22],促进草地群落的粗蛋白含量以及苜蓿的根系发育和根部结瘤固氮能力^[28]。本研究发现,施磷量对草地总干草产量也有极显著影响($P<0.01$),2018年总干草产量随施磷量的增加而增加,一方面是在补播当年进行施磷处理时进行了浅旋措施,改善了土壤的通气性和渗透性,利于牧草根系发育,促进牧草生长^[29],与刘晶晶等^[22]、巩皓等^[21]的研究结果一致。而2019—2020年总干草产量随施磷量的增加也表现为先升高后降低趋势,且在施磷量为 $150\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时达最高,较不施磷处理分别提高49.9%、44.0%,同时说明在补播第二年适宜的施磷量可以增加土壤养分,提高根系对养分的吸收能力,进而增加牧草产量^[16]。当土壤中磷缺乏时,苜蓿生长受到抑制,而过多施用磷肥,会促进植物体内的呼吸作用,加快光合产物的消耗,干物质积累减少^[30]。粗蛋白产量作为评价草地是否高产优质的主要指标,其数值的高低主要取决于干草产量和牧草粗蛋白含量^[19]。本研究表明,补播量、施磷量及二者交互作用极显著影响牧草的总干草粗蛋白产量($P<0.01$),2018年总干草牧草粗蛋白产量随补播量的增加而增加,2019和2020年则表现为先升高后下降的趋势,其中在补播量为 $40.4\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时达最高。这主要是因为苜蓿的粗蛋白含量远高于苇状羊茅,增加其补播量增大了退化苜蓿草地中的占比,故而总干草粗蛋白产量先升后降^[3]。然而,有研究认为豆科与禾本科牧草混合后粗蛋白产量较

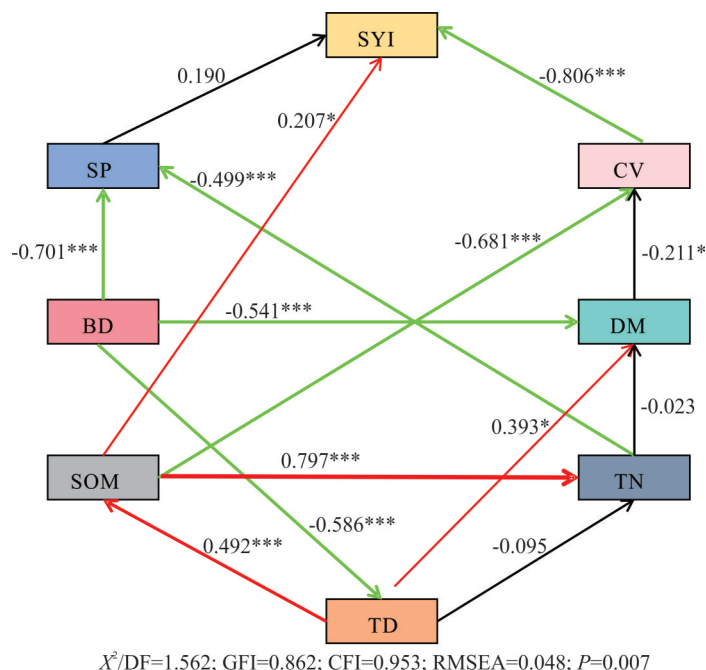


图8 结构方程模型

Fig. 8 Structural equation model

SYI: 产量可持续指数 Yield sustainable index; CV: 变异系数 Coefficient of variation; SP: 土壤孔隙度 Soil porosity; BD: 土壤容重 Soil bulk density; SOM: 土壤有机质 Soil organic matter; DM: 干草产量 Hay yield; TN: 土壤全氮 Soil total nitrogen; TD: 总密度 Total density; χ^2/DF : 卡方自由度比 Chi-square/degrees of freedom; GFI: 拟合优度指数 Goodness-of-fit index; CFI: 比较拟合指数 Comparative fit index; RMSEA: 近似误差均方根 Root mean square error of approximation. 红色线条表示正相关关系,绿色线条表示负相关关系,黑色线条表示无显著相关关系;箭头宽度表示显著的标准化路径系数强度($P<0.05$). Red lines indicate positive correlations, green lines indicate negative correlations, and black lines indicate no significant correlations. Arrow widths indicate significant standardized path coefficient strengths ($P<0.05$). ***, $P<0.001$; **, $P<0.01$; *, $P<0.05$.

