

DOI: 10.11686/cyxb2024527

http://cyxb.magtech.com.cn

王弟成, 柴强, 樊志龙, 等. 混作豆科饲草及减氮对青贮玉米生产系统土壤理化特性和产量的影响. 草业学报, 2025, 34(12): 97-110.

WANG Di-cheng, CHAI Qiang, FAN Zhi-long, *et al.* Effects of mixed cropping of leguminous forage and reduced nitrogen fertilizer on soil physicochemical properties and forage yield in a silage maize production system. *Acta Prataculturae Sinica*, 2025, 34(12): 97-110.

混作豆科饲草及减氮对青贮玉米生产系统 土壤理化特性和产量的影响

王弟成, 柴强, 樊志龙, 殷文, 范虹, 何蔚, 孙亚丽, 桑会哲, 胡发龙*

(省部共建干旱生境作物学国家重点实验室, 甘肃农业大学农学院, 甘肃 兰州 730070)

摘要:针对河西绿洲灌区青贮玉米氮肥投入高、土壤质量下降等问题,本研究在减氮条件下,探讨混作豆科饲草对青贮玉米生产系统土壤理化特性及产量的影响,以期为该区土壤健康管理和青贮玉米可持续生产提供科学依据和理论支撑。试验于2023-2024年在武威绿洲农业综合试验站开展,采用裂区设计,主区为3个种植模式(M:青贮玉米单作;MH:青贮玉米-秣食豆混作;ML:青贮玉米-拉巴豆混作),裂区为3个施氮水平(N_3 : $360\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$; N_2 : $306\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$; N_1 : $252\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)。结果表明,与M模式氮肥减施30%处理相比,MH和ML模式相同施氮水平下土壤容重分别降低5.5%和8.0%、孔隙度分别提高6.6%和10.8%、pH分别降低0.9%和1.0%、有机质分别提高3.9%和5.1%、全氮含量分别提高9.2%和10.4%、全磷含量分别提高8.7%和10.9%、全钾含量分别提高9.4%和12.0%、硝态氮含量分别提高26.4%和29.8%、铵态氮含量分别提高19.1%和25.1%、有效磷含量分别提高8.8%和10.6%、速效钾含量分别提高5.7%和10.1%。此外,与M模式相比,MH模式下饲草产量和能量产量分别提高23.1%和25.2%,ML模式下分别提高30.5%和33.6%;MH模式下减氮30%处理饲草产量和能量产量与传统施氮差异不显著,但ML模式下较之提高20.5%和17.8%;并且,与M模式传统施氮处理相比,MH模式减氮30%处理饲草产量和能量产量分别提高15.8%和17.8%,ML减氮30%处理分别提高23.8%和28.6%。因此,青贮玉米混作拉巴豆结合施氮量 $252\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 可改善土壤理化性质、提高饲草产量,可作为绿洲灌区青贮玉米生产的适宜种植模式和施氮量。

关键词:混作;施氮;青贮玉米;土壤理化;饲草产量

Effects of mixed cropping of leguminous forage and reduced nitrogen fertilizer on soil physicochemical properties and forage yield in a silage maize production system

WANG Di-cheng, CHAI Qiang, FAN Zhi-long, YIN Wen, FAN Hong, HE Wei, SUN Ya-li, SANG Hui-zhe, HU Fa-long*

State Key Laboratory of Aridland Crop Science by Province and Ministry, College of Agronomy, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China

Abstract: In response to the issues of high nitrogen fertilizer input and declining soil quality in the Hexi Oasis irrigation area for silage maize (*Zea mays*) production, this study investigated the effects of mixed leguminous forages on soil physicochemical properties and yield of silage maize under reduced nitrogen supply. The aim was to

收稿日期:2024-12-31;改回日期:2025-03-19

基金项目:国家重点研发计划(2022YFD1900200),国家自然科学基金(U21A20218),甘肃省“双一流”科研重点项目(GSSYLXM-02)和甘肃农业大学伏羲青年人才培育项目(Gaufx-05Y09)资助。

作者简介:王弟成(1999-),男,甘肃天水人,在读硕士。E-mail: wangdc201812@163.com

*通信作者 Corresponding author. E-mail: hufl@gsau.edu.cn

provide a scientific basis and theoretical support for development of recommendations for soil health management and sustainable production of silage maize in this region. The experiment was conducted at the Wuwei Oasis Agricultural Comprehensive Experimental Station from 2023 to 2024 using a split-plot design. The main plots consisted of three crop planting patterns [M: monoculture of silage maize; MH: mixed of silage maize and soybean (*Glycine max*); ML: mixed of silage maize and lablab bean (*Dolichos lablab*)], while the subplots comprised three nitrogen application levels (N_3 : $360 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$; N_2 : $306 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$; N_1 : $252 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$). The results showed that compared to the M planting pattern with a 30% reduction in nitrogen fertilizer, the soil bulk density in MH and ML patterns under the same nitrogen level was reduced by 5.5% and 8.0%, respectively; porosity was increased by 6.6% and 10.8%, respectively; pH was decreased by 0.9% and 1.0%, respectively; organic matter was increased by 3.9% and 5.1%, respectively; total nitrogen content was increased by 9.2% and 10.4%, respectively; total phosphorus content was increased by 8.7% and 10.9%, respectively; total potassium content was increased by 9.4% and 12.0%, respectively; nitrate nitrogen content was increased by 26.4% and 29.8%, respectively; ammonium nitrogen content was increased by 19.1% and 25.1%, respectively; available phosphorus content was increased by 8.8% and 10.6%, respectively; and available potassium content was increased by 5.7% and 10.1%, respectively. In addition, compared to the M planting pattern, the forage yield and energy yield in the MH planting pattern were increased by 23.1% and 25.2%, respectively, and in the ML planting pattern by 30.5% and 33.6%, respectively. Under the MH planting pattern with a 30% reduction in nitrogen, the forage yield and energy yield did not differ significantly from traditional nitrogen application, but under the ML pattern, they were increased by 20.5% and 17.8%, respectively. Moreover, the forage yield and energy yield in the MH planting pattern with a 30% reduction in nitrogen were increased by 15.8% and 17.8%, respectively, compared to the traditional nitrogen application in the M planting pattern, and in the ML pattern with a 30% reduction in nitrogen, they were increased by 23.8% and 28.6%, respectively. Therefore, ML patten combined with a nitrogen application rate of $252 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ improved soil physicochemical properties and increased forage yield, and can be recommended as a suitable cropping pattern and nitrogen rate for silage maize production in the oasis irrigation area.

Key words: mixed cropping; nitrogen application; silage maize; soil physical and chemical; forage yield

青贮玉米(*Zea mays*)可持续生产关系到畜牧产业稳定和国民健康^[1]。然而,当前以高投入、高消耗获取高产出的粗放管理模式,造成青贮玉米生产成本不断增加,环境压力逐年加重,特别是氮肥过量施用,导致氮素流失的同时,加剧了土壤退化,严重威胁青贮玉米可持续生产^[2-3]。因此,探寻合理的氮肥限量供应模式对土壤健康管理和青贮玉米可持续生产至关重要。研究表明,豆科饲草与禾本科作物混作能促进根瘤菌固氮作用,提高土壤氮素有效性,进而减少化学氮肥施用量^[4-5]。同时,禾豆混作通过改善土壤结构、提高养分及有机质含量、调节酸碱度等,显著提升土壤质量和作物产量^[6-8]。此外,禾豆混作能够发挥作物间生长习性和生理特性的互补作用,提高养分利用效率,在保证作物产量的同时,降低环境污染风险^[9]。因此,与豆科饲草混作有望降低青贮玉米氮肥施用量,改善土壤理化特性,并提高饲草产量。

