

DOI: 10. 11686/cyxb2025277

http://cyxb. magtech. com. cn

孙静, 孙延亮, 夏东杰, 等. 氮磷水肥耦合对无芒雀麦光合特性、生产性能及土壤养分的影响. 草业学报, 2026, 35(7): 105—116.

SUN Jing, SUN Yan-liang, XIA Dong-jie, *et al.* Effects of nitrogen-phosphorus and water coupling on soil nutrients and the photosynthetic characteristics and production performance of *Bromus inermis*. Acta Prataculturae Sinica, 2026, 35(7): 105—116.

氮磷水肥耦合对无芒雀麦光合特性、生产性能及土壤养分的影响

孙静¹, 孙延亮¹, 夏东杰¹, 魏孔钦¹, 杨开鑫¹, 隋晓青², 张前兵^{1*}

(1. 石河子大学动物科技学院, 新疆 石河子 832003; 2. 新疆农业大学草业学院, 新疆 乌鲁木齐 830052)

摘要:为明确不同氮磷水肥耦合对无芒雀麦光合特性、饲草生产性能及无芒雀麦田土壤养分含量的影响,本研究以‘乌苏1号’无芒雀麦为试验对象,采用双因素随机区组设计,水分设置3个梯度,分别为灌溉3800 (W_1)、5300 (W_2)和6800 $m^3 \cdot hm^{-2}$ (W_3);施肥设置3个梯度,分别为不施肥 (F_0)、施N 120 $kg \cdot hm^{-2}$ 和 P_2O_5 100 $kg \cdot hm^{-2}$ (F_1)、施N 180 $kg \cdot hm^{-2}$ 和 P_2O_5 150 $kg \cdot hm^{-2}$ (F_2)。结果表明: W_3F_1 处理较 W_1F_0 处理的净光合速率提高了21.22%,叶片瞬时水分利用效率提高了31.18%,光能利用效率提高了19.85%; W_3F_1 处理较 W_1F_0 处理无芒雀麦的干草产量提升了28.31%, W_3F_1 和 W_2F_2 处理的粗蛋白含量较 W_1F_0 处理分别提高了24.32%和29.50% ($P < 0.05$); W_3F_1 处理的土壤速效磷和碱解氮含量较 W_1F_0 处理分别提高了13.79%和131.27%。水肥调控对无芒雀麦的光合特性、饲草生产性能及土壤养分均有明显的改善效果。以 W_3F_1 处理综合表现最优,即灌溉量为6800 $m^3 \cdot hm^{-2}$ 和施N量为120 $kg \cdot hm^{-2}$ 、施 P_2O_5 量为100 $kg \cdot hm^{-2}$ 时,无芒雀麦具有较高的光合特性及生产性能。

关键词:无芒雀麦;水肥调控;生产性能;光合特性;土壤养分

Effects of nitrogen-phosphorus and water coupling on soil nutrients and the photosynthetic characteristics and production performance of *Bromus inermis*

SUN Jing¹, SUN Yan-liang¹, XIA Dong-jie¹, WEI Kong-qin¹, YANG Kai-xin¹, SUI Xiao-qing², ZHANG Qian-bing^{1*}

1. College of Animal Science & Technology, Shihezi University, Shihezi 832003, China; 2. College of Grassland Science, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China

Abstract: The aim of this work was to determine the effects of different nitrogen-phosphorus and water couplings on soil nutrient contents and the photosynthetic characteristics and forage production performance of *Bromus inermis*. To this end, a field experiment was conducted using the *B. inermis* cultivar ‘Wusu No. 1’ with a two-factor randomized block design. Irrigation was applied at three levels: W_1 (3800 $m^3 \cdot ha^{-1}$), W_2 (5300 $m^3 \cdot ha^{-1}$), and W_3 (6800 $m^3 \cdot ha^{-1}$); and there were three fertilization treatments: F_0 (no fertilizer), F_1 (N 120 $kg \cdot ha^{-1}$ + P_2O_5 100 $kg \cdot ha^{-1}$), and F_2 (N 180 $kg \cdot ha^{-1}$ + P_2O_5 150 $kg \cdot ha^{-1}$). The results show that, compared with the W_1F_0 treatment, the net photosynthetic rate in the W_3F_1 treatment was increased by 21.22%, the leaf instantaneous water use efficiency was increased by 31.18%, and the light use efficiency was improved by 19.85%. The hay yield of *B. inermis* in the