豆科牧草单播有所降低^[3],但是在本研究中,补播后的牧草粗蛋白产量高于苜蓿单播,主要是因为退化苜蓿草地中补播苇状羊茅饲草总产量增幅远高于粗蛋白含量降幅。其中总干草粗蛋白产量3年均随施磷量的增加呈先升高后降低的趋势,在150 kg·hm⁻²时达最高,较不施磷处理分别提高了38.13%、57.46%和51.22%,说明适宜的施磷量可以促进牧草生长,提高草地生产力,进而提升牧草的粗蛋白产量^[24]。

3.2 补播—施磷对牧草产量的稳定性与可持续性的影响

补播措施可以通过增加物种多样性来提高退化草地的生态系统稳定性和可持续性^[31]。通常采用变异系数(CV)评价年际间的产量稳定性,CV值越低,表明稳定性越高。利用可持续指数(SYI)评价种植系统的可持续性,SYI值越大,系统可持续性越高^[32]。豆科牧草与禾本科牧草混合种植可以通过增加牧草产量降低变异系数来提高系统稳定性^[33]。本研究表明,产量稳定性随补播量的增加整体呈先降低后升高的趋势,当补播量为40.4 kg·hm⁻²时牧草变异系数最小,说明适宜补播量能够增加退化苜蓿草地的物种多样性,提高群落稳定性^[34]。此外,合理的施肥能够保证草地生态系统物质输入与输出间的平衡,实现牧草可持续生产^[27]。本研究发现,不施磷处理的CV值较大,SYI值较小,可能是不施磷条件下牧草的抗逆性较差,易出现大幅度的产量波动,而施磷则可有效降低牧草的CV,提高SYI值。同时也说明了施肥能够降低环境等因素对产量的影响,有效降低产量变异系数,提高生态系统稳定性^[35]。此外,研究发现当施磷量为225 kg·hm⁻²时CV大于施磷量为150 kg·hm⁻²,SYI变化趋势与之相反,说明过量施磷肥可能会抑制牧草生长,不利于物种多样性的保持并降低可持续性^[36]。

3.3 补播—施磷对土壤理化性质的影响

补播和施肥能够在短时间内增加地上植被覆盖度,减少土壤矿化,提升土壤有机质含量,促进养分资源积累^[22]。补播措施主要通过人为干预,促使植被群落与补播物种之间形成一种新的种间关系^[3],改善了土壤环境^[28]。在高寒退化草地补播苇状羊茅后,土壤容重降低、孔隙度增大,促进了土壤有机质和氮的积累,提高了草地生产力^[34]。本研究表明,补播提高了0~20 cm和20~40 cm土层的土壤孔隙度且降低了土壤容重,显著提高了全氮含量,加速了土壤养分循环,促进了土壤有机质的积累。这主要是由于补播增加了植被覆盖率,填补了退化草地原来裸露的表面,使土壤的持水能力增加,改善了土壤质量^[28],与Tardella等^[37]的研究结果一致。增施磷肥可以提高草原生态系统的土壤质量指数^[15],尤其在退化苜蓿草地中施磷肥能够促进苜蓿的根系生长^[16],在一定程度上促进根系疏松土壤,降低表层土壤容重,增加土壤孔隙度,起到保水保肥的效果。本研究发现,随着施磷量的增加,土壤容重呈先降低后升高的趋势,施肥处理下土壤孔隙度和有机质含量均显著高于不施肥处理,与前人研究结果一致。本研究结果表明,补播量为40.4 kg·hm⁻²,施磷量为150 kg·hm⁻²对土壤改良效果最佳。

