

DOI: 10.11686/cyxb2024207

http://cyxb.magtech.com.cn

张晓娟, 魏娇娇, 陈彩锦, 等. 氮肥周年优化对灌区饲用小黑麦-青贮玉米复种系统生产力的影响. 草业学报, 2025, 34(4): 38—52.

ZHANG Xiao-juan, WEI Jiao-jiao, CHEN Cai-jin, *et al.* Optimization of annual nitrogen fertilizer application to increase the productivity of a forage triticale-silage maize multiple cropping system in an irrigated area. *Acta Prataculturae Sinica*, 2025, 34(4): 38—52.

氮肥周年优化对灌区饲用小黑麦-青贮玉米复种系统生产力的影响

张晓娟^{1,2}, 魏娇娇³, 陈彩锦², 李雪雪³, 马宏秀¹, 李凯², 陈永伟⁴, 孙权^{3*}

(1. 宁夏大学林业与草业学院, 宁夏 银川 750021; 2. 宁夏农林科学院固原分院, 宁夏 固原 756000; 3. 宁夏大学农学院, 宁夏 银川 750021; 4. 宁夏农垦农林牧技术推广服务中心, 宁夏 银川 750021)

摘要:为了缓解宁夏季节性青饲料短缺和氮肥施用过量等草畜发展不平衡现状。开展秋播饲用小黑麦-青贮玉米复种模式及其周年氮肥合理施用研究,采用单因素随机区组设计,以秋播饲用小黑麦-青贮玉米复种系统为研究对象,设置5个周年优化施氮量,均为纯氮水平(单位为 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$),分别为 $N_1(0\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}, \text{CK})$ 、 $N_2(150\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2})$ 、 $N_3(300\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2})$ 、 $N_4(450\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2})$ 、 $N_5(600\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2})$,系统研究氮肥周年优化对复种系统生产性能、营养品质及氮素利用率的影响。结果表明:氮肥周年优化施氮量对复种系统两种饲草株高、茎粗、SPAD值、干物质积累、产量和品质均有显著性影响。其中,两种饲草生长指标和干物质积累随着生育期的延长逐渐增大,小黑麦在开花期,青贮玉米在灌浆期各生长指标和干物质积累达到峰值,而随着施氮量的增加生长指标和干物质积累呈先升高后降低的趋势,但在 N_4 水平时呈下降趋势,整体表现为 $N_4>N_5>N_3>N_2>N_1$;复种系统鲜草产量随着周年施氮量的增加呈逐渐增加的趋势, N_3 水平时产量最大,为 $156.8\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$,比对照增产61.3%,干草产量随周年施氮量的增加呈先增加后降低的趋势, N_4 水平时产量最大,为 $39.1\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$,比对照增产45.9%,农学利用效率最高为30.2%;复种系统鲜草产量与青贮玉米鲜草产量显著正相关,干草产量与小黑麦干草产量极显著正相关,复种系统氮素利用率与青贮玉米中性洗涤纤维(NDF)极显著正相关,与酸性洗涤纤维(ADF)显著正相关。优化施氮量对饲草营养品质有显著影响, N_4 水平下各营养指标表现最好,显著提高了饲用小黑麦、青贮玉米和复种系统粗蛋白(CP)和粗脂肪(EE)含量,其中,小黑麦、青贮玉米和复种系统CP含量比对照分别提高了33.7%、11.2%和31.8%,显著降低了ADF和NDF含量;经肥料效应方程模拟得出,宁夏引黄灌区饲用小黑麦-青贮玉米饲草复种系统最高产量施肥量为 $560\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,最佳经济效益施肥量为 $584\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,可为灌区饲草复种科学栽培提供理论依据。

关键词:氮肥周年优化;灌区;饲草;复种系统;生产力

Optimization of annual nitrogen fertilizer application to increase the productivity of a forage triticale-silage maize multiple cropping system in an irrigated area

ZHANG Xiao-juan^{1,2}, WEI Jiao-jiao³, CHEN Cai-jin², LI Xue-xue³, MA Hong-xiu¹, LI Kai², CHEN Yong-wei⁴, SUN Quan^{3*}

1. College of Forestry and Prataculture, Ningxia University, Yinchuan 750021, China; 2. Guyuan Branch, Ningxia Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Guyuan 756000, China; 3. College of Agriculture, Ningxia University, Yinchuan 750021, China; 4. Ningxia Agricultural Reclamation Agriculture, Forestry and Animal Husbandry Technology Popularizing Service Center, Yinchuan 750021, China

收稿日期:2024-06-03;改回日期:2024-07-25

基金项目:宁夏自然科学基金资助项目(2023AAC03441)和宁夏大学校地合作科技示范项目《麦属饲草-青贮玉米一年两熟水肥一体化高产高效栽培技术与示范》(NXXDHZ202316)资助。

作者简介:张晓娟(1987—),女,宁夏固原人,助理研究员,在读博士。E-mail: elizabeth2006love@163.com

* 通信作者 Corresponding author. E-mail: sun_q@nxu.edu.cn

Abstract: At present, there is a shortage of seasonal green feed in Ningxia, despite the excessive application of nitrogen fertilizer. This situation is indicative of an imbalance between grassland and livestock development in this region. To address this issue, we explored the suitability of a multiple cropping model of forage triticale-silage maize for autumn sowing with different levels of nitrogen fertilizer applied annually. The experiment had a single factor randomized block design. Triticale and silage maize were sown in autumn and subjected to five different fertilization treatments, namely N_1 ($0 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$, CK), N_2 ($150 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$), N_3 ($300 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$), N_4 ($450 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$), and N_5 ($600 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$). The effects of these fertilization treatments on the performance, nutrient quality, and nitrogen-use efficiency of the multiple cropping system were determined. The results showed that the annual nitrogen application rate had significant effects on the plant height, stem diameter, chlorophyll content (measured as SPAD value), dry matter accumulation, yield, and quality of triticale and maize in the multiple cropping system. The growth indexes and dry matter accumulation of both triticale and maize gradually increased during the growth period, reaching peak values in triticale at the flowering stage, and in maize at the filling stage. As the nitrogen application rate increased, the growth indexes and dry matter accumulation showed a trend of first increasing and then decreasing. The highest values of growth indexes and dry matter were in the N_4 treatment. In terms of overall performance, the treatments were ranked as follows: $N_4 > N_5 > N_3 > N_2 > N_1$. The yield of fresh grass in the multiple cropping system increased gradually as the annual nitrogen application rate increased. The maximum yield in the N_5 treatment was $156.8 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$, which was 61.3% higher than that in the control. The hay yield in the N_4 treatment was $39.1 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$, which was 45.9% higher than that in the control. The recovery of applied N in forage was 31.9%, 30.2%, 27.3% and 18.5% for N_2 , N_3 , N_4 and N_5 treatments, respectively. The nitrogen application rate significantly affected the nutritional quality of forage, with the highest values in the N_4 treatment. The contents of crude protein (CP) and crude fat in the triticale forage, corn silage, and the whole cropping system were significantly higher in the N_4 treatment than in the other treatments. The CP contents in triticale forage, corn silage, and the whole cropping system were 33.7%, 11.2%, and 31.8% higher, respectively, in the N_4 treatment than in the control, but the acid detergent fiber and neutral detergent fiber contents were significantly reduced. The nutrient indexes had optimal values in the N_4 treatment. Fertilizer yield response and economic response equations were derived and from these the maximum yield response was predicted to occur at an N application rate of $560 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ and the maximum economic response at $584 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$. These results provide data for the theoretical optimization of forage yield in multiple cropping cultivation systems.

Key words: annual optimization of nitrogen fertilizer; irrigation area; forage grass; multiple cropping system; productivity

随着膳食结构的改变,人均口粮消费总量减少了47%,动物性食品消费总量增加了160%,尤其是对优质动物性蛋白的需求量日益增加^[1]。作为人们日常饮食中重要的蛋白质来源,我国牛羊正遭受着“断粮”的威胁^[2]。饲料短缺现象越来越严重,食物安全也因为饲料危机受到了一定的威胁,如何健康持续地发展牧草产业已经刻不容缓^[3-5]。宁夏地处农牧交错带,是种植业和畜牧业结合交叉发展的区域,具有较强的区域特色,种植业与养殖业间相互依存、相互促进且相互制约^[6]。2003年实施“封山禁牧”后种植业为养殖业提供牧料牧草,养殖业为种植业提供肥料和蓄力,而优质牧草有效供给和高效利用,是草畜产业健康可持续发展的基础^[7-8]。近年来,随着农业产业结构的调整,宁夏草食家畜牧养量呈逐年增长态势,牧草需求量相应增大^[9]。牧草是畜牧业发展的重要物质基础,对促进畜牧业的发展具有重要的意义^[10-11]。但是由于气候条件限制及耕地面积有限,生产中牧草作物和品种单一、栽培技术落后、水肥利用率低等问题,导致牧草生产远不能满足草畜产业发展需求,草畜发展极不平衡。因此,寻求一种高效栽培措施以应对畜牧业发展中牧草不足的问题已成为当前迫切需要解决的问题。而复种是耕地在时间和空间集约化利用的表现形式,利用生物种间互利关系,提高光、热、水、耕地等各种自然资源的周年利用率,缓解作物争地矛盾,增加单位土地牧草产出种类和生物产量,可为优化牧草种植业结构创造有利条件^[12-13]。

除了合理的栽培制度外,化肥投入更是农业可持续发展的物质保证和提供足够粮食产量的关键^[14]。长期以来,大量施用肥料已成为各类粮食作物产量增加的主要措施,尤其是氮肥在提高农作物产量和保证国家粮食总量安全中发挥着巨大的作用^[15-16]。氮是限制饲草作物生长发育、产量以及营养品质形成的关键因素^[17]。适宜的施氮量有利于提高作物产量,还会减少土壤氮流失、气态氮挥发,提高氮肥利用率^[18]。大量研究结果显示,我国普遍存在施氮过量的现象,氮肥利用率较低,只有30%~35%,过量氮肥施用不仅降低氮肥利用效率,损失氮肥,而且对土壤、空气、地表水和地下水等造成极大污染,甚至引起水体富营养化,硝态氮可沿着食物链传递,进而对人类和牲畜健康构成潜在或直接威胁^[19-21]。当前,人们为了满足日益增长的饲草需求,牧草生产中主要是通过大量施用氮肥来提高饲草产量^[22]。但随着氮肥施用量的增加,饲草产量并未实现同步增加,并且长期大量施用氮肥会引起饲草中硝酸盐含量超标^[21]。因此,合理优化施用氮肥是同步提高牧草产量和品质、降低氮肥施用量、减少氮肥污染,实现牧草高产优质和资源高效利用效率的重要举措,是当前灌区牧草生产亟须解决的瓶颈问题。