收稿日期:2025-07-03;改回日期:2025-09-18

基金项目:新疆维吾尔自治区重点研发专项(2023B02031)和国家现代农业产业技术体系资助。

作者简介:孙静(1989—),女,山东临沂人,在读硕士。E-mail: 453651282@qq.com

* 通信作者 Corresponding author. E-mail: qbz102@163.com

W₃F₁ treatment was increased by 28.31% compared with that in the W₁F₀ treatment. The crude protein content was increased by 24.32% in W₃F₁ and by 29.50% in W₂F₂ compared with that in W₁F₀ ($P < 0.05$). Furthermore, the soil available phosphorus and alkali-hydrolyzable nitrogen contents in the W₃F₁ treatment were increased by 13.79% and 131.27%, respectively, compared with those in W₁F₀. Thus, the regulation of irrigation and fertilization significantly improved the photosynthetic characteristics and forage production performance of *B. inermis*, and increased the amounts of soil nutrients. The W₃F₁ treatment demonstrated the best overall performance, indicating that an irrigation amount of 6800 m³·ha⁻¹ combined with fertilization with N at 120 kg·ha⁻¹ and P₂O₅ at 100 kg·ha⁻¹ resulted in superior photosynthetic characteristics and production performance of *B. inermis*.

Key words: *Bromus inermis*; water and fertilizer integration; productivity performance; photosynthetic characteristics; soil nutrients

无芒雀麦(*Bromus inermis*)为禾本科雀麦属多年生草本植物,其根系发达,具有适应性广、耐旱性和耐寒性强等特点^[1]。作为“禾草饲料之王”,无芒雀麦营养价值高,适口性好,消化率高,其粗蛋白含量达到15%,是我国干旱地区畜牧业发展不可替代的优质蛋白牧草来源^[2]。然而,新疆作为我国传统的农牧大省,传统粗放式水肥管理进一步加剧水资源浪费和土壤盐渍化,严重威胁农业生态系统可持续发展。因此,构建合理、精准、高效的水肥调控技术,对于提升无芒雀麦生产力和资源高效利用具有重要的意义。

水肥耦合调控是提高牧草产量和品质的关键措施。研究表明,适宜的水氮供应可显著提高无芒雀麦的生产能力,促进干物质积累和养分吸收^[3-4],协调其营养生长与生殖生长,并获得较高的氮磷钾累积量与累积速率^[4];适当的干旱胁迫可诱导无芒雀麦根系形态重塑,水分利用效率提高18%~25%^[5];氮素输入则可通过增加叶面积指数和光合有效辐射截获率,进而提高无芒雀麦光合辐射利用效率和水氮利用效率^[6],对无芒雀麦的生长有显著的积极影响^[7]。另有研究表明,过量灌溉会导致大量的硝态氮淋失,且高肥输入易造成土壤板结,加剧盐渍化,致使土壤有机质含量降低,从而影响土壤微生物群落结构^[8-9]。可见,适宜的水肥调控对无芒雀麦光合特性及产量形成十分重要。磷素作为植物生长发育的关键元素,与氮素和水分协同作用,共同影响作物的光合碳氮代谢、能量转移及产量形成^[10]。然而,现有关于无芒雀麦水肥管理的研究多集中于单一灌溉或单一施肥(特别是氮肥)^[11]效应,或侧重于对种子产量的影响,关于氮、磷、水三者耦合对无芒雀麦光合生理、饲草生产性能及土壤养分系统影响的综合研究尚少见报道。

基于以上问题,本研究通过设置不同的灌溉量和氮磷肥配比,探讨氮磷水肥耦合对无芒雀麦光合特性、生产性能及土壤养分的调控效应,以期明确无芒雀麦优质高效生产的适宜水肥调控模式,进而为新疆地区无芒雀麦种植提供理论依据和技术支撑。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于2024年4—10月在新疆维吾尔自治区石河子市军垦路二龙泉村石河子大学节水灌溉试验站(44°20' N, 88°30' E)进行。研究区域属于温带大陆性气候,年平均气温为8.1℃,年日照时长为2770 h,年降水量为190~260 mm,年蒸发量为1000~1500 mm,无霜期为168~171 d。土壤质地为灰漠土(中国土壤分类)^[12],0~20 cm土壤有机质(organic matter, OM)含量为19.5 g·kg⁻¹,全氮(total nitrogen, TN)含量为2.58 g·kg⁻¹,碱解氮(alkali-hydrolyzable nitrogen, AN)含量为45.47 mg·kg⁻¹,全磷(total phosphorus, TP)含量为1.53 g·kg⁻¹,速效磷(available phosphorus, AP)含量为19.3 mg·kg⁻¹,土壤容重为1.51 g·cm⁻³,pH为7.59。试验地前茬作物为紫花苜蓿(*Medicago sativa*)。