河西绿洲灌区是甘肃省优质饲草关键生产区,其中青贮玉米占据了较大种植面积^[10]。然而,为追求高产,区域氮肥施用量长期超标,引发有机质含量下降等土壤退化问题^[11]。这些变化显著降低了土壤肥力,加剧了青贮玉米生产的资源消耗,并制约了饲草产业的集约化发展。与豆科作物混作无疑是该区青贮玉米降低化学氮肥施用量的可行措施^[12],但混作对该区土壤理化特性和饲草生产力的影响如何,尚不明确。为此,本研究通过设置青贮玉米与不同豆科饲草的混作模式并配置不同水平的施氮量,检测不同处理下土壤理化特性和产量表现,探明豆科饲草混作及氮肥减施对青贮玉米生产系统土壤理化特性及产量的影响,旨在筛选最佳混作模式和氮肥施用量,为青贮玉米可持续生产提供理论依据。

1 材料与方

1.1 试验区概况

本试验于2023年3月至2024年10月在甘肃农业大学绿洲农业综合试验站开展,该站处于河西走廊东端,北纬 $37^{\circ}44'49''$ 、东经 $102^{\circ}53'32''$ 的位置赋予了它北温带大陆性干旱气候的特征。此地降水稀缺,气候干旱,不过光照条件得天独厚,相应地蒸发量也较大。试验站所处区域平均海拔1506 m,无霜期约156 d,年平均气温 15°C , ≥ 0 与 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 的有效积温分别达3513和2985 $^{\circ}\text{C}$,年日照时数可达2945 h,光照条件充足。站内土壤类型为厚层灌漠土,质地属砂壤土,0~30 cm土层pH为8.2,全氮 $0.88\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,铵态氮 $1.87\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,硝态氮 $12.51\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,全磷(以 P_2O_5 计) $1.41\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,有效磷 $29.2\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,速效钾 $152\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,有机质 $12.5\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$;0~110 cm土壤容重 $1.44\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 。具体年降水量和平均气温见图1。

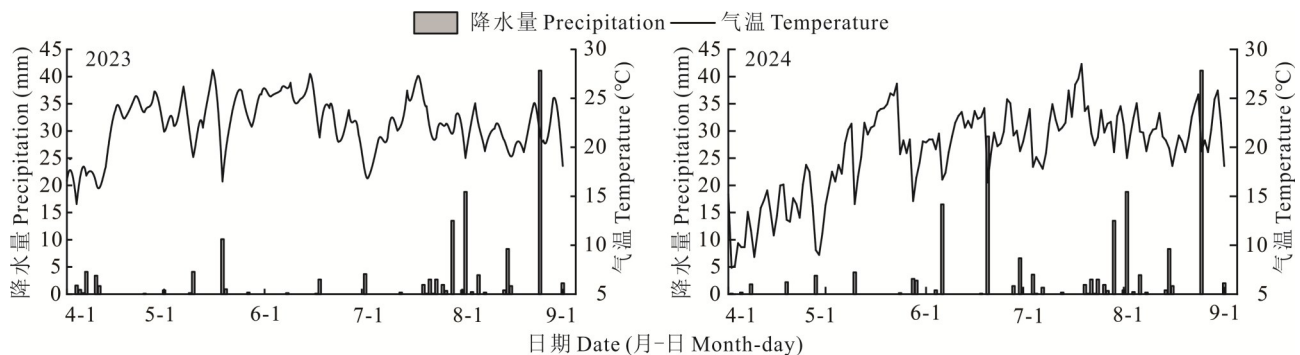


图1 试验站所属区域平均气温与降水量

Fig. 1 Average temperature and precipitation at the experimental site

1.2 试验材料

本研究采用‘雅玉’青贮26玉米、‘牡丹江’秣食豆(*Glycine max*)以及‘海妖’拉巴豆(*Dolichos lablab*)这3个品种。供试肥料如下:尿素含氮量46%,磷酸二铵含氮18%、 P_2O_5 46%,过磷酸钙 P_2O_5 含量20%。氮肥按照基肥占40%、大喇叭口期追施60%的比例进行分配,磷肥则以 $180\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 的施用量全部作为基肥一次性施入。

1.3 试验设计

试验采用裂区设计,主区为青贮玉米单作(monoculture of silage maize, M)、青贮玉米—秣食豆混作(mixed of silage maize and soybean, MH)和青贮玉米—拉巴豆混作(mixed of silage maize and lablab bean, ML);裂区则设置不同施氮水平,分别为 $360\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ (N_3 ,传统施氮量)、 $306\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ (N_2 ,减量15%)以及 $252\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ (N_1 ,减量30%),共计9个处理组合,每个处理重复3次,每个小区面积为 39 m^2 (长6 m、宽6.5 m)。

采取单粒穴播法种植玉米,不管是单独种植还是混合种植,株距都固定为30 cm,播种密度达 $90000\text{ 株}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。豆科作物(包含秣食豆和拉巴豆)与青贮玉米以1:2的行比进行混合种植,统一运用双粒穴播方式,穴距设定为30 cm,种植密度同样是 $90000\text{ 株}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。此外,玉米、秣食豆和拉巴豆这3种作物均保持同期播种与同期收获的种植模式。

在玉米生育进程中的拔节、大喇叭口、抽雄以及开花等关键时期,分别实施120、80、120和80 mm的定量灌溉作业,且整个灌溉流程采用膜下滴灌技术,以实现精准水分管理与高效利用,总的灌水定额为400 mm。

1.4 主要测量指标和方法

于播种前、收获后用内径3.5 cm的土钻采集0~30 cm深度土壤,各小区均取3钻,混合为一个土样带回实验室,风干后过0.25 mm筛备用。采用环刀法测定土壤容重;土壤孔隙度 $= (1 - \text{容重}/\text{比重}) \times 100\%$,式中:比重取 $2.65\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ [13]。用pH计(Thermo Fisher Scientific,美国)测定土壤pH,水土质量比为2.5:1;采用重铬酸钾外加热法[13]测定土壤有机质含量。

采用凯氏定氮法^[13]测定土壤全氮含量;通过全自动化学间断分析仪(SmartChem 450,意大利)测定土壤硝态氮、铵态氮含量;采用 $0.5 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1} \text{ NaHCO}_3$ 浸提—钼锑抗比色法^[13]测定土壤有效磷含量;采用乙酸铵浸提—火焰光度法^[13]测定土壤速效钾含量。

作物蜡熟阶段,在各个小区随机挑选一处面积 6 m^2 且具代表性的样方,先对样方内作物地上部分的全部植株称重。随后,将所选取的全部植株放入网袋之中,在自然通风的条件下风干2周。待风干完成后,再将其放入 65°C 的烘箱中,持续烘干48 h以上,直至达到恒重状态,最后对其干重进行称量,并据此计算饲草产量(forage yield)和能量产量(energy yield):

$$EY = (Y_g \times E_g + Y_s \times E_s) \times 10^{-3}$$

式中: EY 为能量产量($\text{MJ}\cdot\text{hm}^{-2}$), Y_g 和 Y_s 分别为籽粒产量和秸秆生物量($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$), E_g 和 E_s 分别为籽粒和秸秆热值($\text{MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$)。玉米籽粒热值为 $16.3 \text{ MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$,秸秆热值为 $14.6 \text{ MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$,豆科作物籽粒和秸秆热值分别为 16.7 和 $15.1 \text{ MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ ^[14]。

1.5 数据统计与分析

使用Excel 2019软件进行数据整理及汇总。通过SPSS 20.0软件进行方差分析(ANOVA)、多重比较(Duncan)以及相关分析(Pearson)等统计分析工作,借助SPSS 20.0软件中一般线性模型的单变量全因子模型达成主效应与互作效应的分析。采用SPSS 20.0软件中的线性回归进行通径分析及拟合,借助R语言进行Mantel检验。另外,使用Origin 2022软件绘图。