目前,国内外已有大量关于施氮量对粮食和经济作物复种方面的研究,如水稻(*Oryza sativa*)—小麦(*Triticum aestivum*)^[23]、大蒜(*Allium sativum*)—玉米(*Zea mays*)^[24]、小麦—玉米^[25-26]等复种模式的相关研究。近年来,宁夏引黄灌区复种栽培成为关注热点,但主要集中在春小麦收获后复种不同作物,如蔬菜^[27-28]、青贮玉米^[29]、饲草^[22,30]、甜高粱(*Sorghum bicolor*)^[31]、饲用油菜(*Brassica napus*)^[32]和糜子(*Panicum miliaceum*)^[33]等复种模式,但以饲草为主的前茬作物研究鲜有报道,且复种栽培中普遍存在过量施肥的现象,尤其是氮肥的施用,过于注重前茬作物或单季作物施氮,忽视了后茬作物的需氮规律和前茬作物收获后土壤氮的残留效应,导致过量氮肥浪费及利用效率较低。小黑麦(*Triticale*)是通过小麦属(*Triticum*)和黑麦属(*Secale*)植物经有性杂交和杂种染色体数加倍形成的新物种,具有高产优质、抗逆性强和适应性广等特性,而饲用小黑麦生物产量高,适口性好,是新型饲料作物,可全年种植,为冬春枯草季节提供优质饲草^[34]。青贮玉米是制造青贮饲料的重要原材料,具有生长周期短、种植密度高、土地利用率高等优点,是优质青饲料^[35]。秋播饲用小黑麦—青贮玉米复种栽培技术不仅可充分利用宁夏引黄灌区—茬有余、两茬不足的光热条件,有效解决优质饲草生产总量不足的问题,而且可充分利用有限生长季,显著提高单位面积草产量和经济效益。而针对灌区饲草复种体系周年优化氮肥施用量的报道还是空白。因此,本研究基于产业需求,以饲用小黑麦—青贮玉米复种系统为研究对象,开展周年优化施氮对牧草生长发育、产量、品质和氮肥利用效率的影响研究,旨在制定出适合宁夏引黄灌区饲用小黑麦—青贮玉米饲草复种模式周年氮肥合理施用制度,为宁夏引黄灌区牧草周年供应生产体系提供科学合理有效的施肥方案,以期降低生产成本、增加经济收入、提高资源利用效率,同时减轻氮肥过量导致的一系列环境问题。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

2021年10月—2022年10月在宁夏回族自治区银川市西夏区宁夏农垦平吉堡生态庄园有限公司(106°03' E, 38°25' N)开展大田试验。试验地土壤类型为灌淤土,基本土壤理化性质见表1,根据全国第二次土壤普查土壤肥力分级标准可知,供试土壤各类养分均属于低肥力水平。

试验区属温带大陆性气候,昼夜温差较大,年平均气温8~9℃,年平均降水180~220 mm,降水年内分配不均,主要集中在7—9月,干、湿季节明显,年均10℃以上活动积温3200~3400℃,无霜期150~195 d,试验期间月平均气温见图1,月平均降水量见图2,试验区近10年(2010—2020年)间年平均气温为9.9~11.3℃,年季间有变化,但整体趋势平缓,呈缓慢上升的趋势,年平均降水量为166.2~280.2 mm,年季间变化较大,没有明显的变化趋势(图3)。

1.2 供试材料

供试饲用小黑麦品种为晋饲草1号,由山西省农业科学院作物科学研究所、山西省农业科学院小麦研究所通过系谱法选育而成,为性状稳定的粮饲兼用强冬性小黑麦新品种,植株繁茂,优质、高产。供试青贮玉米为中原单32号,是由中国农业科学院通过核辐射选育而成的玉米杂交种,高产、稳产、早熟,综合性能好,是目前唯一通过全国审定的粮饲兼用型优良玉米新品种,由宁夏农垦集团有限公司提供。

表1 土壤基本理化性质

Table 1 Basic physical and chemical properties of soil

土层 Soil depth (cm)	pH	全盐 Total salt (g·kg ⁻¹)	有机质 Organic matter (g·kg ⁻¹)	全氮 Total nitrogen (g·kg ⁻¹)	全磷 Total phosphorus (g·kg ⁻¹)	碱解氮 Available nitro- gen (mg·kg ⁻¹)	速效磷 Available phospho- rus (mg·kg ⁻¹)	速效钾 Available potassi- um (mg·kg ⁻¹)
0~20	8.50±0.02d	0.88±0.03a	6.18±0.13a	0.71±0.11a	0.25±0.04c	28.19±5.18a	21.46±0.35a	67.11±0.00a
20~40	8.50±0.01d	0.77±0.02b	5.67±0.04b	0.68±0.01a	0.25±0.07c	23.95±1.75ab	14.68±0.97b	53.38±3.39b
40~60	8.54±0.04c	0.68±0.02c	4.65±0.00c	0.58±0.05b	0.39±0.07bc	21.16±0.35b	12.96±0.45c	38.51±0.02c
60~80	8.70±0.02b	0.66±0.01c	4.74±0.12c	0.56±0.02b	0.49±0.04b	11.27±0.70d	12.43±0.24cd	35.77±6.69c
80~100	8.77±0.04a	0.69±0.05c	4.38±0.04d	0.46±0.05c	0.66±0.16a	12.18±1.11c	11.81±0.18d	32.24±6.69d

注: 同列不同字母表示差异显著($P < 0.05$), 下同。

Note: Different letters in the same column indicate significant difference at 0.05 level, the same below.

1.3 试验设计

采用单因素随机区组设计,以秋播饲用小黑麦—青贮玉米复种系统为研究对象,设置5个周年优化施氮量,均为纯氮水平(单位为 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$),分别为 $N_1(0\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}, \text{CK})$ 、 $N_2(75\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2})$ 、 $N_3(150\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2})$ 、 $N_4(225\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2})$ 、 $N_5(300\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2})$,共5个处理,重复3次,共15个小区。小区面积为 $5\text{ m}\times 6\text{ m}=30\text{ m}^2$,小区之间区距为1.0 m。小黑麦于2021年10月7日播种,2022年6月12日收割,青贮玉米于2022年6月20日播种,2022年9月30日收获,小黑麦行距15 cm,采用12行播种机播种,每6行铺设1根滴灌带;青贮玉米采用宽窄行播种,宽行70 cm,窄行40 cm,株距20 cm。

试验灌水施肥采用水肥一体化管理模式,每个小区设置独立的灌溉施肥单元,复种系统施用肥料均为水溶肥,周年磷(P_2O_5)、钾(K_2O)肥施肥量分别为300、150 $\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,氮肥为尿素(N:46%),磷肥为水溶性磷酸铵(N- P_2O_5 :12-61),其中12%的含氮量计入氮肥总量,钾肥为水溶性硫酸钾(K_2O :52%)。两季牧草均分磷钾肥施用量,即:每季磷(P_2O_5)和钾(K_2O)施用量为150和75 $\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,氮肥用量按照试验设计施入,小黑麦分别于返青期、分蘖期、拔节期、抽穗期和开花期分5次平均施入;小黑麦全生育期滴灌量为3600 $\text{ m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$,分8次滴完,滴灌间隔平均为8~9 d,单次滴水量为450 $\text{ m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$ 。青贮玉米生育期总滴灌量为4050 $\text{ m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$,分9次滴完,滴灌间隔平均为9~10 d,平均每次450 $\text{ m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$,施肥分别于苗期、分蘖期、拔节期、孕穗期、抽穗期(玉米抽雄期)、开花期(吐丝期)、灌浆期分7次随水施入,其他管理同大田。

1.4 测定指标及方法

1.4.1 生长指标 在饲用小黑麦生育期(返青期、分蘖期、拔节期、抽穗期和开花期)和青贮玉米生育期(苗期、拔节期、抽穗期、吐丝期和灌浆期)进行测定。每个小区内选择代表性植株10株,测量株高、茎粗和SPAD值,求取平均值。

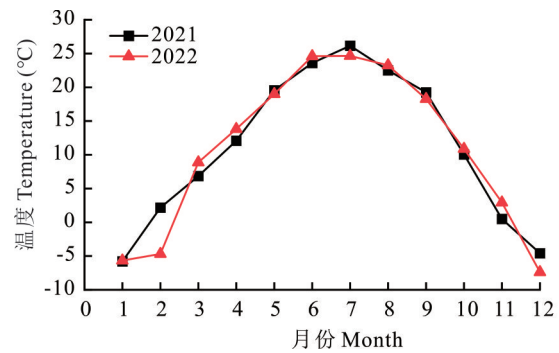


图1 试验区2021-2022年月平均气温变化趋势

Fig. 1 Variation trend of monthly mean temperature in the test area during 2021-2022

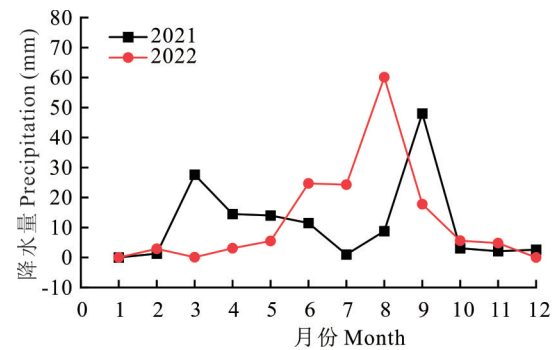


图2 试验区2021-2022年月平均降水量变化趋势

Fig. 2 Variation trend of monthly mean precipitation in the test area during 2021-2022