1.2 试验设计

供试无芒雀麦品种为‘乌苏1号’。试验设置3个水分梯度,分别为灌溉3800(W_1)、5300(W_2)和6800 $m^3 \cdot hm^{-2}$ (W_3);施肥设置3个梯度,分别为不施肥(F_0)、施N 120 $kg \cdot hm^{-2}$ 和 P_2O_5 100 $kg \cdot hm^{-2}$ (F_1)、施N 180 $kg \cdot hm^{-2}$ 和 P_2O_5 150 $kg \cdot hm^{-2}$ (F_2)。每个处理重复3次,共27个小区,小区面积为12 m^2 (4 m $\times$ 3 m)。于2024年4月19日进行人工条播,播种行距为40 cm,播种深度为1.5~2.0 cm,播种量为22.5 $kg \cdot hm^{-2}$ 。灌溉方式为地下滴灌,滴灌带浅埋于地下10~12 cm处,滴灌带间距为40 cm,所用滴灌带为内镶式滴灌带,滴头间距为20 cm。分别于苗期、分蘖期、孕穗—拔节期、抽穗—开花期和灌浆期进行灌溉。试验所用肥料为尿素(N $\geq$ 46%)、重过磷酸钙($P_2O_5 \geq$ 61%),尿素随水滴施,重过磷酸钙作为底肥在播种前一次性施入。小区四周均设有50 cm的过道,以防水肥互串。无芒雀麦生长期除水肥管理外,其他管理同当地大田进行统一管理。

1.3 测定指标与方法

1.3.1 光合参数 无芒雀麦叶片光合作用测定:由于试验地位于新疆,考虑到当地的时差,于11:00~13:00采用CI-340便携式光合仪(CID Bio-Science Inc., 美国)测定无芒雀麦叶片光合气体交换参数^[13-14]。选择无芒雀麦植株上长势、叶位、叶龄一致,刚刚完全展开叶的1/3完好无损且不受遮挡的叶片,测定其光合参数;测定植株叶片叶绿素含量的叶片应和测定植株光合作用的叶片一致,不同处理重复6次。具体光合气体交换参数包括叶片净光合速率(net photosynthetic rate, P_n , $\mu mol CO_2 \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$)、蒸腾速率(transpiration rate, T_r , $mmol H_2O \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$)、光能利用效率(light use efficiency, LUE, $mmol \cdot mol^{-1}$)及叶片瞬时水分利用效率(leaf instantaneous water use efficiency, WUE_i , $\mu mol \cdot mmol^{-1}$),其中光能利用效率及叶片瞬时水分利用效率由公式计算得出,具体计算公式如下:

$$LUE = P_n / PAR \quad (1)$$

$$WUE_i = P_n / T_r \quad (2)$$

式中:PAR为光合有效辐射(photosynthetically active radiation)。

采用乙醇浸提法^[15]测定植株叶片叶绿素含量,选取植株顶端向下第3~4片完全展开的成熟叶片中部区域,测定点需距离叶尖和叶基各约1/3处,避开主叶脉。用可见分光光度计(722N型,上海)测定波长在470、645、665 nm下的吸光值,并计算无芒雀麦叶片中叶绿素的含量,包括叶绿素a(chlorophyll a, Chla)、叶绿素b(chlorophyll b, Chlb)、类胡萝卜素(carotenoids, Car)和总叶绿素(total chlorophyll, TChl)。

1.3.2 生产性能 在无芒雀麦初花期,测量植株的株高(plant height, PH)、旗叶面积(flag leaf area, FLA)、干草产量(hay yield, HY)等农艺性状^[16]。株高:随机在每个小区选取有代表性的20株(单茎)无芒雀麦,测定植株最高部位到地面的绝对高度(cm);旗叶面积:随机在每个小区选取有代表性的20株(单叶)无芒雀麦,测定花序下第1片完全展开叶子的叶长和叶宽,计算叶长 $\times$ 叶宽。