2 结果与分析

2.1 不同种植模式和施氮水平对土壤物理性质的影响

2.1.1 土壤容重

种植模式、施氮制度及二者互作效应对土壤容重均有显著影响($P < 0.01$),年际间、年度 \times 种植模式 \times 施氮制度的互作效应对土壤容重的影响均不显著($P > 0.05$)。与单作青贮玉米(M)相比,青贮玉米—秣食豆混作(MH)和青贮玉米—拉巴豆混作(ML)显著降低了土壤容重(图2)。与M相比,MH模式土壤容重在 N_1 、 N_2 、 N_3 水平下分别降低5.5%、4.4%、3.5%,ML模式土壤容重在3个施氮水平下分别降低8.0%、5.8%、4.1%。ML模式土壤容重与MH模式在 N_2 、 N_3 水平下差异不显著,在 N_1 水平下降低3.6%。不同施氮水平间, N_1 处理土壤容重在M模式下与 N_2 、 N_3 差异不显著,在MH模式下与 N_2 差异不显著,较 N_3 降低2.0%,在ML模式下较 N_2 、 N_3 分别降低3.8%、4.9%。表明豆科饲草的引入通过根系穿插与固氮作用促进了土壤团粒结构的形成,降低了土壤紧实度。随着施氮量的减少,混作系统的土壤容重降幅逐渐增大,说明减氮可缓解过量氮肥对土壤结构的负面影响。此外,ML在 N_1 水平下的土壤容重显著低于MH,可能与拉巴豆更强的根系扩展能力有关。

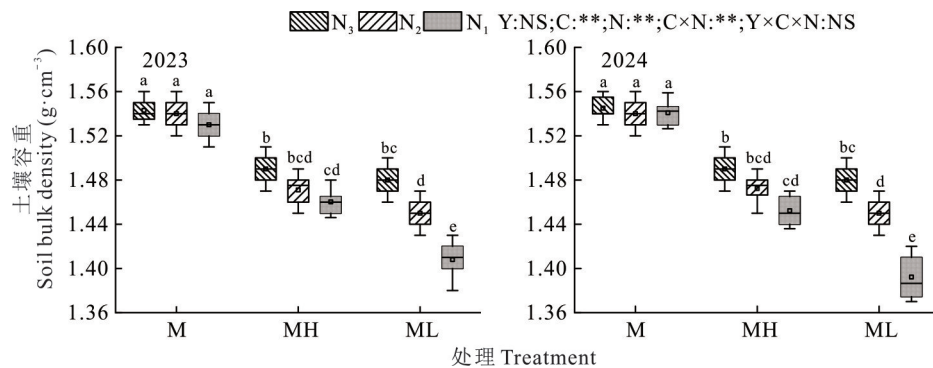


图2 不同种植模式和施氮水平下土壤容重

Fig. 2 Soil bulk density under different cropping patterns and nitrogen application levels

Y: 年份 Year; C: 种植模式 Cropping pattern; N: 施氮水平 Nitrogen application level; C \times N: 种植模式与施氮制度的交互作用 The interaction between cropping pattern and nitrogen application system; Y \times C \times N: 年份、种植模式和施氮的交互作用 The interaction of year, cropping pattern and nitrogen application level; 不同小写字母代表各处理之间差异性显著($P < 0.05$) Different lowercase letters represent significant differences among treatments ($P < 0.05$); *, $P < 0.05$; **, $P < 0.01$; NS: 差异不显著 No significant. 下同 The same below.

2.1.2 土壤孔隙度 种植模式、施氮制度及二者互作效应对土壤孔隙度有显著影响($P < 0.01$), 年际间、年度 \times 种植模式 \times 施氮制度的互作效应对土壤孔隙度的影响均不显著($P > 0.05$)。不同种植模式对土壤孔隙度影响的总体表现为 $ML > MH > M$ (图3)。与M相比, MH模式土壤孔隙度在 N_1 、 N_2 、 N_3 水平下分别增大6.6%、5.8%、4.7%, ML模式土壤孔隙度在3个施氮水平下分别增大10.8%、7.5%、5.4%。ML模式土壤孔隙度在 N_1 水平较MH模式增大4.2%, 在 N_2 、 N_3 水平下2023年差异均不显著, 2024年在 N_2 水平下较MH模式增大1.9%。不同施氮水平间, N_1 处理土壤孔隙度在M模式下与 N_2 、 N_3 差异不显著, 在MH模式下与 N_2 差异不显著, 较 N_3 水平下增大2.9%, 在ML模式下分别较 N_2 、 N_3 增大4.1%、5.9%。混作豆科饲草显著提高土壤孔隙度, 且青贮玉米—拉巴豆混作(ML)表现更优, 可能与拉巴豆根系更深的穿插能力和更高的生物量积累相关, 减氮进一步强化混作优势, 表明混作与减氮协同优化土壤结构。

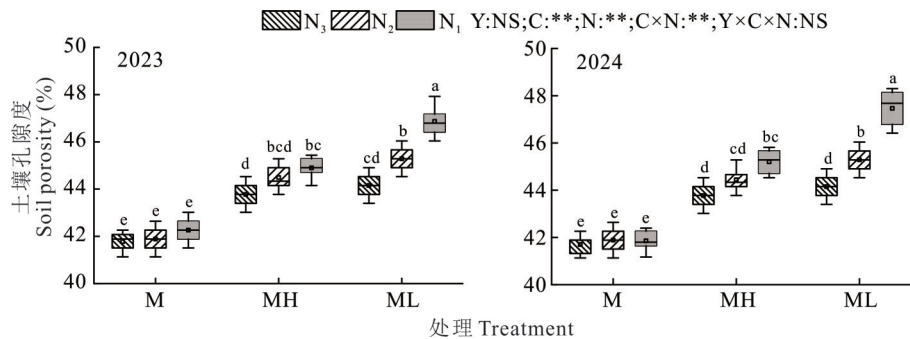


图3 不同种植模式和施氮水平下土壤孔隙度

Fig. 3 Soil porosity under different cropping patterns and nitrogen application levels

2.2 不同种植模式和施氮水平对土壤pH及有机质的影响

2.2.1 土壤pH 种植模式对土壤pH有显著影响($P < 0.01$), 施氮制度对土壤pH无显著影响($P > 0.05$), 二者互作效应对pH有显著影响, 年际间、年度 \times 种植模式 \times 施氮制度的互作效应对pH的影响均不显著($P > 0.05$, 图4)。与M相比, MH模式土壤pH在 N_1 、 N_2 水平下分别降低0.9%、0.6%, N_3 水平下2023年差异不显著, 2024年降低0.5%, ML模式土壤pH在 N_1 、 N_2 、 N_3 水平下分别降低1.0%、0.7%、0.5%。ML模式土壤pH与MH模式在3个氮水平下无显著差异。减氮处理下pH降幅更显著, 表明减氮是触发豆科混作调节pH的关键条件。

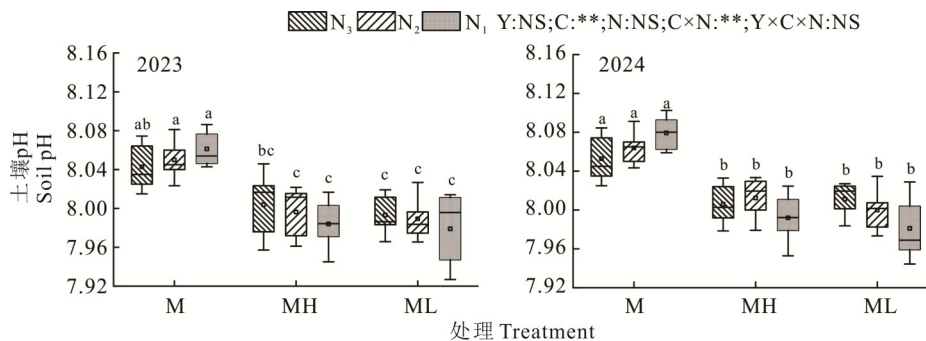


图4 不同种植模式和施氮水平下土壤pH

Fig. 4 Soil pH under different cropping patterns and nitrogen application levels

2.2.2 土壤有机质含量 种植模式、施氮制度及二者互作效应对土壤有机质含量有显著影响($P < 0.01$), 年际间、年度 \times 种植模式 \times 施氮制度的互作效应对土壤有机质的影响均不显著($P > 0.05$, 图5)。与M相比, MH模式土壤有机质含量在 N_1 、 N_2 水平下分别提高3.9%、2.2%, N_3 水平下差异不显著, ML模式土壤有机质含量在 N_1 、