株高:每小区随机选择10株,挂红色标签做标记,每次采集样品时用卷尺测量从地面至最高点的自然高度并记录。茎粗:用游标卡尺测量植株茎节最粗处。SPAD值:用SPAD-502(日本)测定标记植株,小黑麦测旗叶上、中、下3个部位,青贮玉米测穗位叶上、中、下3个部位,求其平均值。

1.4.2 干物质积累

采用烘干称重法进行测定。于饲用小黑麦生育期(返青期、分蘖期、拔节期、抽穗期和开花期)和青贮玉米生育期(苗期、拔节期、抽穗期、吐丝期和灌浆期)进行测定,每个小区5株,迅速装入自封袋带回实验室,将植株按地上、地下部位分开处理,称其鲜重,然后置于105℃烘箱内杀青30 min,80℃烘至恒重,用1/1000电子天平称各部位的干重^[36-37]。

1.4.3 产量 饲用小黑麦于开花期、青贮玉米于灌浆期刈割前进行测产。每个小区选取长势均一的3个1 m²样方(除边行和距地头50 cm部分),齐地面刈割所有植株的地上部分,称重,得到样方鲜草产量,并换算每hm²产量。并从每个小区分别取样500 g,105℃烘箱中杀青30 min,然后在70℃烘箱中烘干至恒重,称重得到干草重,计算鲜干比,根据500 g鲜草样的鲜干比计算每个小区的干草产量,并粉碎,过1 mm筛,保存以检测品质备用^[37]。

$$\text{复种系统产量} = \text{饲用小黑麦产量} + \text{青贮玉米产量}$$

$$\text{氮肥农学利用率 (agronomic utilization efficiency, AUE, \%)} = (\text{施氮区产量} - \text{空白产量}) / \text{氮肥施用量}$$

1.4.4 营养品质 采用之前处理好的干草粉碎样品测定饲草品质,分析粗蛋白(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)占草样干物质的百分含量。其中,采用福斯8400全自动凯氏定氮仪(美国)测定CP含量;采用索氏脂肪浸提器提取法测定EE含量;采用Van Soets法测定ADF含量;采用Roberston中性洗涤剂法测定NDF含量^[37]。

1.4.5 土壤指标 于饲用小黑麦种植前在试验区,采用“S”型采样法挖5个100 cm深度的土壤剖面,每20 cm为一个土壤样层,分别为0~20 cm、20~40 cm、40~60 cm、60~80 cm、80~100 cm共5个采样层,采样后将5个取样点土壤进行均一化混匀后,自然风干、磨碎、过筛后测土壤基础理化性质。各指标采用常规分析方法,其中,采用SH-3精密酸度计(中国)测定pH(水土比为5:1);采用DDS-11电导率仪(中国)测定全盐含量;采用重铬酸钾外加加热法测定有机质;采用半微量凯氏法测定全氮;采用碱解扩散法测定碱解氮;采用0.5 mol·L⁻¹ NaHCO₃浸提,采用钼锑抗比色法测定速效磷;采用1 mol·L⁻¹ 乙酸铵溶液浸提,用火焰光度法(FP640型)测定速效钾;采用环刀法测定土壤容重和田间持水量等物理指标^[38-39]。

1.5 数据处理

采用Excel 2022软件和SPSS 22.0软件进行数据处理与统计分析,用Origin 2024b软件进行作图。

2 结果与分析

2.1 氮肥周年优化对复种系统生长发育的影响

2.1.1 对饲草复种系统生育期株高的影响 周年施氮量显著影响复种系统两季饲草的株高,且各氮肥处理株高显著高于对照处理(表2)。其中,饲用小黑麦的株高随着生育期的延长呈逐渐升高的趋势,且在开花期株高最高。返青期是小黑麦生长初期,氮肥效应表现最好的为N₂水平,分蘖期、拔节期和抽穗期为小黑麦快速生长期,株高在N₅水平下最高,且在抽穗后期,N₅处理下小黑麦由于徒长出现了倒伏现象,开花期小黑麦由营养生长进入生殖生长阶段,株高在N₄水平下达到最大,为189.4 cm。青贮玉米株高随着生育期的延长呈先升高后降低趋势,在吐丝期株高达到最大值,且各氮肥在整个生育期内均表现为N₅>N₄>N₃>N₂>N₁(苗期除外)。

2.1.2 对饲草复种系统生育期茎粗的影响 周年施氮量显著影响复种系统两季饲草的茎粗,且各氮肥处理显著高于对照(表3)。饲用小黑麦的茎粗随着生育期的延长呈逐渐升高的趋势,且在开花期达到最大。在生育前

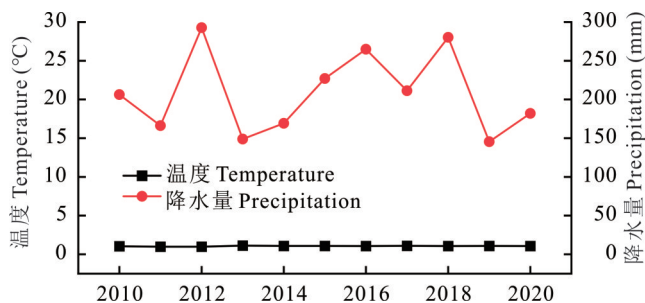


图3 试验区近10年间年均气温和年均降水量变化

Fig. 3 Changes of average annual temperature and precipitation in the test area in recent 10 years

表 2 氮肥周年优化对饲草复种系统生育期株高的影响

Table 2 Effect of annual nitrogen fertilizer optimization on plant height of forage multiple cropping system (cm)

前茬饲草	处理	返青期	分蘖期	拔节期	抽穗期	开花期
Previous forage	Treatment	Revival stage	Tillering stage	Jointing stage	Heading stage	Flowering stage
饲用小黑麦 Feed triticale	N ₁	16.1±0.57c	32.5±0.36e	53.9±1.19d	118.4±2.50d	172.3±5.14b
	N ₂	17.0±0.29a	34.8±0.21d	55.6±0.66c	124.0±1.42c	183.4±0.61a
	N ₃	16.7±0.38ab	36.1±0.31c	59.4±1.18b	135.8±3.39b	181.4±4.50ab
	N ₄	16.5±0.38bc	37.4±0.83b	56.8±1.67c	133.5±2.01b	189.4±5.78a
	N ₅	16.4±0.35bc	38.2±0.49a	62.1±0.65a	140.7±1.18a	181.8±8.17ab
后茬饲草	处理	苗期	拔节期	抽雄期	吐丝期	灌浆期
Post-crop forage	Treatment	Seedling stage	Jointing stage	Tasseling stage	Spinning stage	Filling stage
青贮玉米 Silage corn	N ₁	57.1±1.43c	152.9±1.75d	252.4±0.37e	268.8±1.55d	245.6±0.38c
	N ₂	64.7±1.15b	163.9±1.07c	257.6±0.36d	276.0±1.67c	271.6±1.67b
	N ₃	68.0±0.55b	168.0±1.61c	265.4±0.32c	280.6±0.48c	278.1±1.52b
	N ₄	67.8±0.55b	198.9±1.95b	283.3±0.26b	305.7±0.23b	279.4±1.52b
	N ₅	78.2±2.13a	205.1±1.98a	290.7±0.55a	316.2±0.38a	302.5±0.69a

表 3 氮肥周年优化对饲草复种系统生育期茎粗的影响

Table 3 Effect of annual nitrogen fertilizer optimization on stem diameter in forage multiple cropping system (mm)

前茬饲草	处理	返青期	分蘖期	拔节期	抽穗期	开花期
Previous forage	Treatment	Revival stage	Tillering stage	Jointing stage	Heading stage	Flowering stage
饲用小黑麦 Feed triticale	N ₁	2.76±0.37c	3.33±0.53c	4.87±0.33b	4.54±0.32c	5.25±0.05c
	N ₂	3.59±0.41b	4.38±0.15b	5.85±0.69ab	4.83±0.43bc	5.38±0.18bc
	N ₃	3.37±0.26bc	4.16±0.53bc	5.53±0.15b	5.14±0.34b	5.64±0.11b
	N ₄	4.53±0.44a	4.55±0.36a	5.66±0.12b	5.86±0.69a	5.95±0.09a
	N ₅	3.57±0.29b	4.43±0.39ab	6.81±0.14a	5.89±0.71a	5.89±0.08a
后茬饲草	处理	苗期	拔节期	抽雄期	吐丝期	灌浆期
Post-crop forage	Treatment	Seedling stage	Jointing stage	Tasseling stage	Spinning stage	Filling stage
青贮玉米 Silage corn	N ₁	10.73±0.35d	11.64±0.33b	25.43±0.33d	21.87±0.11d	30.47±0.63c
	N ₂	11.29±0.16cd	13.29±1.27ab	26.98±0.06c	26.60±0.21c	31.51±0.27bc
	N ₃	12.19±0.36bc	14.62±0.85ab	27.80±0.15b	28.47±0.11b	31.83±0.14b
	N ₄	14.01±0.39a	15.44±1.86a	28.06±0.05b	31.19±0.27a	33.28±0.19a
	N ₅	13.19±0.54b	15.18±1.86a	29.32±0.22a	31.48±0.18a	33.41±0.29a

期(返青期和分蘖期),茎粗随着施氮量的增加呈先升高后降低的趋势,整体表现为 $N_4 > N_5 > N_2 > N_3 > N_1$,且氮肥效应表现最好的为 N_4 水平。其中,分蘖期高氮处理 N_4 和 N_5 之间差异不显著;当小黑麦进入快速生长期(拔节期和抽穗期),茎粗随着施氮量的增加呈逐渐升高的趋势,整体表现为 $N_5 > N_4 > N_3 > N_2 > N_1$, N_5 水平下茎粗最大,抽穗期高氮处理(N_4 和 N_5)之间差异不显著,在小黑麦抽穗后期, N_5 处理下小黑麦由于徒长出现了倒伏现象;开花期小黑麦茎粗随施氮量的增加呈先升高后降低的趋势,整体表现为 $N_4 > N_5 > N_3 > N_2 > N_1$,在 N_4 水平下达到最大,为 5.95 mm,且 N_4 和 N_5 之间差异不显著。