于2024年8月23日,各小区内随机选取长势一致的3个样方(1 m $\times$ 1 m),将样方内的无芒雀麦全部刈割(留茬高度5 cm左右),称重后记录鲜重。随机取300 g鲜样,带回实验室于105 $^{\circ}C$ 烘箱内杀青30 min,然后在65 $^{\circ}C$ 烘干至恒重,计算其干草产量^[17]。

1.3.3 营养品质 测定指标包括:粗蛋白(crude protein, CP)、中性洗涤纤维(neutral detergent fiber, NDF)、酸性洗涤纤维(acid detergent fiber, ADF)含量及相对饲喂价值(relative feeding value, RFV)。

CP含量测定采用凯氏定氮法^[18],NDF和ADF含量测定采用范氏洗涤纤维法^[19],RFV计算公式如下:

$$RFV = (88.9 - 0.779 \times ADF) \times (120 / NDF) / 1.29 \quad (3)$$

1.3.4 土壤养分 无芒雀麦收获后,采用5点采样法,采取0~20 cm土层土壤,剔除石块及植物根系后带回实验室,进行pH值及土壤有机质(organic matter, OM)、全氮(total nitrogen, TN)、碱解氮(alkali-hydrolyzable nitrogen, AN)、全磷(total phosphorus, TP)、速效磷(available phosphorus, AP)含量的测定^[20]。其中pH值使用便携式pH计(PHS-3C,上海)测定;OM含量采用重铬酸钾法测定;TN含量采用凯氏定氮法测定;AN含量采用碱解扩散法测定;TP含量采用硫酸—高氯酸消煮法测定;AP含量采用钼锑抗比色法测定。

1.3.5 水肥利用效率 根据测定的产量、灌溉量及施肥量,分别计算水分利用效率(water use efficiency, WUE)、氮肥偏生产力(partial factor productivity of nitrogen, PFP_N)^[21]和磷肥偏生产力(partial factor productivity of phosphorus, PFP_P)^[22],计算公式如下:

$$WUE=HY/I \quad (4)$$

$$PFP_N=HY/N \quad (5)$$

$$PFP_P=HY/P \quad (6)$$

式中: HY 为干草产量($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$), I 为全生育期灌溉量($\text{m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$), N 为施氮量($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$), P 为施磷量($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)。

1.4 数据处理与分析

使用 Excel 2020 整理试验数据;使用 IBM SPSS Statistics 26 软件统计分析试验数据,采用双因素方差分析(Two-way ANOVA)和 Duncan 多重分析,比较不同灌溉量与施肥量及交互作用对无芒雀麦的影响;使用 Origin 2021 软件绘图。

2 结果与分析

2.1 不同氮磷水肥处理下无芒雀麦的光合特性

随着灌溉量和施肥量的增加,无芒雀麦的 P_n 、LUE 和 WUE_i 基本呈增加的趋势,其中 W_3F_1 处理较 W_1F_0 处理的 P_n 提升了 21.22%, WUE_i 提升了 31.18%, LUE 提升 19.85%(表 1)。而灌溉量和施肥量对 T_r 均影响不显著($P>0.05$)。方差分析表明,灌溉对无芒雀麦 P_n 、LUE 和 WUE_i 具有极显著影响($P<0.01$),而施肥对无芒雀麦 P_n 、LUE 具有极显著影响($P<0.01$)。

表 1 不同水肥处理下无芒雀麦光合性能

Table 1 Photosynthetic performance of *B. inermis* under different water and fertilizer treatments