N_2 水平下分别提高5.1%、3.4%，在 N_3 下差异不显著。ML模式土壤有机质含量2023年在3个氮水平下与MH差异不显著，在2024年 N_1 水平下较之提高3.3%。不同施氮水平间， N_1 处理土壤有机质含量在M模式下较 N_2 、 N_3 分别降低0.8%、2.5%，与 N_2 差异不显著，在MH模式下2023年较 N_3 提高1.6%，与 N_2 差异不显著，2024年与 N_2 、 N_3 差异均不显著，在ML模式下2023年较 N_3 提高1.9%，与 N_2 差异不显著，2024年较 N_2 、 N_3 分别提高1.4%、2.2%。混作豆科饲草显著提高土壤有机质含量，在 N_1 条件下，青贮玉米—拉巴豆混作表现更优，可能与拉巴豆具有更高的地上生物量和根系残体输入有关。此外，减氮强化混作效应，表明过量氮肥可能抑制微生物对有机质的矿化。

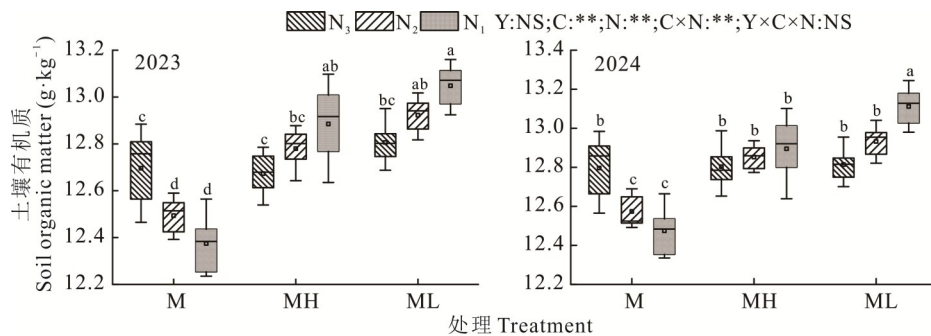


图5 不同种植模式和施氮水平下土壤有机质含量

Fig. 5 Soil organic matter content under different cropping patterns and nitrogen application levels

2.3 不同种植模式和施氮水平对氮、磷、钾养分的影响

2.3.1 氮、磷、钾全量养分 种植模式、施氮制度及二者互作效应对土壤全氮、全磷和全钾含量有显著影响 ($P < 0.01$), 年际间、年度×种植模式×施氮制度的互作效应对土壤全氮、全磷、全钾含量的影响均不显著 ($P > 0.05$, 表1)。与M相比, MH模式土壤全氮含量在 N_1 、 N_2 、 N_3 水平下分别提高9.2%、4.4%、4.1%, 全磷含量分别

表1 不同种植模式和施氮水平下全生育期土壤全效养分含量

Table 1 Soil total nutrient content during the whole growth period under different cropping patterns and nitrogen application levels ($g \cdot kg^{-1}$)

种植模式 Cropping pattern	施氮水平 N application rate	全氮 Total nitrogen		全磷 Total phosphorus		全钾 Total potassium	
		2023	2024	2023	2024	2023	2024
M	N_3	1.05ef	1.06d	1.43e	1.44e	20.42d	20.51d
	N_2	1.03f	1.03e	1.42e	1.43e	20.36d	20.44d
	N_1	0.96g	0.98f	1.41e	1.43e	20.25d	20.34d
MH	N_3	1.08abc	1.12ab	1.51d	1.50d	21.50c	21.54c
	N_2	1.07bcd	1.10bc	1.53c	1.54c	22.28b	22.38b
	N_1	1.06de	1.07d	1.56b	1.55bc	22.37b	22.41b
ML	N_3	1.10a	1.13a	1.52cd	1.52d	21.58c	21.59c
	N_2	1.09ab	1.11ab	1.56b	1.57b	22.25b	22.29b
	N_1	1.07cde	1.09cd	1.60a	1.59a	22.71a	23.38a
显著性 Significance (P value)							
种植模式 Cropping pattern (C)		**	**	**	**	**	**
施氮水平 Nitrogen application level (N)		**	**	**	**	**	**
年 Year (Y)		NS	NS	NS	NS	NS	NS
$C \times N$		**	**	**	**	**	**
$Y \times C \times N$		NS	NS	NS	NS	NS	NS

同列不同小写字母代表各处理之间差异性显著 ($P < 0.05$) Different lowercase letters within the same column represent significant differences among treatments ($P < 0.05$); *: $P < 0.05$; **: $P < 0.01$; NS: $P > 0.05$; 下同 The same below.

壤速效养分且减氮处理下速效养分增幅更显著,表明豆科混作可优化养分循环效率,减少化学氮肥对土壤微生物功能产生抑制,从而维持养分供应的可持续性。

2.4 不同种植模式和施氮水平对产量的影响

种植模式、施氮制度及二者互作效应对饲草产量和能量产量影响显著($P < 0.01$), 年际间、年度 \times 种植模式 \times 施氮制度的互作效应对饲草产量和能量产量均无显著影响($P > 0.05$, 图6)。种植模式间比较, MH模式饲草产量在 N_1 、 N_2 水平下比M模式相同施氮水平分别提高23.1%、15.2%, 但 N_3 水平下差异不显著, 能量产量在 N_1 、 N_2 和 N_3 水平下2023年较M模式相同施氮水平分别提高25.2%、16.9%和7.1%, 2024年能量产量在 N_1 、 N_2 水平下较M模式相同施氮水平分别提高27.2%、17.5%, 在 N_3 水平下差异不显著; ML模式饲草产量在 N_1 、 N_2 水平下较M模式相同施氮水平分别提高30.5%、19.4%, 在 N_3 水平下差异不显著, 能量产量在 N_1 、 N_2 和 N_3 水平下较M模式相同施氮水平分别提高33.6%、21.0%和7.2%。此外, ML模式饲草和能量产量在 N_1 水平下比MH模式分别提高9.6%、9.5%, 在 N_2 、 N_3 水平下差异不显著。施氮水平间比较, N_1 处理饲草产量在M模式和MH模式中均与 N_2 、 N_3 差异不显著, 在ML模式中均与 N_2 差异不显著, 较 N_3 提高20.4%; N_1 处理能量产量在M模式中均与 N_2 差异不显著, 较 N_3 降低8.7%, 在MH模式中均与 N_2 差异不显著, 较 N_3 提高10.5%, 在ML模式中较 N_2 、 N_3 分别提高8.0%、17.8%。此外, MH和ML模式 N_1 水平下的饲草产量较M模式 N_3 水平分别增加15.8%和23.8%, 能量产量增长17.8%和28.6%。ML模式下 N_1 水平较MH模式 N_1 水平表现出显著的产量优势, 其饲草增产幅度高出后者8.0个百分点, 这一差异验证了拉巴豆混作系统在氮素受限环境中的特殊适应性。ML模式 N_1 水平其单位资源投入产生的能量值较M模式 N_3 水平提升28.6%, 不仅显著高于饲草产量的提升幅度, 更凸显该种植模式在能量产出方面的倍增效应。