青贮玉米茎粗随着生育期的延长整体呈逐渐升高的趋势,在灌浆期达到最大值。周年优化施氮量对复种青贮玉米的茎粗有显著性的影响。在生育前期(苗期和拔节期),茎粗随着施氮量的增加呈先升高后降低的趋势,各处理整体表现为 $N_4 > N_5 > N_3 > N_2 > N_1$,均在 N_4 水平下茎粗最大,且拔节期高氮处理(N_4 和 N_5)之间差异不显著。青贮玉米在后面 3 个生育期(抽雄期、吐丝期和灌浆期),茎粗随着施氮量的增加均呈逐渐升高的趋势,各氮肥处理表现为 $N_5 > N_4 > N_3 > N_2 > N_1$,吐丝期和灌浆期,高氮处理(N_4 和 N_5)之间差异不显著。可见,合理施用氮肥对两

季饲草茎粗均有促进作用。

2.1.3 对饲草复种系统生育期叶片 SPAD 值的影响 周年施氮量显著影响复种系统两季饲草叶片的 SPAD 值,且各氮肥处理 SPAD 值显著高于对照处理(表 4)。其中,饲用小黑麦叶片的 SPAD 值随着生育期的延长呈逐渐升高的趋势,且在开花期达到峰值,整个生育期整体表现为 $N_4 > N_3 > N_2 > N_5 > N_1$,说明增施氮肥能使小黑麦生育后期 SPAD 值维持在较高水平,从而延缓叶片衰老。在抽穗后期, N_5 处理下小黑麦由于徒长出现了倒伏现象,导致其叶片 SPAD 值降低。青贮玉米叶片 SPAD 值随着生育期的延长呈逐渐升高的趋势,苗期各氮肥处理显著高于对照,但处理间差异不显著,其余生育期内各处理间存在显著差异,生长前期随着施氮量的增加 SPAD 值呈逐渐增加的趋势,到生长后期随着施氮量的增加反而抑制了 SPAD 值的增加, N_4 处理下 SPAD 值达到最大,其均表现为 $N_4 > N_5 > N_3 > N_2 > N_1$ 。

表 4 氮肥周年优化对饲草复种系统生育期叶片 SPAD 值的影响

Table 4 Effect of annual nitrogen fertilizer optimization on leaf SPAD value of forage multiple cropping system

前茬饲草	处理	返青期	分蘖期	拔节期	抽穗期	开花期
Previous forage	Treatment	Revival stage	Tillering stage	Jointing stage	Heading stage	Flowering stage
饲用小黑麦 Feed triticale	N_1	39.7±3.41b	47.6±0.61b	51.1±1.58c	50.2±2.71c	51.5±4.70c
	N_2	43.5±6.14ab	51.5±2.56a	54.8±1.40b	57.1±1.74a	57.7±2.45b
	N_3	45.0±3.76ab	51.0±2.10a	55.4±0.40ab	53.9±1.17b	58.3±1.83ab
	N_4	48.2±5.55ab	52.1±1.29a	57.6±0.93a	56.4±1.00ab	59.0±1.78a
	N_5	52.9±4.83a	53.5±0.61a	57.7±1.46a	57.1±0.31a	57.6±1.53b
后茬饲草	处理	苗期	拔节期	抽雄期	吐丝期	灌浆期
Post-crop forage	Treatment	Seedling stage	Jointing stage	Tasseling stage	Spinning stage	Filling stage
青贮玉米 Silage corn	N_1	41.0±1.24b	41.2±0.42d	51.6±0.58c	47.9±1.44c	48.1±1.25c
	N_2	44.1±0.52a	43.6±0.42cd	52.6±1.28bc	52.2±3.01bc	53.7±1.27b
	N_3	45.1±0.95a	46.2±1.10bc	54.7±1.11ab	54.5±2.54ab	58.6±1.07a
	N_4	45.5±0.93a	49.3±1.09b	55.1±0.91ab	58.4±1.01a	62.1±1.13a
	N_5	45.8±1.07a	55.4±1.72a	56.3±0.72a	57.6±0.92ab	59.3±1.05a

2.2 氮肥周年优化对饲草复种系统干物质积累的影响

周年氮肥优化对复种系统两季饲草干物质积累有显著的影响(图 4)。其中,饲用小黑麦干物质积累随着生育期的延长呈逐渐升高的趋势,且生长前期增长缓慢,从拔节期开始迅速增加,且在开花期达到最大,因此,小黑麦开花期为青贮饲料的最佳收割期。增施氮肥有利于小黑麦干物质的积累,且随着施氮量的增加呈先升高后降低的趋势,生长前期(返青期和分蘖期)规律不明显,拔节期以后整体表现为 $N_4 > N_5 > N_3 > N_2 > N_1$,抽穗后期 N_5 水平下田间小黑麦出现倒伏现象导致干物质降低。青贮玉米干物质积累随着生育期的延长呈逐渐增加的趋势,在灌浆期达到峰值,增施氮肥显著促进青贮玉米的干物质积累,各氮肥处理在整个生育期整体表现为 $N_5 > N_4 > N_3 > N_2 > N_1$ 。可见,适量增施氮肥可促进复种系统饲草地上植株的干物质累积,植株中的水分是导致干物质差异的主要原因。

2.3 氮肥周年优化对饲草复种系统饲草产量及农学利用效率的影响

周年优化施氮量对饲草复种系统两季饲草的鲜草、干草及复种系统鲜干草产量的影响差异显著(表 5)。饲用小黑麦鲜、干草产量随着周年施氮量的增加呈先升高后降低的趋势,整体为 $N_4 > N_5 > N_3 > N_2 > N_1$,在 N_4 处理均为最大,鲜草为 $52.6 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$,干草为 $14.9 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$,且各氮肥处理下饲用小黑麦干草产量比对照处理增加幅度为 $15.5\% \sim 77.4\%$ 。周年优化施氮量对饲用小黑麦氮肥农学利用效率有极显著性的影响($P < 0.01$,表 6),整体表现为 $N_4 > N_3 > N_5 > N_2$,为 $17.3\% \sim 28.8\%$ 。青贮玉米鲜草产量随着周年施氮量的增加呈逐渐升高的趋势, N_5 处理下鲜草产量最大,为 $95.4 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$,但干草产量呈先升高后降低的趋势,且在 N_4 处理下产量最大,为 $24.2 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$,

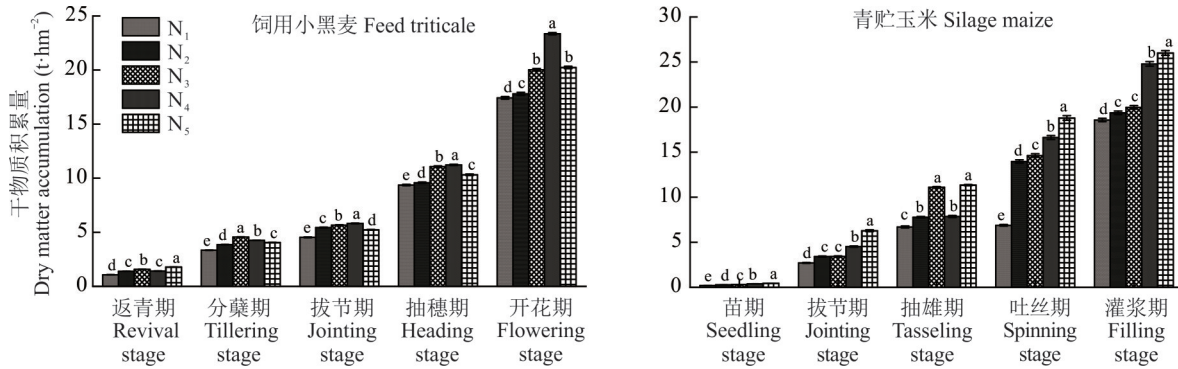


图 4 氮肥周年优化对饲草复种系统干物质积累的影响

Fig. 4 Effect of annual nitrogen fertilizer optimization on dry matter accumulation in multiple cropping system

图中不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。Different lowercase letters in the figure indicate significant differences among treatments ($P < 0.05$).

表 5 氮肥周年优化对饲草复种系统饲草产量的影响

Table 5 Effect of annual nitrogen fertilizer optimization on forage yield in multiple cropping system ($t \cdot hm^{-2}$)

处理 Treatment	饲用小黑麦 Feed triticale		青贮玉米 Silage maize		复种系统 Multiple cropping system	
	鲜草产量 Fresh grass yield	干草产量 Hay yield	鲜草产量 Fresh grass yield	干草产量 Hay yield	鲜草产量 Fresh grass yield	干草产量 Hay yield
N ₁	27.3 ± 0.74d	8.4 ± 0.17c	73.6 ± 3.67c	18.4 ± 0.65c	97.2 ± 0.92d	26.8 ± 0.41c
N ₂	33.4 ± 1.67cd	9.7 ± 0.53bc	83.7 ± 4.21ab	21.1 ± 0.76bc	118.1 ± 1.28c	31.6 ± 0.91bc
N ₃	42.9 ± 2.71bc	12.4 ± 0.85ab	85.3 ± 2.29ab	21.4 ± 0.62b	128.2 ± 3.15b	35.9 ± 1.52b
N ₄	52.6 ± 1.49a	14.9 ± 0.86a	89.7 ± 4.81a	24.2 ± 0.64a	142.0 ± 1.66b	39.1 ± 0.89a
N ₅	45.6 ± 3.35ab	14.3 ± 0.21a	95.4 ± 4.86a	23.6 ± 0.72ab	156.8 ± 1.99a	37.9 ± 1.02ab

表 6 氮肥周年优化对饲草复种系统农学利用效率的影响

Table 6 Effect of annual nitrogen fertilizer optimization on agronomic utilization efficiency (AUE) of forage multiple cropping system (%)

处理 Treatment	饲用小黑麦 Feed triticale		青贮玉米 Silage maize		复种系统 Multiple cropping system	
	增幅 Amplify	农学利用效率 AUE	增幅 Amplify	农学利用效率 AUE	增幅 Amplify	农学利用效率 AUE
N ₂	15.5	17.3 ± 0.20dD	14.7	35.9 ± 0.18aA	17.9	31.9 ± 0.28aA
N ₃	47.6	26.6 ± 0.22bB	16.3	20.1 ± 0.14cC	34.0	30.2 ± 0.27bB
N ₄	77.4	28.8 ± 0.26aA	31.5	25.8 ± 0.12bB	45.9	27.3 ± 0.24cC
N ₅	70.2	19.7 ± 0.23cC	26.1	17.3 ± 0.20dD	41.4	18.5 ± 0.21dD

注：同列不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)，不同大写字母表示处理间差异极显著 ($P < 0.01$)。

Note: Different lowercase letters in the same column are significantly different among treatments at the 5% level ($P < 0.05$), and capital letters indicate significant differences at the 0.01 level ($P < 0.01$).