处理 Treatment	净光合速率 Net photosynthetic rate (P_n , $\mu\text{mol CO}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	蒸腾速率 Transpiration rate (T_r , $\text{mmol H}_2\text{O}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	光能利用效率 Light use efficiency (LUE, $\text{mmol}\cdot\text{mol}^{-1}$)	叶片瞬时水分利用效率 Leaf instantaneous water use efficiency (WUE_i , $\mu\text{mol}\cdot\text{mmol}^{-1}$)
W_1F_0	17.06±0.51Bb	6.50±0.44Aa	0.0131±0.0005Bb	2.63±0.11Aa
W_2F_0	18.68±0.37Ba	6.42±0.75Aa	0.0144±0.0005Ba	2.93±0.28Aa
W_3F_0	19.30±0.32Ba	6.42±0.95Aa	0.0149±0.0002Ba	3.06±0.52Aa
W_1F_1	18.28±0.42Ab	6.26±0.57Aa	0.0141±0.0005Ab	2.93±0.21Aa
W_2F_1	20.36±0.41Aa	6.30±0.39Aa	0.0156±0.0004Aa	3.24±0.21Aa
W_3F_1	20.68±0.09Aa	6.07±0.81Aa	0.0157±0.0001Aa	3.45±0.42Aa
W_1F_2	18.03±0.50Ab	6.65±0.73Aa	0.0140±0.0005Ab	2.74±0.37Ab
W_2F_2	20.21±0.43Aa	5.94±0.61Aa	0.0155±0.0003Aa	3.43±0.34Aa
W_3F_2	20.44±0.18Aa	6.03±0.23Aa	0.0157±0.0002Aa	3.39±0.10Aa
W	<0.001	0.563	<0.001	0.005
F	<0.001	0.638	<0.001	0.063
W×F	0.726	0.839	0.946	0.807

W_1 : 灌溉量 $3800\text{ m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$ Irrigation amount $3800\text{ m}^3\cdot\text{ha}^{-1}$; W_2 : 灌溉量 $5300\text{ m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$ Irrigation amount $5300\text{ m}^3\cdot\text{ha}^{-1}$; W_3 : 灌溉量 $6800\text{ m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$ Irrigation amount $6800\text{ m}^3\cdot\text{ha}^{-1}$; F_0 : 不施肥 No fertilizer; F_1 : 施 N $120\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 P_2O_5 $100\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ Application of N $120\text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ and P_2O_5 $100\text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$; F_2 : 施 N $180\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 P_2O_5 $150\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ Application of N $180\text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ and P_2O_5 $150\text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$; W: 灌溉 Irrigation; F: 施肥 Fertilizer. 同列不同小写字母表示相同施肥水平下,不同灌溉处理间差异显著($P<0.05$);同列不同大写字母表示相同灌溉量水平下,不同施肥处理间差异显著($P<0.05$)。下同。The same column, different lowercase letters indicate significant differences among irrigation levels at the same fertilization level ($P<0.05$); different uppercase letters indicate significant differences among fertilization levels at the same irrigation level ($P<0.05$). The same below.

2.2 不同氮磷水肥处理下无芒雀麦的光合色素含量

相同施肥条件下,无芒雀麦的 Chla、Chlb 和 TChl 均随着灌溉量的增加而增加(除 W₃F₁ 处理外)(表 2)。除 W₁F₁ 处理,相同灌溉水平下施肥处理(F₁和 F₂)无芒雀麦的 Chla、Chlb 和 TChl 较不施肥处理(F₀)均增加,其中 W₃F₂ 处理的 Chla、Chlb 和 TChl 含量较 W₁F₀ 处理分别提高了 25.99%、31.80% 和 28.73%。而 Car 在各处理间差异不显著($P>0.05$)。方差分析表明,灌溉和施肥对无芒雀麦的 Chla、Chlb 和 TChl 均具有极显著影响($P<0.01$)。水肥交互对无芒雀麦的 Chlb 和 TChl 具有极显著影响($P<0.01$),对 Chla 具有显著影响($P<0.05$)。

表 2 不同水肥处理下无芒雀麦光合色素

Table 2 Photosynthetic pigments of *B. inermis* under different water and fertilizer treatments (mg·g⁻¹)

处理 Treatment	叶绿素 a Chlorophyll a (Chla)	叶绿素 b Chlorophyll b (Chlb)	类胡萝卜素 Carotenoids (Car)	总叶绿素 Total chlorophyll (TChl)
W ₁ F ₀	0.931±0.059Aa	0.827±0.072Aa	0.503±0.042Aa	1.758±0.108Aa
W ₂ F ₀	0.955±0.099Ba	0.833±0.083Ba	0.540±0.047Aa	1.788±0.166Ca
W ₃ F ₀	1.026±0.030Ba	0.856±0.041Ba	0.491±0.091Aa	1.882±0.071Ba
W ₁ F ₁	0.947±0.004Ab	0.811±0.070Ab	0.508±0.068Aa	1.758±0.071Ab
W ₂ F ₁	1.142±0.053Aa	1.034±0.056Aa	0.507±0.076Aa	2.176±0.108Aa
W ₃ F ₁	1.088±0.079ABa	0.940±0.023Ba	0.536±0.060Aa	2.029±0.080Ba
W ₁ F ₂	0.947±0.025Ab	0.852±0.062Ab	0.444±0.046Aa	1.798±0.059Ac
W ₂ F ₂	1.088±0.030Aa	0.911±0.059Bb	0.528±0.029Aa	1.999±0.084Bb
W ₃ F ₂	1.173±0.029Aa	1.090±0.060Aa	0.500±0.094Aa	2.263±0.075Aa
W	0.002	0.001	0.460	<0.001
F	<0.001	0.004	0.692	<0.001
W×F	0.043	0.006	0.731	0.005