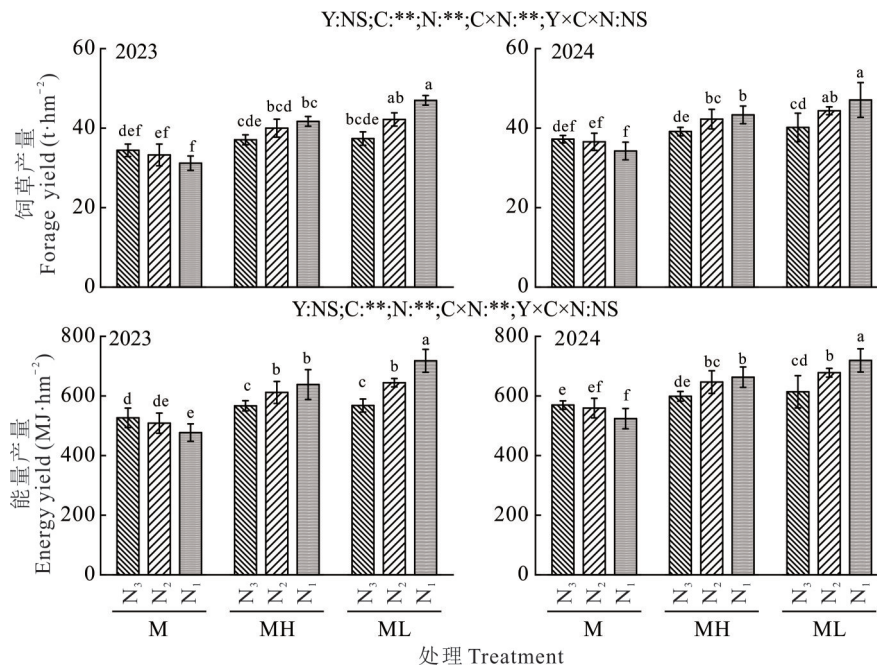


图6 不同种植模式和施氮水平下饲草产量和能量产量

Fig. 6 Forage yield and energy yield under different cropping patterns and nitrogen application levels

2.5 土壤理化特征与饲草产量的关系

相关性分析显示,土壤有机质(soil organic matter)与土壤全效养分和速效养分之间存在显著正相关,而土壤pH、容重与有机质、全效养分、速效养分呈显著负相关(图7)。Mantel检验、通径分析表明,土壤理化性质(pH、容重除外)与饲草产量和能量产量显著正相关(图7和表3)。由直接通径系数可知,对产量的影响为全磷 $>$ 硝态氮 $>$ 速效钾 $>$ pH $>$ 有机质 $>$ 全钾 $>$ 有效磷 $>$ 全氮 $>$ 容重 $>$ 铵态氮 $>$ 孔隙度,由饲草产量与土壤理化因子的间接

途径系数可知,铵态氮与全磷相互作用、孔隙度与全磷相互作用、全钾与全磷相互作用、速效钾与全磷相互作用、硝态氮与全磷相互作用对饲草产量的贡献率较大(表 3),以上结果表明混作豆科饲草和氮肥减施通过降低土壤 pH 和容重,促进了全磷、硝态氮、全钾、速效钾、有效磷、有机质含量提升,进而提高饲草产量。

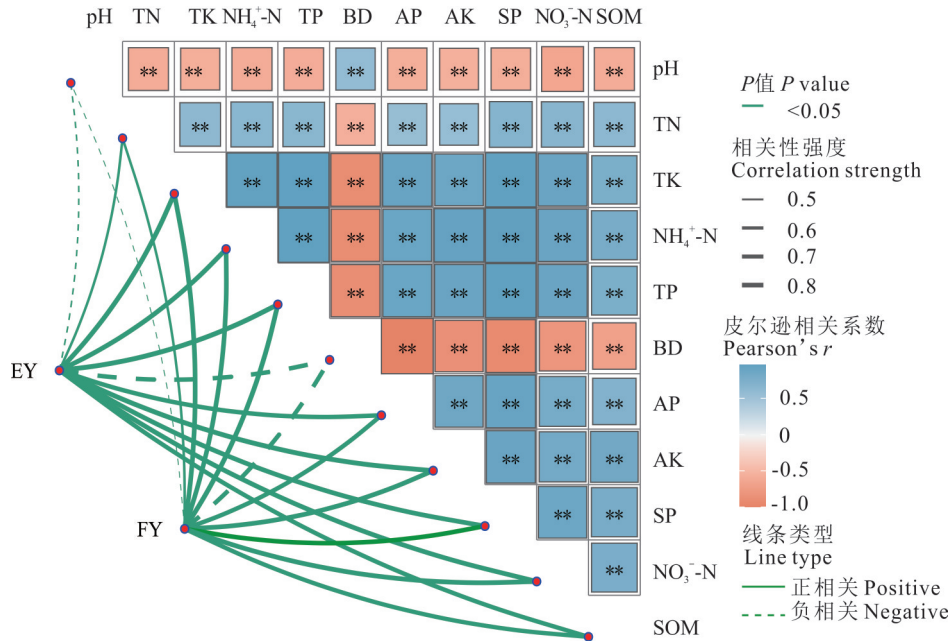


图 7 土壤理化特征与饲草产量的关系

Fig. 7 Relationship between soil physical and chemical characteristics and forage yield

EY: 能量产量 Energy yield; FY: 饲草产量 Forage yield; TN: 全氮 Total nitrogen; TK: 全钾 Total potassium; $\text{NH}_4^+\text{-N}$: 铵态氮 Ammonium nitrogen; TP: 全磷 Total phosphorus; BD: 容重 Bulk density; AP: 有效磷 Available phosphorus; AK: 速效钾 Available potassium; SP: 孔隙度 Soil porosity; $\text{NO}_3^-\text{-N}$: 硝态氮 Nitrate nitrogen; SOM: 有机质 Soil organic matter.

表 3 不同处理饲草产量与土壤理化因子的相关系数和途径系数

Table 3 Correlation coefficient and path coefficient between forage yield and soil physical and chemical factors under different treatments

指标 Parameter	SCCY	DPC	间接途径系数 Indirect path coefficient										
			pH	TN	TK	$\text{NH}_4^+\text{-N}$	TP	BD	AP	AK	SP	$\text{NO}_3^-\text{-N}$	SOM
pH	-0.548**	0.160	—	0.005	-0.091	0.201	-0.319	-0.061	-0.014	-0.265	0.194	-0.255	-0.103
TN	0.538**	-0.009	-0.085	—	0.080	-0.172	0.292	0.048	0.006	0.206	-0.184	0.255	0.100
TK	0.820**	0.131	-0.111	-0.006	—	-0.247	0.431	0.077	0.019	0.324	-0.258	0.339	0.120
$\text{NH}_4^+\text{-N}$	0.805**	-0.262	-0.123	-0.006	0.123	—	0.433	0.075	0.019	0.341	-0.260	0.341	0.124
TP	0.842**	0.454	-0.112	-0.006	0.125	-0.251	—	0.076	0.018	0.333	-0.257	0.343	0.123
BD	-0.770**	-0.084	0.115	0.005	-0.119	0.233	-0.404	—	-0.023	-0.319	0.246	-0.307	-0.111
AP	0.356**	0.035	-0.064	-0.002	0.070	-0.138	0.233	0.057	—	0.170	-0.152	0.116	0.307
AK	0.822**	0.369	-0.115	-0.005	0.115	-0.242	0.408	0.073	0.016	—	-0.242	0.310	0.134
SP	0.798**	-0.269	-0.115	-0.006	0.126	-0.253	0.432	0.077	0.019	0.331	—	0.332	0.125
$\text{NO}_3^-\text{-N}$	0.826**	0.380	-0.107	-0.006	0.117	-0.235	0.408	0.069	0.011	0.302	-0.235	—	0.123
SOM	0.755**	0.158	-0.104	-0.006	0.099	-0.205	0.351	0.060	0.007	0.312	-0.212	0.295	—

SCCY: 与产量的简单相关系数 Simple correlation coefficient with yield; DPC: 直接途径系数 Direct path coefficient; TN: 全氮 Total nitrogen; TK: 全钾 Total potassium; $\text{NH}_4^+\text{-N}$: 铵态氮 Ammonium nitrogen; TP: 全磷 Total phosphorus; BD: 容重 Bulk density; AP: 有效磷 Available phosphorus; AK: 速效钾 Available potassium; SP: 孔隙度 Soil porosity; $\text{NO}_3^-\text{-N}$: 硝态氮 Nitrate nitrogen; SOM: 有机质 Soil organic matter.