整体表现为 $N_4 > N_5 > N_3 > N_2 > N_1$ ，且各氮肥处理干草产量比对照处理增加幅度为 14.7%~31.5%，氮肥农学利用效率差异显著，整体表现为 $N_2 > N_4 > N_3 > N_5$ ，为 17.3%~35.9%。各氮肥处理对复种系统产量的影响因两季饲草产量的变化而变化，在施氮量为 N_5 时复种系统鲜草产量达到最大，为 $156.8 t \cdot hm^{-2}$ 。而复种系统干草产量随着周年优化施氮量的增加呈先增加后降低的趋势，在周年施氮量不超过 N_4 水平时，增施氮肥对复种系统干草产量有显著增加效应，但进一步增加施氮量反而抑制产量的增加。本试验条件下对周年施氮量与复种系统饲草干草产量之间进行氮肥效应模拟，可得到模拟方程为： $y = -0.00004x^2 + 0.0448x + 26.449$ ， $R^2 = 0.9841$ ，式中：一次项系数为正，而二次项系数为负，表明了典型的抛物线线性关系，符合肥料效应的报酬递减规律；而决定系数则表

明,复种系统干草产量98%依存于外部施氮量。根据边际分析原理, $dy/dx=0$ 时,复种系统干草产量最高,由此而计算复种系统干草的最高产量的周年施氮量为 $560\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。而 $dy/dx=Px/Py$ 时,经济利润最大,此时可计算最大利润周年施氮量。本试验中当季氮肥价格为 $Px=5.58\text{ 元}\cdot\text{kg}^{-1}$,饲用小黑麦干草收购价为 $2300\text{ 元}\cdot\text{t}^{-1}$,青贮玉米为 $600\text{ 元}\cdot\text{t}^{-1}$,复种系统收购价为 $2900\text{ 元}\cdot\text{t}^{-1}$,从而得到复种系统最佳经济效益周年施氮量为 $584\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。

2.4 氮肥周年优化对饲草复种系统饲草营养品质的影响

氮肥周年优化对复种系统两种饲草及系统的大部分营养品质指标均有显著性影响($P<0.05$),且各氮肥处理与对照之间差异显著(表7)。其中,饲用小黑麦粗蛋白含量为 $8.9\%\sim 11.9\%$,整体表现为 $N_4>N_5>N_3>N_2>N_1$,且在 N_4 处理下含量最大,为 11.9% ,比对照处理提高了 33.7% ;粗脂肪含量为 $1.01\%\sim 1.46\%$,整体表现为 $N_4>N_3>N_2>N_5>N_1$,随着施氮量的增加,粗脂肪含量先增加后降低;ADF和NDF含量均随着施氮量的增加呈逐渐降低的趋势。青贮玉米粗蛋白含量为 $6.33\%\sim 7.04\%$,整体表现为 $N_4>N_5>N_3>N_2>N_1$,且在 N_4 处理下含量最大,为 7.04% ,比对照处理提高了 11.2% ;粗脂肪整体表现为 $N_4>N_2>N_3>N_5>N_1$,粗脂肪含量为 $1.26\%\sim 1.43\%$,ADF和NDF含量均随着施氮量的增加呈逐渐降低的趋势,ADF含量为 $22.9\%\sim 24.6\%$,NDF含量为 $37.3\%\sim 43.2\%$,其中 N_5 处理下含量最低。复种系统粗蛋白含量为 $8.04\%\sim 10.60\%$,整体表现为 $N_4>N_5>N_2>N_3>N_1$,且在 N_4 处理下含量最大,为 10.60% ,比对照处理提高了 31.8% ;粗脂肪含量为 $1.17\%\sim 1.37\%$,整体表现为 $N_5>N_4>N_3>N_2>N_1$,且在 N_5 水平下含量最高,为 1.37% ,比对照提高了 17.1% ;ADF和NDF含量均随着施氮量的增加呈先降低后升高的趋势,ADF含量为 $34.5\%\sim 38.6\%$,NDF含量为 $50.5\%\sim 58.5\%$,其中 N_4 处理下含量最低。

表7 氮肥周年优化对饲草复种系统饲草营养品质的影响

Table 7 Effect of annual nitrogen fertilizer optimization on nutrient quality of forage in multiple cropping system (%)

饲草作物 Forage crop	处理 Treatment	粗蛋白 CP	粗脂肪 EE	酸性洗涤纤维 ADF	中性洗涤纤维 NDF
饲用小黑麦 Feed triticale	N_1	$8.90\pm 0.01d$	$1.01\pm 0.15d$	$45.9\pm 0.40a$	$67.0\pm 0.24a$
	N_2	$9.70\pm 0.04c$	$1.20\pm 0.09c$	$44.9\pm 0.12ab$	$65.9\pm 0.15b$
	N_3	$10.20\pm 0.07b$	$1.35\pm 0.09b$	$44.1\pm 0.09b$	$62.2\pm 0.18c$
	N_4	$11.90\pm 0.08a$	$1.46\pm 0.02a$	$39.6\pm 0.57d$	$57.7\pm 0.21d$
	N_5	$11.60\pm 0.21a$	$1.03\pm 0.19d$	$41.2\pm 0.15c$	$56.5\pm 0.14e$
青贮玉米 Silage corn	N_1	$6.33\pm 0.14b$	$1.26\pm 0.01b$	$24.6\pm 0.41a$	$43.2\pm 1.92a$
	N_2	$6.57\pm 0.06ab$	$1.39\pm 0.02a$	$24.5\pm 0.07a$	$43.1\pm 0.17a$
	N_3	$6.63\pm 0.18ab$	$1.32\pm 0.01b$	$23.1\pm 0.36b$	$42.6\pm 1.04a$
	N_4	$7.04\pm 0.11a$	$1.43\pm 0.01a$	$23.3\pm 0.69ab$	$41.9\pm 0.45a$
	N_5	$6.78\pm 0.23ab$	$1.31\pm 0.04b$	$22.9\pm 0.27b$	$37.3\pm 1.12b$
复种系统 Multiple cropping system	N_1	$8.04\pm 0.07d$	$1.17\pm 0.03d$	$38.6\pm 0.45a$	$58.5\pm 0.68a$
	N_2	$8.35\pm 0.06c$	$1.19\pm 0.02cd$	$37.1\pm 0.43b$	$57.2\pm 0.67b$
	N_3	$8.29\pm 0.07c$	$1.21\pm 0.01c$	$35.4\pm 0.40c$	$53.3\pm 0.60c$
	N_4	$10.60\pm 0.05a$	$1.33\pm 0.02b$	$34.5\pm 0.41d$	$50.5\pm 0.59d$
	N_5	$10.30\pm 0.06b$	$1.37\pm 0.02a$	$35.2\pm 0.42cd$	$51.4\pm 0.62d$

2.5 氮肥周年优化下饲草复种系统氮肥利用率与不同指标间的相关性分析

饲用小黑麦的茎粗(TST)与其鲜草产量(TFY)、粗蛋白含量(TCP)和复种系统干草产量(MCSHY)呈显著正相关,与其干草产量(SHY)呈极显著正相关(图5);粗蛋白含量(TCP)与其干草产量(THY)和青贮玉米茎粗(SST)呈显著正相关,与青贮玉米干草产量(SHY)呈极显著正相关;粗脂肪(TEE)与中性洗涤纤维(TNDF)极显著正相关;鲜草产量(TFY)与其干草产量(THY)和复种系统干草产量(MCSHY)显著正相关;干草产量

(THY)与复种系统干草产量(MCSHY)极显著正相关。青贮玉米茎粗(SST)与其干草产量(SHY)显著正相关;酸性洗涤纤维(SADF)与其氮肥利用效率(SAUE)显著正相关;中性洗涤纤维(SNDF)与复种系统氮肥利用效率(MCSAUE)极显著正相关;鲜草产量(SFY)与复种系统鲜草产量(MCSFY)显著正相关,其他指标间无显著相关关系或呈负相关。