2.3 不同氮磷水肥处理下无芒雀麦的生长性状

不同氮磷水肥处理对无芒雀麦的干草产量具有显著的影响(图 1)。无芒雀麦干草产量随着灌溉量和施肥量的增加均呈逐渐增加的趋势,在 W₃F₁ 处理下达到最大值,且较 W₁F₀ 处理增加了 28.31%,W₃F₁ 处理与 W₃F₂ 处理差异不显著($P>0.05$)。方差分析表明,灌溉、施肥处理和水肥交互水平对无芒雀麦干草产量均具有显著影响($P<0.05$),其中水分梯度下无芒雀麦干草产量的 F 值为最大,其次为施肥梯度,最低为水肥交互水平。

不同氮磷水肥处理下无芒雀麦株高和旗叶面积如图 2 所示。在 F₀ 处理下,株高和旗叶面积均随着灌溉量的增加而显著增加($P<0.05$)。无芒雀麦的株高与灌溉量呈正相关关系,在 W₃F₁ 处理下株高达到最高,且较 W₁F₀ 处理提高 60.70%。方差分析结果表明,灌溉、施肥处理和水肥交互水平对无芒雀麦的株高和旗叶面积均有极显著影响($P<0.01$),其中灌溉处理下无芒雀麦的株高和旗叶面积的 F 值均为最大值,其次

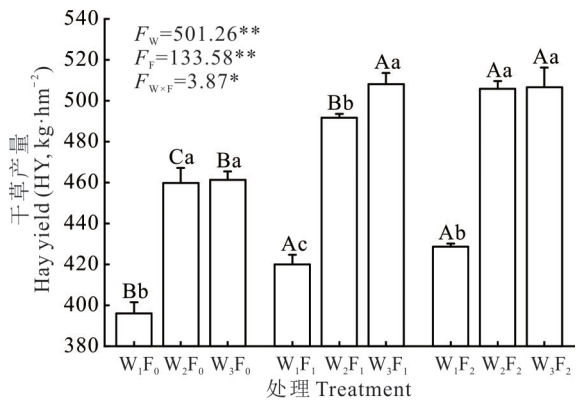


图 1 不同水肥处理下无芒雀麦的干草产量

Fig. 1 Hay yield of *B. inermis* under different water and fertilizer treatments

不同大写字母表示相同灌溉量处理下,不同施肥处理之间差异显著($P<0.05$);不同小写字母表示相同施肥处理下,不同灌溉量处理之间差异显著($P<0.05$)。Different capital letters indicate that under the same water treatment, there is a significant difference among different fertilization treatments ($P<0.05$); Different lowercase letters indicate that under the same fertilization treatment, there was a significant difference among different water treatments ($P<0.05$). *: $P<0.05$; **: $P<0.01$. 下同 The same below.

为施肥处理,水肥交互水平下为最低。

2.4 不同氮磷水肥处理下无芒雀麦的营养品质

不同氮磷水肥调控下无芒雀麦的CP、ADF和NDF含量及RFV如表3所示。无芒雀麦CP含量随着施肥量和灌溉量的增加均呈逐渐增加的趋势(除W₃F₂处理外),W₂F₂处理较W₁F₀处理的CP含量增加了29.50%。相同灌溉水平下,NDF和ADF含量随施肥量的增加呈下降后趋于稳定的趋势。在不施肥(F₀)条件下,ADF含量随着灌溉量的增加呈逐渐下降的趋势,W₃F₀处理较W₁F₀处理的ADF含量降低了13.94%。而在F₁和F₂水平下,NDF和ADF含量随着灌溉量的增加呈下降后增高的趋势。除W₁F₂处理外,其他处理的RFV值均大于100,其中W₃F₂处理最高,且高于其他处理。方差分析表明,灌溉、施肥处理和水肥交互均对无芒雀麦的CP和ADF含量有极显著的影响($P<0.01$)。