3 讨论

土壤容重和孔隙度对土壤通气性、透水性和保水性等性质有显著影响^[15-16]。较高的孔隙度通常有利于土壤中的空气和水分循环,为植物根系提供良好的生长环境,而较低的容重意味着土壤较疏松,利于根系伸展和土壤养分吸收^[17-18]。禾豆混作能增加有机质积累、促进土壤团粒结构形成、改善土壤物理性质,是改善土壤结构的潜力措施^[19-20]。本研究发现,青贮玉米豆科饲草混播系统中,土壤容重和土壤孔隙度大小受到施氮水平明显影响,且氮肥减施是该混作系统降低土壤容重和提高土壤孔隙度的关键。与单作青贮玉米相比,青贮玉米秣食豆混作系统的土壤容重在氮肥减施30%和15%条件下可降低5.5%和4.4%,土壤孔隙度提高6.6%和5.8%,而青贮玉米拉巴豆混作系统的土壤容重在两种施氮水平下可降低8.0%和5.8%,土壤孔隙度可提高10.8%和7.5%,这与庞党伟等^[21]研究玉米秸秆还田配合减氮措施可以降低土壤容重和提高土壤孔隙度、郭常英等^[22]研究燕麦(*Avena sativa*)与饲用豌豆(*Pisum sativum*)混播可以降低土壤容重和提高土壤孔隙度试验结果相似,其原因可能是过量施氮在抑制豆科作物固氮作用的同时,阻碍了土壤团粒结构的形成^[23]。本研究中,青贮玉米拉巴豆混作系统的土壤容重较青贮玉米秣食豆混作明显降低,这可能是由于拉巴豆地下根系和固氮作用优于秣食豆所致。通过青贮玉米与拉巴豆混作结合氮肥减施,显著改善土壤物理结构,为减少化肥依赖,发展生态友好型农业提供了科学依据。这一模式有助于实现土壤健康与作物高产的双重目标。

土壤养分是影响作物产量的关键因素之一^[24-25],通过合理的施肥管理和土壤养分调控措施,可显著改善土壤肥力状况,提高作物产量和品质^[26]。本研究发现,青贮玉米和豆科饲草组成的混作系统配合减氮措施能显著提升土壤养分含量,特别是在氮肥减施30%处理下效果较明显。这与前人研究苜蓿(*Medicago sativa*)与老芒麦(*Elymus sibiricus*)混播可以改善土壤养分的结果相似^[27]。究其原因,第一,豆科作物利用其生物固氮特性增加了土壤中氮素有效性^[28-29],并使土壤中本底氮素被保存下来^[30];第二,豆科作物的固氮作用会间接促进土壤微生物活动和有机质的分解,利于土壤全磷释放和积累,并且豆科植物根系分泌的酸性物质和酶类能够分解土壤中的难溶性磷,使其转化为植物可利用的有效磷;第三,豆科植物通过根系生理活动和根系分泌物,利于土壤中难溶性钾的释放,从而增加土壤速效钾和全钾含量^[31],此外,也有研究认为豆科植物根系分泌的酸性物质会降低土壤pH,进而影响土壤钾素的有效性^[32]。本研究中,氮肥减施条件下,青贮玉米拉巴豆混作系统的土壤养分含量明显高于混作秣食豆,可能是因为秣食豆的生物固氮能力和根系分布情况弱于混播拉巴豆^[33]。豆科饲草通过生物固氮作用和根系活动显著提升土壤氮、磷、钾等养分有效性,尤其在减氮30%条件下效果最佳。这一模式为减少氮肥投入提供了科学依据,通过豆科作物的自然固氮能力替代部分化学氮源,降低农业生产成本,缓解化肥过量使用引发的土壤酸化、养分失衡等问题。

合理施氮下,禾豆混播可节约生产资源并显著提高作物产量^[34]。本研究发现,青贮玉米豆科饲草混作系统中,施氮量是发挥产量优势的关键。与单作青贮玉米相比,秣食豆混作的饲草产量在氮肥减施30%和15%条件下可提高23.1%和15.2%,而拉巴豆混作的饲草产量在两种施氮水平下可提高30.5%和19.4%,但传统施氮水平下并未表现出任何混作优势。这与王斌等^[35]研究饲用高粱(*Sorghum bicolor*)与拉巴豆混播结合适量氮肥可促进饲草生长的结果相似。这可能是因为减氮增加了混作豆科饲草的固氮作用,不仅满足自生氮素需求,还通过根系分泌、残茬分解等方式向土壤中释放氮素,为青贮玉米提供额外氮源^[36];并且混作能形成高低有序的群体结构,青贮玉米直立植株可支撑攀援型豆科作物生长,两种作物枝叶交错配置,增加群体光合作用面积,提高光能利用效率^[37]。因此,青贮玉米混作豆科饲草能支撑氮肥减施。河西绿洲灌区具有丰富的光热资源,蕴藏着巨大的饲草开发潜力。利用豆科饲草固氮原理使豆科饲草与青贮玉米混播提高了土地生产力和土壤肥力,也减少了氮肥施用量,为企业和养殖户种植节省了部分肥料支出,提高了经济效益。目前,青贮玉米与拉巴豆混播结合施氮量 $252\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 模式表现出了良好的推广应用前景。

本研究中,混作与减氮处理对土壤理化性质及饲草产量有着显著影响。混作模式下,不同植物根系相互作用,一方面促进了土壤中养分的循环和转化,如豆科根系分泌物能够活化土壤中磷元素,提高有效磷含量,进而为饲草生长提供了更充足的磷素营养^[38-39];另一方面通过根系穿插与残体积累改善了土壤结构,提高了土壤保水保

肥能力,间接影响有机质、氮素等养分的有效性^[40-41]。减氮处理则避免过量氮肥对土壤理化性质的不良影响,如土壤酸化、板结等问题^[42]。适量减少氮肥投入后,土壤微生物群落结构可能发生改变,一些有益微生物的活性增强,参与到土壤氮素转化过程中,使土壤中氮素形态与含量维持在更适宜饲草吸收利用的水平,如促进铵态氮向硝态氮的转化,优化全氮中不同形态氮的比例等^[43-44]。这些土壤理化性质的综合作用,为饲草生长创造了更优的土壤环境。通过通径分析发现铵态氮与全磷相互作用、孔隙度与全磷相互作用、全钾与全磷相互作用、速效钾与全磷相互作用对饲草产量的贡献率较大,说明混作和氮肥减施通过改善土壤理化特性最终提高了饲草产量。然而,混作系统是一个复杂且动态变化的系统,受气候、土壤等生态环境及作物本身的多重影响,因此,混作系统对作物产量的长期影响及其增产机制有待进一步探索。

4 结论

青贮玉米混作豆科饲草结合氮肥减施30%可降低土壤容重和pH,增大孔隙度,增加土壤有机质并提高土壤全磷、硝态氮、全钾、速效钾、有效磷等土壤养分含量,最终提高饲草产量和能量产量。两种混作系统中,青贮玉米混作拉巴豆表现更优。因此,青贮玉米混作拉巴豆结合施氮量 $252\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 可作为河西绿洲灌区青贮玉米生产适宜采用的栽培管理措施。

参考文献 References:

- [1] Sun Y Q, Wang Y W, Fan X Q, *et al.* Effects of silage maize and feeding millet intercropping on their yield. *Pratacultural Science*, 2023, 40(12): 3138–3149.
孙颖琦, 王钰文, 范晓庆, 等. 青贮玉米与饲用谷子间作对产量相关性状的影响. *草业科学*, 2023, 40(12): 3138–3149.
- [2] Wang P F, Yu A Z, Wang Y L, *et al.* Effects of multiple cropping green manure after wheat harvest combined with reduced nitrogen application on soil hydrothermal characteristics and maize yield. *Acta Agronomica Sinica*, 2023, 49(10): 2793–2805.
王鹏飞, 于爱忠, 王玉珑, 等. 麦后复种绿肥翻压还田结合减氮对土壤水热特性及玉米产量的影响. *作物学报*, 2023, 49(10): 2793–2805.
- [3] Li R, Mian Y M, Hou X Q, *et al.* Effects of straw returning with nitrogen application on soil properties, water and nitrogen use efficiency of maize. *Acta Agronomica Sinica*, 2023, 49(10): 2820–2832.
李荣, 勉有明, 侯贤清, 等. 秸秆还田配施氮肥对土壤性质及玉米水氮利用效率的影响. *作物学报*, 2023, 49(10): 2820–2832.
- [4] Gao R M, Yan J, Zou S, *et al.* Effects of nitrogen fertilizer on microbial community and metabolism in rhizosphere soil of soybean. *Soils and Crops*, 2023, 12(4): 373–384.
高瑞敏, 严君, 邹狮, 等. 氮肥对大豆根际土壤微生物群落和代谢的影响. *土壤与作物*, 2023, 12(4): 373–384.
- [5] Wei Z Y, Zhang H X, Shi W, *et al.* Effects of planting methods and nitrogen application on forage crop yield, quality and water use in arid area of northwest China. *Acta Agronomica Sinica*, 2022, 48(10): 2638–2653.
魏正业, 张海星, 石薇, 等. 种植方式与施氮对西北旱区饲草作物产量、品质和水分利用的影响. *作物学报*, 2022, 48(10): 2638–2653.
- [6] Yang R J, Wen M M, Liu Y, *et al.* Effects of summer green manure and nitrogen application on soil nitrogen composition in a dryland winter wheat field. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2024, 30(9): 1639–1649.
杨蕊嘉, 温萌萌, 刘洋, 等. 绿肥填闲种植和施氮对旱作冬小麦农田土壤氮组分的影响. *植物营养与肥料学报*, 2024, 30(9): 1639–1649.
- [7] Wei X J, Feng T X, Dekejia, *et al.* Study on the effect of different grass and bean mixture treatments on forage quality and soil nutrients in the Sanjiangyuan area. *Pratacultural Science*, 2023, 40(9): 2348–2362.
魏希杰, 冯廷旭, 德科加, 等. 三江源区不同禾豆混播处理对饲草品质及土壤养分的影响. *草业科学*, 2023, 40(9): 2348–2362.
- [8] Gu J C, Wang W M, Wang Z, *et al.* Effects of maize and soybean intercropping on soil phosphorus bioavailability and microbial community structure in rhizosphere. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2023, 34(11): 3030–3038.
顾嘉诚, 王文敏, 王振, 等. 玉米/大豆间作对根际土壤磷素生物有效性和微生物群落结构的影响. *应用生态学报*, 2023, 34(11): 3030–3038.
- [9] Zhao B W, Zhan Y, Fang J Q, *et al.* Mixing ratios effects on production performance and quality in oat and common vetch

- intercropping systems. *Chinese Journal of Grassland*, 2024, 46(3): 81–90.
- 赵保文, 詹圆, 方嘉琪, 等. 混播比例对燕麦与箭筈豌豆生产性能的影响. *中国草地学报*, 2024, 46(3): 81–90.
- [10] Han F R, Li J Y, Tian G F. Development overview of the forage industry in Gansu Province. *Gansu Animal Husbandry and Veterinary Medicine*, 2023, 53(4): 9–13.
- 韩芙蓉, 李积友, 田贵丰. 甘肃省饲草产业发展概况. *甘肃畜牧兽医*, 2023, 53(4): 9–13.
- [11] E S Z, Che Z X, Zeng X B, *et al.* Effects of long-term fertilization on irrigated desert soil organic carbon stock and soil aggregate in Hexi oasis. *Chinese Journal of Soil Science*, 2014, 45(5): 1157–1163.
- 俄胜哲, 车宗贤, 曾希柏, 等. 长期施肥对河西绿洲灌漠土有机碳库储量及水稳性团聚体的影响. *土壤通报*, 2014, 45(5): 1157–1163.
- [12] Jensen E S, Carlsson G, Hauggaard-Nielsen H. Intercropping of grain legumes and cereals improves the use of soil N resources and reduces the requirement for synthetic fertilizer N: A global-scale analysis. *Agronomy for Sustainable Development*, 2020, 40(1): 1–9.
- [13] Bao S D. *Soil agrochemical analysis (the third edition)*. Beijing: China Agriculture Press, 2000.
- 鲍士旦. *土壤农化分析(第3版)*. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [14] Chen F. *Agroecology*. Beijing: China Agriculture Press, 2022: 316.
- 陈阜. *农业生态学*. 北京: 中国农业出版社, 2022: 316.
- [15] Bian Y Y, Zhang Z M, Fu Z, *et al.* Distribution characteristics of soil microbial communities of different vegetation restoration models and their correlation with soil physical and chemical properties in desert steppe. *Acta Agrestia Sinica*, 2021, 29(4): 655–663.
- 卞莹莹, 张志敏, 付镇, 等. 荒漠草原区不同植被恢复模式土壤微生物菌落分布特征及其与土壤理化性质的相关性. *草地学报*, 2021, 29(4): 655–663.
- [16] Han C W, Kong X M, Song C L, *et al.* Effects of different soil bulk density on growth and yield of corn under cinnamon soil in Shandong Province. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2017(6): 143–148.
- 韩成卫, 孔晓民, 宋春林, 等. 山东省褐土土壤容重对玉米生长发育及产量形成的影响. *中国土壤与肥料*, 2017(6): 143–148.
- [17] Jia A Y, Zhang Y Y, Zhao W Z, *et al.* Characteristics of soil macropores and water infiltration in oasis croplands in an arid region. *Acta Pedologica Sinica*, 2022, 59(2): 486–497.
- 贾昂元, 张勇勇, 赵文智, 等. 干旱区绿洲农田土壤大孔隙与水分入渗特征. *土壤学报*, 2022, 59(2): 486–497.
- [18] Yang Y D, Ma J L, Ma H B, *et al.* Effects of grazing exclusion on root trait characteristics of dominant plants in the desert steppe. *Pratacultural Science*, 2023, 40(6): 1507–1517.
- 杨彦东, 马静利, 马红彬, 等. 封育对荒漠草原优势植物根系性状特征的影响. *草业科学*, 2023, 40(6): 1507–1517.
- [19] Xu Q, Tian X H, Du W H. Effects of mix-sowing of triticale and legume forage on surface soil fertility in alpine pastoral areas. *Grassland and Turf*, 2023, 43(2): 107–115.
- 徐强, 田新会, 杜文华. 高寒牧区小黑麦与3种豆科牧草混播草地的土壤肥力特征. *草原与草坪*, 2023, 43(2): 107–115.
- [20] Wang M T, Miao Y J, Zhao Y H, *et al.* Effects of different artificial grasslands on soil nutrient content in river valley of Nyingchi City. *Chinese Journal of Grassland*, 2023, 45(10): 144–150.
- 王明涛, 苗彦军, 赵玉红, 等. 林芝市河谷地带不同人工草地建植对土壤养分含量的影响. *中国草地学报*, 2023, 45(10): 144–150.
- [21] Pang D W, Chen J, Tang Y H, *et al.* Effect of returning methods of maize straw and nitrogen treatments on soil physicochemical property and yield of winter wheat. *Acta Agronomica Sinica*, 2016, 42(11): 1689–1699.
- 庞党伟, 陈金, 唐玉海, 等. 玉米秸秆还田方式和氮肥处理对土壤理化性质及冬小麦产量的影响. *作物学报*, 2016, 42(11): 1689–1699.
- [22] Guo C Y, Wang W, Peng D, *et al.* Effect of sowing method and row spacing on soil physicochemical properties of oat/forage pea grassland in alpine regions. *Pratacultural Science*, 2023, 40(3): 654–664.
- 郭常英, 王伟, 彭丹, 等. 播种方式和行距对高寒地区燕麦/饲用豌豆草地土壤理化特性的影响. *草业科学*, 2023, 40(3): 654–664.
- [23] Huo Y Y, Cao H, Chai S X, *et al.* Effects of mixed sowing of different forage on soil texture and fertility. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2020, 38(3): 238–244.
- 霍雅媛, 曹宏, 柴守玺, 等. 不同豆禾牧草混播对土壤质地及肥力的影响. *干旱地区农业研究*, 2020, 38(3): 238–244.