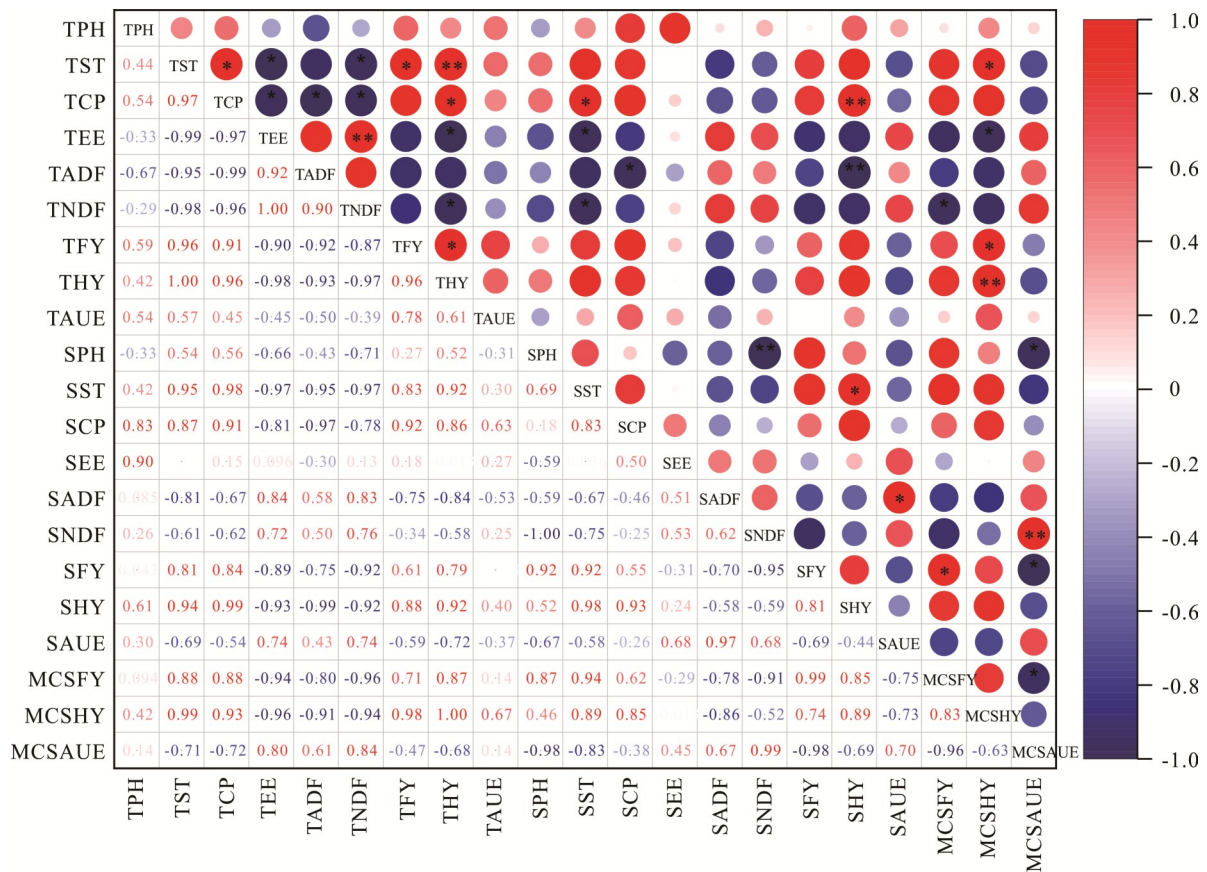


图 5 周年施氮量与饲草生长、产量、品质及氮肥农学利用率的相关性分析

Fig. 5 Correlation analysis of annual nitrogen application amount with forage growth, yield, quality and nitrogen fertilizer utilization rate

*: $P < 0.05$; **: $P < 0.01$; TPH: 小黑麦株高 Plant height of triticale; TST: 小黑麦茎粗 Stem diameter of triticale; TCP: 小黑麦粗蛋白 Crude protein of triticale; TEE: 小黑麦粗脂肪 Ether extract of triticale; TADF: 小黑麦酸性洗涤纤维 Acid detergent fiber of triticale; TNDF: 小黑麦中性洗涤纤维 Neutral detergent fiber of triticale; TFY: 小黑麦鲜草产量 Fresh grass yield of triticale; THY: 小黑麦干草产量 Hay grass yield of triticale; TAUE: 小黑麦农学利用效率 Agronomic utilization efficiency of triticale; SPH: 青贮玉米株高 Plant height of silage corn; SST: 青贮玉米茎粗 Stem diameter of silage corn; SCP: 青贮玉米粗蛋白 Crude protein of silage corn; SEE: 青贮玉米粗脂肪 Ether extract of silage corn; SADF: 青贮玉米酸性洗涤纤维 Acid detergent fiber of silage corn; SNDF: 青贮玉米中性洗涤纤维 Neutral detergent fiber of silage corn; SFY: 青贮玉米鲜草产量 Fresh grass yield of silage corn; SHY: 青贮玉米干草产量 Hay grass yield of silage corn; SAUE: 青贮玉米农学利用效率 Agronomic utilization efficiency of silage corn; MCSFY: 复种系统鲜草产量 Fresh grass yield of multiple cropping system; MCSHY: 复种系统干草产量 Hay grass yield of multiple cropping system; MCSAUE: 复种系统农学利用效率 Agronomic utilization efficiency of multiple cropping system.

3 讨论

3.1 氮肥周年优化对饲草复种系统生长发育和干物质积累的影响

氮素是影响人工草地饲草产量和生物量的重要因素,合理施用氮肥是促进牧草高产和优质的关键措施^[40]。氮肥可增加土壤中的有效氮,刺激幼苗的分蘖和小麦的生长发育,提高产量,但是最佳施用量受生态环境、作物类型、土壤肥力和品种等影响^[41]。张艳军等^[42]研究发现,施氮提高了高粱的株高、茎粗、穗粒数及叶片数等,在 225 kg·hm⁻² N 时达到最佳。高玮等^[43]在饲用高粱栽培研究中表明施氮可以显著提高牧草农艺性状,增加株高和茎

粗,促进干物质积累。游永亮等^[44]研究表明,施用氮肥能显著增加多花黑麦草(*Lolium multiflorum*)生长高度、分蘖数、茎叶比等生长指标。张凯^[45]研究表明,当施氮量从 $220\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 增加至 $320\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时,小麦植株干物质积累量反而降低。本研究结果也证实了此观点,增施氮肥可显著促进饲用小黑麦和青贮玉米株高、茎粗、SPAD和干物质积累的增加,随着生育期的延长表现为先升高后降低的生长趋势,增施氮肥干物质转移量增加,但施氮量过高时则不利于干物质转移,小黑麦在开花期达到最大, N_4 水平下表现最好,青贮玉米在吐丝期达到峰值, N_5 处理下表现最好,这主要是因为优化后的施氮量整体减少了,青贮玉米需氮量较高,在高氮水平下表现最好。可见,与饲草作物养分需求相匹配的施氮量会显著提高作物生长发育和干物质积累量,促进植株氮素的积累和转运,有利于产量的形成,合理优化周年氮肥施用量有利于复种系统中两季饲草植株生长发育,当施氮量超过 $225\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时,田间小黑麦出现徒长导致倒伏现象,进而影响饲草产量和品质。

3.2 氮肥周年优化对饲草复种系统产量的影响

施肥是牧草维持和增加产量的关键,对草业研究和畜牧业快速发展意义重大,尤其在人工建植的草地上,氮素是影响草地生长和健康发展的重要因子之一,增施氮肥是禾本科牧草增加产量的主要手段,适量地施用氮肥可显著提高饲草产量,也促进了草食畜牧业的快速发展^[46-47]。已有研究发现作物产量随着化肥的过量投入已经出现停滞现象^[48]。王永军等^[49]和安霞等^[50]研究显示,适宜的氮肥施用量不仅可以增加小麦产量和提高氮肥利用率,而且可以减轻氮肥污染,当植株氮素吸收达到饱和时,再增加氮肥施用量反而降低了对生物产量或籽粒产量的贡献率。本研究结果与之一致,氮肥周年优化施氮量对复种系统中两季饲草的鲜草、干草及系统草产量均有显著的增产效应,且施氮处理显著高于对照,饲用小黑麦鲜、干草产量随着周年施氮量的增加呈先升高后降低的趋势,整体为 $N_4>N_5>N_3>N_2>N_1$,青贮玉米鲜草产量随着周年施氮量的增加呈逐渐升高的趋势,在 N_5 水平时最大,但干草呈先升高后降低的趋势,且在 N_4 水平时最大,整体表现为 $N_4>N_5>N_3>N_2>N_1$,鲜、干草变化趋势不一致,这主要是因为水分是关键因素,鲜草在高氮处理下较大,而干物质积累在 N_4 处理下已达到最大积累量,继续加大施氮量反而抑制产量的增加,优化后的施氮量足以满足青贮玉米产量形成和改善品质的需求,也与刘帅等^[51]和王丽萍等^[52]的研究结果相同。可见,氮肥周年优化施肥量完全可以满足两季饲草周年生长所需的氮素量,适量的氮肥不仅可以促进干物质积累,提高产量和氮肥利用率,同时可减少氮素损失。

3.3 氮肥周年优化对饲草复种系统品质的影响

牧草营养品质的高低是评价牧草饲用价值的重要指标^[53]。牧草中CP含量越高,NDF和ADF含量越低,EE含量越高,则牧草的饲用价值越高^[54]。NDF影响饲草的适口性,其含量越高,家畜对饲草的采食量就越低。ADF影响饲草的消化率,其含量越高,家畜对饲草的消化率就越低,EE是牧草中含量较低的成分,但是动物体内重要的营养物质之一,其含量影响牧草的口感和风味^[55]。魏正业等^[56]和周大梁等^[57]的研究表明,施氮能提高饲草中粗蛋白、粗脂肪和氨基酸的含量,降低粗纤维含量,进而改善饲草品质。追施氮肥的饲草中粗蛋白含量及产量均大于未追施氮肥处理,且NDF和ADF含量小于未追施氮肥处理。本研究结果与之一致,氮肥周年优化施氮量对复种系统两种饲草的营养品质指标有显著影响,且CP和EE含量随着施氮量的增加呈先升高后降低的趋势;ADF和NDF均随着施氮量的增加呈先降低后升高的趋势,且在 N_4 处理下的纤维含量最低,饲草复种系统的CP含量在 N_4 水平下最大,EE含量在 N_5 水平下最高。可见,氮肥周年优化施氮量全面考虑了两季饲草对氮肥的需求量和前茬饲草收获后土壤中残留的氮素效应,通过优化每季饲草的氮肥施用量能改善两季饲草的营养品质,促进动物消化,提高其饲用价值。