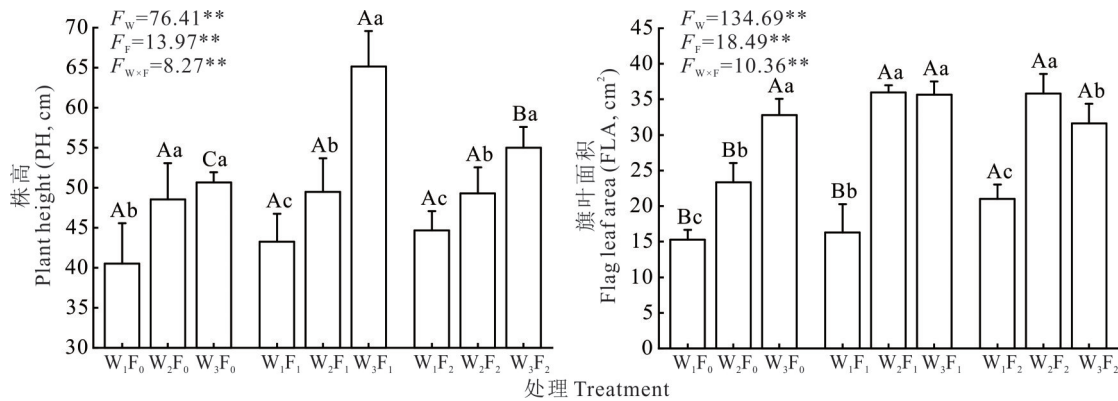


图2 不同水肥处理下无芒雀麦的生长性状

Fig. 2 Growth traits of *B. inermis* under different water and fertilizer treatments

表3 不同水肥处理下无芒雀麦的营养品质

Table 3 Nutritional quality of *B. inermis* under different water and fertilizer treatments (%)

处理 Treatment	粗蛋白 Crude protein (CP)	酸性洗涤纤维 Acid detergent fiber (ADF)	中性洗涤纤维 Neutral detergent fiber (NDF)	相对饲喂价值 Relative feeding value (RFV)
W ₁ F ₀	11.39±0.09Bc	32.15±1.91Aa	51.14±1.22Aa	131.04±1.93Aa
W ₂ F ₀	12.09±0.38Cb	30.87±0.64Aa	51.49±0.71Aa	113.26±2.83Bb
W ₃ F ₀	13.32±0.19Ba	27.67±0.33Bb	50.38±0.29Aa	120.42±2.89Bb
W ₁ F ₁	12.64±0.09Ab	31.27±0.13Aa	51.18±1.38Aa	115.82±1.71Bab
W ₂ F ₁	13.96±0.42Ba	27.86±0.26Bc	48.60±0.50Bb	110.63±7.64Bb
W ₃ F ₁	14.16±0.04Aa	29.54±0.40Ab	49.56±1.22Aab	120.84±5.98Ba
W ₁ F ₂	12.99±0.33Ac	30.60±1.00Aa	51.50±0.89Aa	83.49±0.50Cc
W ₂ F ₂	14.75±0.28Ab	26.72±0.83Bb	50.59±0.09Aa	129.17±2.45Ab
W ₃ F ₂	13.80±0.63ABa	27.50±0.76Bb	50.68±1.22Aa	143.93±6.11Aa
W	<0.001	<0.001	0.021	0.045
F	<0.001	<0.001	0.032	<0.001
W×F	<0.001	0.002	0.327	<0.001

2.5 不同氮磷水肥处理下无芒雀麦的土壤养分含量

不同水肥处理明显影响无芒雀麦的土壤养分含量(表4)。在相同水分条件下,施肥(F₁、F₂)提高了无芒雀麦田OM的含量,其中,W₃F₁处理的OM含量最高(21.38 g·kg⁻¹),较最低的W₁F₀处理提高了48.58%。施肥处理对