- [24] Meng L Y, Tang J H, Xu W X, *et al.* Response of soil nutrients and cotton yield to nitrogen reduction rate in continuous cropping cotton field. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2024, 30(6): 1234–1242.
孟令贻, 唐江华, 徐文修, 等. 连作棉田土壤养分、棉花产量对减施氮肥的响应. *植物营养与肥料学报*, 2024, 30(6): 1234–1242.
- [25] Wang Z H, Zhang H H, Chang L Y, *et al.* Effects of optimal multifunctional growth-promoting bacteria ‘HS3’ on maize and peanut growth in a maize-peanut intercropping system. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2023, 29(1): 142–157.
王中华, 张辉红, 常沪尹, 等. 酸快生芽孢杆菌‘HS3’培养条件的优化及其在玉米花生间作体系中的促生效果. *植物营养与肥料学报*, 2023, 29(1): 142–157.
- [26] Cheng Q, Mao X L, Sun T, *et al.* Effects of long-term combined application of chemical fertilizers with different organic materials on soil microbial ecological stoichiometry and community structure. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2024, 30(2): 209–220.
程琪, 毛霞丽, 孙涛, 等. 长期化肥与不同有机物料配施对土壤微生物生态化学计量特征和群落结构的影响. *植物营养与肥料学报*, 2024, 30(2): 209–220.
- [27] Du S S, Qi J, Li X, *et al.* Effects of alfalfa and *Elymus sibiricus* mixed sowing on forage yield and soil nutrients. *Chinese Journal of Grassland*, 2024, 46(2): 74–82.
独孤双, 祁娟, 李霞, 等. 苜蓿与老芒麦混播对牧草产量及土壤养分的影响. *中国草地学报*, 2024, 46(2): 74–82.
- [28] Wang Y F, Liu H Q, Zhao X N, *et al.* Effects of water and root separation on nitrogen uptake, utilization and transfer in a gramineae-legume intercropping system. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2024, 38(4): 279–287.
王一帆, 刘华清, 赵西宁, 等. 禾豆间作系统水分和根系分隔对牧草氮素吸收利用及转移的影响. *水土保持学报*, 2024, 38(4): 279–287.
- [29] Zhang W, Lu J S, Bai J, *et al.* Introduction of soybean into maize field reduces N₂O emission intensity via optimizing nitrogen source utilization. *Journal of Cleaner Production*, 2024, 442(25): 141051–141052.
- [30] Luo Y, Zhang J D, Zhou G P, *et al.* Intercropping maize with green manure crops at various utilization patterns improves maize yield and soil fertility in Hexi Oasis irrigated area. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2022, 28(3): 402–413.
罗跃, 张久东, 周国朋, 等. 河西绿洲灌区间作绿肥及其不同利用方式对玉米产量及土壤肥力的提升效应. *植物营养与肥料学报*, 2022, 28(3): 402–413.
- [31] Shi X L, Guo P, Ren J Y, *et al.* A salt stress tolerance effect study in peanut based on peanut//sorghum intercropping system. *Scientia Agricultura Sinica*, 2022, 55(15): 2927–2937.
史晓龙, 郭佩, 任婧瑶, 等. 基于花生//高粱间作模式的花生盐胁迫耐受性效应研究. *中国农业科学*, 2022, 55(15): 2927–2937.
- [32] Su B B, Zhang Y, Daorina. Correlation analysis between fungal community characteristics and soil physicochemical factors in the rhizosphere of four legumes. *Acta Agrestia Sinica*, 2021, 29(12): 2670–2677.
苏贝贝, 张英, 道日娜. 4种豆科植物根际土壤真菌群落特征与土壤理化因子间相关性分析. *草地学报*, 2021, 29(12): 2670–2677.
- [33] Wang M J, Shi W, Chang S H, *et al.* Effects of irrigation modes on forage yield, quality and water use of corn–legume intercropping systems in the Hexi irrigation area. *Acta Prataculturae Sinica*, 2023, 32(3): 13–29.
王茂鉴, 石薇, 常生华, 等. 灌溉模式对河西灌区禾–豆间作系统饲草产量、品质和水分利用的影响. *草业学报*, 2023, 32(3): 13–29.
- [34] Ben C Z, Ying Z, Ping C, *et al.* Maize–legume intercropping promote N uptake through changing the root spatial distribution, legume nodulation capacity, and soil N availability. *Journal of Integrative Agriculture*, 2022, 21(6): 1755–1771.
- [35] Wang B, Shi J M, Wang T F, *et al.* Effects of nitrogen application on productive performance and nitrogen fertilizer contribution rate of forage sorghum/lablab bean mixed cropping. *Acta Prataculturae Sinica*, 2025, 34(4): 53–63.
王斌, 史佳梅, 王腾飞, 等. 施氮对饲用高粱/拉巴豆混播草地生产性能和氮肥贡献率的影响. *草业学报*, 2025, 34(4): 53–63.
- [36] Wang W, Li M Y, Gong D S, *et al.* Water use of intercropped species: Maize-soybean, soybean-wheat and wheat-maize. *Agricultural Water Management*, 2022, 269(7): 107690.
- [37] Jiang Z W, Liu G Y, An H Y, *et al.* Effects of planting density and nitrogen application on forage yield, quality and nitrogen use efficiency in a maize/forage soybean intercropping system. *Acta Prataculturae Sinica*, 2022, 31(7): 157–171.
蒋紫薇, 刘桂宇, 安昊云, 等. 种植密度与施氮对玉米/秣食豆间作系统饲草产量、品质和氮肥利用的影响. *草业学报*,

- 2022, 31(7): 157–171.
- [38] Chen X, Chen H Y H. Plant mixture balances terrestrial ecosystem C:N:P stoichiometry. *Nature Communications*, 2021, 12(1): 4562.
- [39] Wei P Z, Dario F, Guang C L, *et al.* Interspecific interactions affect N and P uptake rather than N:P ratios of plant species: Evidence from intercropping. *Journal of Plant Ecology*, 2022, 15(2): 223–236.
- [40] Zhang W P, Surigaoge S, Yang H, *et al.* Diversified cropping systems with complementary root growth strategies improve crop adaptation to and remediation of hostile soils. *Plant and Soil*, 2024, 502(1): 7–30.
- [41] Yu R P, Yang H, Xing Y, *et al.* Belowground processes and sustainability in agroecosystems with intercropping. *Plant and Soil*, 2022, 476(1): 263–288.
- [42] Wang Z, Tao T T, Hu W, *et al.* Forms of nitrogen inputs regulate the intensity of soil acidification. *Global Change Biology*, 2023, 29(14): 4044–4055.
- [43] Zhang X Q, Huang G Q, Bian X M, *et al.* Effects of nitrogen fertilization and root separation on agronomic traits of intercropping soybean, quantity of micro organisms and activity of enzymes in soybean rhizosphere. *Acta Pedologica Sinica*, 2012, 49(4): 731–739.
张向前, 黄国勤, 卞新民, 等. 施氮肥与隔根对间作大豆农艺性状和根际微生物数量及酶活性的影响. *土壤学报*, 2012, 49(4): 731–739.
- [44] Chen P, Du Q, Liu X M, *et al.* Effects of reduced nitrogen inputs on crop yield and nitrogen use efficiency in a long-term maize-soybean relay strip intercropping system. *PLoS One*, 2017, 12(9): e0184503.