4 结论

本试验以饲用小黑麦—青贮玉米饲草复种系统为研究对象,充分利用宁夏引黄灌区“一茬有余、两茬不足”的光热条件,通过周年优化氮肥施用量不仅可以提高复种系统饲草地上部生长发育、促进饲草干物质的积累与转移,显著提高单位土地面积的饲草产量和改善其营养品质,还可以有效利用前茬饲草收获后土壤中氮的残留效应,减少氮肥损失,提高氮肥利用率,有效缓解该区冬春季青饲料短缺等问题。通过肥料效应方程模拟出宁夏引黄灌区饲用小黑麦—青贮玉米复种饲草系统最高产量施肥量为 $560\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,最佳经济效益施肥量为 $584\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。

hm^{-2} ,对宁夏引黄灌区饲草周年供应科学栽培具有参考价值。

参考文献 References:

- [1] Li J, Wang M L. Study on the coupling coordination between herbage industry and herbivorous animal husbandry in China. *Chinese Journal of Animal Science*, 2024(6): 1–13.
李静, 王明利. 中国牧草产业与草食畜牧业耦合协调关系研究. *中国畜牧杂志*, 2024(6): 1–13.
- [2] Shi Z Z, Wang M L. Evolution and prospect of China's forage industry policy. *Chinese Journal of Grassland*, 2021, 43(2): 107–114.
石自忠, 王明利. 中国牧草产业政策: 演变历程与未来展望. *中国草地学报*, 2021, 43(2): 107–114.
- [3] Li X Y, Yin X F, Zhou X L, *et al.* Countermeasures and suggestions for high quality development of forage industry in China. *Acta Agrestia Sinica*, 2020, 28(4): 889–894.
李新一, 尹晓飞, 周晓丽, 等. 我国饲草产业高质量发展的对策和建议. *草地学报*, 2020, 28(4): 889–894.
- [4] Ren J Z. The structure of agriculture must adapt to the transformation of food structure. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2014, 32(3): 1–3.
任继周. 农业结构必须适应食物结构的转型. *科技导报*, 2014, 32(3): 1–3.
- [5] Liu Z P, Zhou Q, Liu W X, *et al.* Some scientific issues of forage breeding in China. *Acta Prataculturae Sinica*, 2021, 30(12): 184–193.
刘志鹏, 周强, 刘文献, 等. 中国牧草育种中的若干科学问题. *草业学报*, 2021, 30(12): 184–193.
- [6] Zhang X J, Sun Q, Chen Y W, *et al.* High-efficient cultivation techniques of forage triticale multiple cropping silage corn in Ningxia irrigation area. *Feed Industry*, 2024, 45(6): 125–129.
张晓娟, 孙权, 陈永伟, 等. 宁夏引黄灌区饲用小黑麦复种青贮玉米高效栽培技术. *饲料工业*, 2024, 45(6): 125–129.
- [7] Zhang J P, Wang X Q, You J C, *et al.* High-efficient cultivation techniques of forage triticale multiple cropping silage corn in Ningxia irrigation area. *Research of Agricultural Modernization*, 2024(5): 85–87.
张久盘, 王秀琴, 尤建村, 等. 宁夏草畜平衡现状及高质量发展建议. *现代化农业研究*, 2024(5): 85–87.
- [8] Zhang Y J. The industry development of forage crops in China. *China Dairy*, 2019(4): 3–9.
张英俊. 我国饲草作物的产业发展. *中国乳业*, 2019(4): 3–9.
- [9] Feng Q, He X L, Wang B, *et al.* A study of mixed sowing effects for oat and common vetch in the Ningxia Yellow River Irrigation Area. *Acta Prataculturae Sinica*, 2024, 33(3): 107–119.
冯琴, 何小莉, 王斌, 等. 宁夏引黄灌区燕麦与箭筈豌豆的混播效果研究. *草业学报*, 2024, 33(3): 107–119.
- [10] Ren J Z. *Grassland agroecology*. Beijing: China Agriculture Press, 1995.
任继周. *草地农业生态学*. 北京: 中国农业出版社, 1995.
- [11] Bao J D, Dang J L. Study on technological innovations in forage grass management. *Pratacultural Science*, 2022, 39(5): 1047–1058.
保继栋, 党景丽. 牧草领域技术创新态势. *草业科学*, 2022, 39(5): 1047–1058.
- [12] Xie H L, Lin G Y. Spatiotemporal differences and influencing factors of multiple cropping index in China during 1998–2012. *Journal of Geographical Sciences*, 2015, 25(11): 1283–1297.
- [13] Ding M J, Chen Q, Xin L J, *et al.* Spatial and temporal variations of multiple cropping index in China based on SPOT-NDVI during 1999–2013. *Acta Geographica Sinica*, 2015, 70(7): 1080–1090.
丁明军, 陈倩, 辛良杰, 等. 1999–2013年中国耕地复种指数的时空演变格局. *地理学报*, 2015, 70(7): 1080–1090.
- [14] Ma B J, Chen G P, Gou Z W, *et al.* Water utilization and economic benefit of wheat multiple cropping with green manure under nitrogen reduction in Hexi irrigation area of Northwest China. *Scientia Agricultura Sinica*, 2024, 57(4): 740–754.
麻碧娇, 陈桂平, 苟志文, 等. 河西灌区减氮条件下小麦复种绿肥的水分利用及经济效益. *中国农业科学*, 2024, 57(4): 740–754.
- [15] Zhu Z L, Jin J Y. Fertilizer use and food security in China. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2013, 19(2): 259–273.
朱兆良, 金继运. 保障我国粮食安全的肥料问题. *植物营养与肥料学报*, 2013, 19(2): 259–273.
- [16] Wang P H, Ding R, Shi W J. Comprehensive assessment of nitrogen utilization of multi-crop system and its environmental impacts in Hubei Province. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2024, 40(5): 634–644.
王鹏辉, 丁锐, 史文娇. 湖北省作物系统氮素利用及其环境影响综合评估. *生态与农村环境学报*, 2024, 40(5): 634–644.
- [17] Hu W. Effect of water and nitrogen application on high quality and low carbon of alfalfa in Ningxia Irrigation Area of Yellow

- River. Yinchuan: Ningxia University, 2020.
- 胡伟. 宁夏引黄灌区紫花苜蓿优质低碳水氮配置研究. 银川: 宁夏大学, 2020.
- [18] Kong X Z. Effect of nitrogen application on wheat-maize rotation growth and yield and quality. Yangling: Northwest A&F University, 2019.
- 孔祥泽. 氮肥运筹对小麦—玉米周年作物生长及产量、品质的影响. 杨凌: 西北农林科技大学, 2019.
- [19] Jamal N, Yang G W, Shakeel A, *et al.* Nitrogen fertilization coupled with iron foliar application improves the photosynthetic characteristics, photosynthetic nitrogen use efficiency, and the related enzymes of maize crops under different planting patterns. *Frontiers in Plant Science*, 2022, 9(13): 988055—988065.
- [20] Ju X T, Gu B J. Status-quo, problem and trend of nitrogen fertilization in China. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2014, 20(4): 783—795.
- 巨晓棠, 谷保静. 我国农田氮肥施用现状、问题及趋势. *植物营养与肥料学报*, 2014, 20(4): 783—795.
- [21] Li X M, Chen T F, Sun J J, *et al.* Effects of different N levels on production and quality of Italian ryegrass. *Chinese Journal of Grassland*, 2016, 38(1): 54—60.
- 李小梅, 陈天峰, 孙娟娟, 等. 氮肥水平对多花黑麦草产量和品质的影响. *中国草地学报*, 2016, 38(1): 54—60.
- [22] Zhang Q. Effects of different nitrogen application on soil fertility of spring wheat multiple cropping forage. Yinchuan: Ningxia University, 2022.
- 张倩. 春小麦复种饲草不同氮素施量对地力的影响. 银川: 宁夏大学, 2022.
- [23] Lu R H, Wang W X, Cao Q, *et al.* Research on the effects of nitrogen fertilizer and rice straw return on wheat yield and N₂O emission and recommended fertilization under rice-wheat rotation pattern. *Acta Agronomica Sinica*, 2024, 50(5): 1300—1311.
- 陆汝华, 王文轩, 曹强, 等. 稻麦复种模式下氮肥与稻秸互作对小麦产量和N₂O排放影响及推荐施肥研究. *作物学报*, 2024, 50(5): 1300—1311.
- [24] Mu S W. Effect of nitrogen application rate on nitrogen uptake and utilization in a garlic-maize multiple cropping system and establishment of garlic nitrogen diagnostic model. Yangling: Northwest A&F University, 2022.
- 牟思维. 大蒜—玉米复种系统施氮量对氮素吸收利用的影响及大蒜氮素诊断模型的建立. 杨凌: 西北农林科技大学, 2022.
- [25] Liu H, Chen M M, Sun Z M, *et al.* Effects of different nitrogen management practice on crop yield, N utilization and N apparent balance in wheat/maize rotation system. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2016, 31(1): 232—238.
- 刘欢, 陈苗苗, 孙志梅, 等. 氮肥调控对小麦/玉米产量、氮素利用及农田氮素平衡的影响. *华北农学报*, 2016, 31(1): 232—238.
- [26] Li L Y, He A L, Yang H H, *et al.* Effect of reduction of nitrogen fertilizer rate on yield and nitrogen utilization of wheat-maize rotation system in yellow-cinnamon soil area. *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 2023, 52(11): 21—32.
- 李凌云, 和爱玲, 杨焕焕, 等. 氮肥减施对黄褐土区小麦—玉米轮作体系产量和氮素吸收利用的影响. *河南农业科学*, 2023, 52(11): 21—32.
- [27] Wang Q L, Zhao X H, Liu G H, *et al.* Influence of nitrogen application on soil nutrients and yields of various vegetables grown after wheat harvest. *Journal of Gansu Agricultural University*, 2024, 5(21): 1—17.
- 王巧玲, 赵晓红, 刘根红, 等. 施氮量对麦后复种不同蔬菜模式土壤养分及产量的影响. *甘肃农业大学学报*, 2024, 5(21): 1—17.
- [28] Liu G H, Xue Y X, Zhang Q, *et al.* Determining suitable vegetables for planting after spring wheat harvest in the Ningxia Yellow River Irrigation Area. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2021, 29(3): 559—571.
- 刘根红, 薛银鑫, 张倩, 等. 宁夏引黄灌区春小麦复种蔬菜适宜种类筛选. *中国生态农业学报*, 2021, 29(3): 559—571.
- [29] Liu R L, Wang Y, Zhou L N, *et al.* Effect of controlled-release nitrogen fertilizer on nutrient uptake and quality of post-wheat silage maize in the yellow river irrigation area. *Journal of Ningxia Agriculture and Forestry Science and Technology*, 2023, 64(1): 5—7, 15.
- 刘汝亮, 王英, 周丽娜, 等. 控释氮肥对引黄灌区麦后复种青贮玉米养分吸收和品质的影响. *宁夏农林科技*, 2023, 64(1): 5—7, 15.
- [30] Liu L L, Liu G H, Mai X F, *et al.* Comprehensive benefits evaluation of spring wheat multiple cropping forage grass in Ningxia Yellow River irrigation area. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2022, 40(1): 50—60, 103.
- 刘露露, 刘根红, 买晓凤, 等. 宁夏引黄灌区春小麦复种牧草模式的综合效益评价. *干旱地区农业研究*, 2022, 40(1): 50—60, 103.
- [31] Zhang J L, Shi A, Liang X J, *et al.* Nutrition and feeding value evaluation of multiple cropping sorghum, forage sorghum and