4 结论

适宜的补播量和施肥水平可以促进牧草生长,提高草地生产性能,补播量为40.4 kg·hm⁻²,施磷量为150 kg·hm⁻²时干草产量、粗蛋白产量均达到最高,分别为10.6 t·hm⁻²、2.3 t·hm⁻²,同时该处理下提升了退化苜蓿草地的稳定性和可持续性。补播和施肥措施使土壤孔隙度和有机质含量及全氮含量在一定程度上提高,降低了土壤容重。因此,黄土高原雨养区退化苜蓿草地适宜推广的最佳苇状羊茅补播量为40.4 kg·hm⁻²,施磷量为150 kg·hm⁻²。

参考文献 References:

- [1] Zhu J X, Shang Z H, Jiang S J, *et al.* Key scientific questions of grassland protection, restoration and function improvement. Bulletin of National Natural Science Foundation of China, 2024, 38(4): 658—667.
朱剑霄, 尚占环, 蒋胜竞, 等. 草地生态系统保护、修复与功能提升的关键科学问题. 中国科学基金, 2024, 38(4): 658—667.
- [2] Hou F J, Huang X J, Chang S H, *et al.* Concepts and approaches of grassland improvement. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(19): 8897—8913.
侯扶江, 黄小娟, 常生华, 等. 草地培育的内涵和方法. 生态学报, 2024, 44(19): 8897—8913.
- [3] Liu Z, Lan J X, Li W, *et al.* Reseeding improved soil and plant characteristics of degraded alfalfa (*Medicago sativa*) grassland in

- Loess Hilly Plateau Region, China. *Ecological Engineering*, 2023, 190(1): 106933.
- [4] Wang J, Fu X, Ghimire R J, *et al.* Responses of soil bacterial community and enzyme activity to organic matter components under long-term fertilization on the Loess Plateau of China. *Applied Soil Ecology*, 2021, 166(10): 103992.
- [5] Wang B, Deng J Q, Wang T F, *et al.* Innovative tillage practices to establish productive and sustainable forage production systems in degraded alfalfa pastures in semiarid regions. *Land Degradation & Development*, 2024, 35(18): 5804—5816.
- [6] 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.
- [7] Niu S L, Jiang G M. Function of artificial grassland in restoration of degraded natural grassland and its research advance. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, 15(9): 1662—1666.
牛书丽, 蒋高明. 人工草地在退化草地恢复中的作用及其研究现状. *应用生态学报*, 2004, 15(9): 1662—1666.
- [8] Leger E A, Goergen E M, Forbis D Q T. Can native annual forbs reduce *Bromus tectorum* biomass and indirectly facilitate establishment of a native perennial grass? *Journal of Arid Environments*, 2014, 102: 9—16.
- [9] Zhu Y Q, Yu H, Zheng W, *et al.* Effects of different planting configurations on yield of *Avena sativa* and *Vicia sativa* mixed plantings with soybean in alpine pastures. *Acta Prataculturae Sinica*, 2020, 29(1): 74—85.
朱亚琼, 于辉, 郑伟, 等. 燕麦+箭筈豌豆混播草地混播优势的测度与影响因素分析. *草业学报*, 2020, 29(1): 74—85.
- [10] Fan Y F, Wang Z L, Liao D P, *et al.* Uptake and utilization of nitrogen, phosphorus and potassium as related to yield advantage in maize-soybean intercropping under different row configurations. *Scientific Reports*, 2020, 10(1): 9504.
- [11] Chapagain T, Riseman A. Nitrogen and carbon transformations, water use efficiency and ecosystem productivity in monocultures and wheat-bean intercropping systems. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2015, 101(1): 107—121.
- [12] Wang B, Yang Y J, Dong X, *et al.* Effects of reseeding grass on production performance and forage quality of degraded alfalfa grassland. *Acta Agrestia Sinica*, 2021, 29(3): 618—624.
王斌, 杨彦军, 董秀, 等. 补播禾草对退化苜蓿草地生产性能及牧草品质的影响. *草地学报*, 2021, 29(3): 618—624.
- [13] Zhou J Q. Effects of alfalfa reseeding on the productivity and diversity of degraded grassland. Beijing: China Agricultural University, 2017.
周冀琼. 补播苜蓿对退化草地生产力和多样性的影响. 北京: 中国农业大学, 2017.
- [14] Elser J J E A. Nutritional constraints in terrestrial and freshwater food webs. *Nature*, 2000, 408: 578—580.
- [15] Guo J B, Zhao G Q, Jia S G, *et al.* Comprehensive evaluation of effects of fertilization on grassland quality index and soil properties in alpine steppe. *Acta Prataculturae Sinica*, 2020, 29(9): 85—93.
郭剑波, 赵国强, 贾书刚, 等. 施肥对高寒草原草地质量指数及土壤性质影响的综合评价. *草业学报*, 2020, 29(9): 85—93.
- [16] Yu T F, Liu X J, Hao F. Effect of phosphate fertilizer application on alfalfa yield, nutritive value and N and P use efficiency. *Acta Prataculturae Sinica*, 2018, 27(3): 154—163.
于铁峰, 刘晓静, 郝凤. 施用磷肥对紫花苜蓿营养价值和氮磷利用效率的影响. *草业学报*, 2018, 27(3): 154—163.
- [17] Wang B, Deng J Q, Wang T F, *et al.* Effect of seeding options on interspecific competition in oat (*Avena sativa* L.)—common vetch (*Vicia sativa* L.) forage crops. *Agronomy (Basel)*, 2022, 12(12): DOI: 10.3390/AGRONOMY12123119.
- [18] Luo S S, Yu L L, Liu Y, *et al.* Effects of reduced nitrogen input on productivity and N₂O emissions in a sugarcane/soybean intercropping system. *European Journal of Agronomy*, 2016, 81: 78—85.
- [19] Wang T F, Wang B, Deng J Q, *et al.* Effect of sowing rate on yield and forage quality of a *Dolichos lablab*—*Sorghum bicolor* mixture under drip irrigation in arid areas of Ningxia. *Acta Prataculturae Sinica*, 2023, 32(3): 30—40.
王腾飞, 王斌, 邓建强, 等. 宁夏干旱区滴灌条件下拉巴豆不同播种量与甜高粱混播饲草生产性能研究. *草业学报*, 2023, 32(3): 30—40.
- [20] Bao S D. Soil agrochemical analysis. Beijing: China Agriculture Press, 2005.
鲍士旦. 土壤农化分析. 北京: 中国农业出版社, 2005.
- [21] Gong H, Yang L, Li D D, *et al.* Response of alfalfa production and quality to fertilization and cutting frequency and benefit analysis in mollisol agricultural area in cold region. *Scientia Agricultura Sinica*, 2020, 53(13): 2657—2667.
巩皓, 杨柳, 李丹丹, 等. 寒地黑土农区紫花苜蓿生产与品质对施肥和刈割频次的响应及效益分析. *中国农业科学*, 2020, 53(13): 2657—2667.
- [22] Liu J J, Yin Y L, Li S X, *et al.* Effects of regulation measure on soil and microbial biomass of moderately degraded alpine