- silage corn after wheat in Ningxia Yellow River irrigation area. *Feed Research*, 2021, 44(4): 83–87.
- 张俊丽, 施安, 梁小军, 等. 宁夏引黄灌区麦后复种高丹草、饲用高粱、青贮玉米营养及饲用价值评定. *饲料研究*, 2021, 44(4): 83–87.
- [32] Kang J Q, He W S. Comparative experiment on the introduction and selection of new varieties of post-wheat planting in Ningxia Yellow River irrigation area. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2022, 50(19): 43–45, 105.
- 亢锦奇, 何文寿. 宁夏引黄灌区麦后复种饲料油菜新品种比较试验. *安徽农业科学*, 2022, 50(19): 43–45, 105.
- [33] Xie C H. Effects of nitrogen rate on growth, grain yield and nitrogen utilization of multiple cropping proso millet after spring-wheat in irrigation area of Ningxia. Yangling: Northwest A&F University, 2021.
- 谢呈辉. 施氮量对宁夏引黄灌区麦后复种糜子生长、产量与氮素利用的影响. 杨凌: 西北农林科技大学, 2021.
- [34] Liu J. Studies on the photosynthetic performance, nitrogen use efficiency, forage productivity, and adaptability of forage triticale. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2019.
- 刘晶. 饲草型小黑麦的光合性能、氮素利用率及生产性能和适应性研究. 兰州: 甘肃农业大学, 2019.
- [35] Bai L F. Effects of nitrogen application level on spatial microbial composition of root system and the influence mechanism of nitrogen utilization of silage maize. Hohhot: Inner Mongolia University, 2021.
- 白岚方. 施氮水平对青贮玉米根系空间微生物组成及氮素利用影响机制的研究. 呼和浩特: 内蒙古大学, 2021.
- [36] Gao J F. Experimental guidance of plant physiology. Beijing: Higher Education Press, 2006.
- 高俊凤. 植物生理学实验指导. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- [37] Zhang Z L, Zhai W J. Experimental guide to plant physiology. Beijing: Higher Education Press, 2003.
- 张志良, 翟伟菁. 植物生理学实验指导. 北京: 高等教育出版社, 2003.
- [38] Bao S D. Soil and agricultural chemistry analysis (Third Edition). Beijing: China Agriculture Press, 2018.
- 鲍士旦. 土壤农化分析(第三版). 北京: 中国农业出版社, 2018.
- [39] Lu R K. Methods of agricultural chemical analysis of soils. Beijing: China Agriculture Press, 2000.
- 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [40] Alam F, Kim T Y, Kim S Y, *et al.* Effect of molybdenum on nodulation, plant yield and nitrogen uptake in hairy vetch (*Vicia villosa* Roth). *Soil Science and Plant Nutrition*, 2015, 61(4): 664–675.
- [41] Ge J, Jiang X J. Effects of nitrogen application on photosynthetic characteristics, SPAD value, grain yield and carbon and nitrogen metabolism of flag leaves in wheat. *Tianjin Agricultural Sciences*, 2019, 25(3): 1–4.
- 葛君, 姜晓君. 施氮量对小麦旗叶光合特性、SPAD值、籽粒产量及碳氮代谢的影响. *天津农业科学*, 2019, 25(3): 1–4.
- [42] Zhang Y J, Liu J, Zhang Z, *et al.* Effects of varieties, planting densities, nitrogen application rates and sowing modes on biological characters and yield of waxy sorghum. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2023, 39(2): 1–7.
- 张艳军, 刘佳, 张钟, 等. 不同品种、密度、施氮量、播种方式对糯高粱生物性状及产量的影响. *中国农学通报*, 2023, 39(2): 1–7.
- [43] Gao W, Shou N, Jiang C Z, *et al.* Effect of nitrogen application rate on dry matter accumulation, allocation and water use efficiency of forage sorghum. *Acta Prataculturae Sinica*, 2022, 31(9): 26–35.
- 高玮, 受娜, 蒋丛泽, 等. 施氮量对饲用高粱干物质积累、分配及水分利用效率的影响. *草业学报*, 2022, 31(9): 26–35.
- [44] 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.
- [45] Zhang K. Water/nitrogen utilization and nitrogen translocation of cereal-legume multi-cropping systems in the North China Plain: A case study on wheat-peanut double cropping. Beijing: China Agricultural University, 2017.
- 张凯. 华北平原禾豆复种水氮利用与氮转移研究. 北京: 中国农业大学, 2017.
- [46] Xie K, Li X, Feng H E, *et al.* Effect of nitrogen fertilization on yield, N content, and nitrogen fixation of alfalfa and smooth bromegrass grown alone or in mixture in greenhouse pots. *Journal of Integrative Agriculture*, 2015, 14(9): 1864–1876.
- [47] Ge X L, Yang H S, Zhao P J, *et al.* Effects of nitrogen top-dressing by stages on yield and post-flowering photosynthetic characteristics and nitrogen utilization of maize under shallow-buried drip irrigation. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2022, 38(19): 1–7.
- 葛选良, 杨恒山, 赵培军, 等. 浅埋滴灌下分期追氮对玉米花后光合特性、氮素利用和产量的影响. *中国农学通报*, 2022, 38(19): 1–7.

- [48] Liu X, Xu S S, Zhang J W, *et al.* Effect of continuous reduction of nitrogen application to a rice-wheat rotation system in the middle-lower Yangtze River region (2013–2015). *Field Crops Research*, 2016, 19(6): 348–356.
- [49] Wang Y J, Sun S Y, Li H J. Effects of density and nitrogen application on yield and component factors of wheat Huaimai 23. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2011, 39(3): 98–99.
王永军, 孙苏阳, 李海军. 密度、施氮量对小麦淮麦23号产量及构成因素的影响. *江苏农业科学*, 2011, 39(3): 98–99.
- [50] An X, Zhang H J, Jiang F S, *et al.* Effect of nitrogen fertilizer rate on dry matter accumulation, translocation and yield of Luyuan 502. *Shandong Agricultural Sciences*, 2018, 50(7): 112–115.
安霞, 张海军, 蒋方山, 等. 施氮量对小麦鲁原502干物质积累、转运及产量的影响. *山东农业科学*, 2018, 50(7): 112–115.
- [51] Liu S, Xu Y F, Jia J, *et al.* Effects of nitrogen application rate and topdressing stage on dry matter accumulation and nitrogen utilization of summer maize under drip irrigation. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2023, 41(2): 122–129.
刘帅, 徐宇凡, 贾靖, 等. 施氮量及追氮时期对滴灌夏玉米干物质积累及氮素利用的影响. *干旱地区农业研究*, 2023, 41(2): 122–129.
- [52] Wang L P, Bai L F, Wang T H, *et al.* Effects of different nitrogen levels on nitrogen accumulation and transport in silage maize. *Crops*, 2023, 8(4): 165–173.
王丽萍, 白岚方, 王天昊, 等. 不同施氮水平对青贮玉米植株氮素积累和转运的影响. *作物杂志*, 2023, 8(4): 165–173.
- [53] Zhou L, Fu W, Qin T Y, *et al.* Effects of fertilizer application on the yield, forage quality and nitrogen use efficiency of *Sorghum bicolor* × *S. sudanense* with *Dolichos lablab* intercropping system. *Acta Agrestia Sinica*, 2023, 31(6): 1754–1761.
周丽, 付薇, 覃涛英, 等. 施氮对高丹草—扁豆套作系统产量、品质和氮素利用效率的影响. *草地学报*, 2023, 31(6): 1754–1761.
- [54] Ren J Z, Xu G, Li X L, *et al.* Trajectory and prospect of China's prataculture. *Chinese Science Bulletin*, 2016, 61(2): 178–192.
任继周, 胥刚, 李向林, 等. 中国草业科学的发展轨迹与展望. *科学通报*, 2016, 61(2): 178–192.
- [55] Chang D D, Wang X, Tian X H, *et al.* Studies on multiple intercropping effects and quality of autumn sown triticale and sweet sorghum in central Gansu Province. *Acta Prataculturae Sinica*, 2021, 30(11): 212–220.
常丹丹, 王旭, 田新会, 等. 甘肃中部地区秋播小黑麦套作式复种甜高粱的效应及品质研究. *草业学报*, 2021, 30(11): 212–220.
- [56] 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.
- [57] Zhou D L, Shi W, Jiang Z W, *et al.* Effects of planting density and nitrogen application on leaf enzyme activity and water-nitrogen utilization of silage maize under ridge furrow rainwater harvesting in Loess Plateau. *Acta Prataculturae Sinica*, 2022, 31(8): 126–143.
周大梁, 石薇, 蒋紫薇, 等. 沟垄集雨下密度和施氮对黄土高原青贮玉米叶片酶活性及水氮利用的影响. *草业学报*, 2022, 31(8): 126–143.