- meadow in Qilian Mountain, China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2022, 33(4): 988—994.
- 刘晶晶, 尹亚丽, 李世雄, 等. 调控措施对祁连山中度退化高寒草甸土壤的影响. *应用生态学报*, 2022, 33(4): 988—994.
- [23] Li X L, Ma Y Q, Duan C W, *et al.* Effects of fertilization and reseeding on biomass and species diversity of patchy degraded alpine meadows with different slope directions. *Chinese Journal of Grassland*, 2024, 46(5): 1—13.
- 李希来, 马昀峤, 段成伟, 等. 施肥和补播对不同坡向斑块化退化高寒草甸生物量和物种多样性的影响. *中国草地学报*, 2024, 46(5): 1—13.
- [24] Xiao Z X, Wang Y, Liu G F, *et al.* Effects of fertilizing time in early spring on alfalfa (*Medicago sativa*) production performance and nutritional quality in mollisol area in cold region. *Scientia Agricultura Sinica*, 2020, 53(13): 2668—2677.
- 肖知新, 王洋, 刘国富, 等. 寒地黑土区春季施肥期对紫花苜蓿生产性能及营养品质的影响. *中国农业科学*, 2020, 53(13): 2668—2677.
- [25] Aponte A, Samarappuli D, Berti M T. Alfalfa-grass mixtures in comparison to grass and alfalfa monocultures. *Agronomy Journal*, 2019, 111(2): 628—638.
- [26] Carlsson G, Huss-Danell K. Does nitrogen transfer between plants confound ^{15}N -based quantifications of N_2 fixation? *Plant and Soil*, 2014, 374(1/2): 345—358.
- [27] Wang C T, Wang G X, Liu W, *et al.* Effects of fertilization gradients on plant community structure and soil characteristics in alpine meadow. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(10): 3103—3113.
- 王长庭, 王根绪, 刘伟, 等. 施肥梯度对高寒草甸群落结构、功能和土壤质量的影响. *生态学报*, 2013, 33(10): 3103—3113.
- [28] Li W L, Shang X J, Yan H P, *et al.* Impact of restoration measures on plant and soil characteristics in the degraded alpine grasslands of the Qinghai Tibetan Plateau: A meta-analysis. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2023, 347: 108394.
- [29] Su Z Y, Zhang J S, Wu W L, *et al.* Effects of conservation tillage practices on winter wheat water-use efficiency and crop yield on the Loess Plateau, China. *Agricultural Water Management*, 2007, 87(3): 307—314.
- [30] Chen L L, Xu H B, Sun J H, *et al.* The short-term impacts of soil disturbance on soil microbial community in a degraded *Leymus chinensis* steppe, north China. *Soil and Tillage Research*, 2021, 213: 105—112.
- [31] Ren Y J, Lu Y H, Fu B J. Quantifying the impacts of grassland restoration on biodiversity and ecosystem services in China: A meta-analysis. *Ecological Engineering*, 2016, 95: 542—550.
- [32] Xu X, Wang X Y, Bao X L, *et al.* Effects of long-term no-tillage and stover mulching on maize yield and its stability. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2022, 33(3): 671—676.
- 徐欣, 王笑影, 鲍雪莲, 等. 长期免耕不同秸秆覆盖量对玉米产量及其稳定性的影响. *应用生态学报*, 2022, 33(3): 671—676.
- [33] Liu Z, Nan Z W, Lin S M, *et al.* Millet/peanut intercropping at a moderate N rate increases crop productivity and N use efficiency, as well as economic benefits, under rain-fed conditions. *Journal of Integrative Agriculture*, 2023, 22(3): 738—751.
- [34] Ji W Z, Wang Q H. Effects of over-seeding on plant community and soil physical and chemical properties of degraded grassland in Tianzhu County. *Pratacultural Science*, 2016, 33(5): 886—890.
- 姬万忠, 王庆华. 补播对天祝高寒退化草地植被和土壤理化性质的影响. *草业科学*, 2016, 33(5): 886—890.
- [35] Zhang X. Effects of fertilization on yield sustainability and greenhouse gas emissions under wheat-soybean rotation system. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2019.
- 张鑫. 施肥对小麦—大豆轮作体系产量可持续性温室气体排放的影响. 北京: 中国农业科学院, 2019.
- [36] Yan P, Chen Y Q, Dadouma A, *et al.* Effect of nitrogen regimes on narrowing the magnitude of maize yield penalty caused by high temperature stress in north China Plain. *Plant, Soil and Environment*, 2017, 63(3): 131—138.
- [37] Tardella F M, Bricca A, Piermarteri K, *et al.* Context-dependent variation of SLA and plant height of a dominant, invasive tall grass (*Brachypodium genuense*) in sub-Mediterranean grasslands. *Flora*, 2017, 229: 116—123.