磷素养分的提升效果显著,TP 含量在 W_1F_2 处理下达到最高,较 W_1F_0 处理增加了 25.17%。AP 含量则在 W_3F_2 处理下达到最高 ($14.68\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$),较 W_1F_0 处理增加了 19.06%。 W_3F_2 处理的 AN 含量达到最大值 ($57.18\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$),高于其他处理,且较 W_1F_0 处理 ($20.85\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) 增加了 174.24%。在相同水分 (W_3) 条件下, W_3F_2 较 W_3F_0 处理的 AN 含量增加了 104.43%;在相同施肥 (F_2) 条件下, W_3F_2 较 W_1F_2 处理的 AN 含量增加了 46.62%。各处理间的 pH 值均无显著差异 ($P>0.05$)。方差分析表明,施肥梯度对无芒雀麦田土壤 OM、TP、AP、TN 和 AN 含量均具有显著影响 ($P<0.05$),灌溉量仅对土壤 AP、TP 和 AN 含量有显著影响 ($P<0.05$),水肥交互作用仅对土壤 AN 含量具有极显著影响 ($P<0.01$),而对其他指标 (OM、TP、AP、TN) 均无显著影响 ($P>0.05$)。

表 4 不同水肥处理下无芒雀麦的土壤养分含量

Table 4 Soil nutrients of *B. inermis* under different water and fertilizer treatments

处理 Treatment	pH	有机质 Organic matter (OM, $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	全磷 Total phosphorus (TP, $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	速效磷 Available phosphorus (AP, $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	全氮 Total nitrogen (TN, $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	碱解氮 Alkali-hydrolyzable nitrogen (AN, $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)
W_1F_0	$7.74\pm0.08\text{Aa}$	$14.39\pm0.71\text{Bb}$	$1.43\pm0.10\text{Ba}$	$12.33\pm0.32\text{Ca}$	$2.17\pm0.11\text{Ba}$	$20.85\pm3.12\text{Cb}$
W_2F_0	$7.79\pm0.03\text{Aa}$	$15.68\pm0.34\text{Aab}$	$1.30\pm0.01\text{Ba}$	$12.68\pm0.47\text{Ca}$	$2.13\pm0.01\text{Aa}$	$30.16\pm2.33\text{Ba}$
W_3F_0	$7.77\pm0.04\text{Aa}$	$17.75\pm0.90\text{Ba}$	$1.28\pm0.10\text{Ca}$	$12.53\pm0.08\text{Ca}$	$2.13\pm0.01\text{Ba}$	$27.98\pm1.09\text{Ca}$
W_1F_1	$7.78\pm0.04\text{Aa}$	$16.84\pm0.19\text{Ab}$	$1.63\pm0.01\text{Aa}$	$13.44\pm0.42\text{Bb}$	$2.27\pm0.03\text{ABa}$	$30.49\pm0.79\text{Bc}$
W_2F_1	$7.78\pm0.05\text{Aa}$	$16.43\pm0.63\text{Ab}$	$1.51\pm0.06\text{Aa}$	$13.69\pm0.14\text{Bab}$	$2.21\pm0.01\text{Aa}$	$40.97\pm2.13\text{Ab}$
W_3F_1	$7.75\pm0.03\text{Aa}$	$21.38\pm1.20\text{Aa}$	$1.52\pm0.17\text{Ba}$	$14.03\pm0.27\text{Ba}$	$2.24\pm0.01\text{ABa}$	$48.22\pm2.74\text{Ba}$
W_1F_2	$7.77\pm0.03\text{Aa}$	$15.64\pm0.11\text{ABb}$	$1.79\pm0.09\text{Aa}$	$14.05\pm0.34\text{Ab}$	$2.33\pm0.06\text{Aa}$	$39.00\pm2.87\text{Ab}$
W_2F_2	$7.76\pm0.02\text{Aa}$	$17.52\pm0.42\text{Ab}$	$1.67\pm0.17\text{Aa}$	$14.52\pm0.51\text{Aab}$	$2.24\pm0.10\text{Aa}$	$44.25\pm2.92\text{Ab}$
W_3F_2	$7.76\pm0.03\text{Aa}$	$20.43\pm0.33\text{Aa}$	$1.72\pm0.04\text{Aa}$	$14.68\pm0.06\text{Aa}$	$2.31\pm0.13\text{Aa}$	$57.18\pm6.78\text{Aa}$
W	0.960	0.057	0.038	0.012	0.198	<0.001
F	0.660	0.008	<0.001	<0.001	0.002	<0.001
$W\times F$	0.673	0.190	0.959	0.590	0.968	0.009

2.6 不同氮磷水肥处理下无芒雀麦的水肥利用效率

氮磷水肥耦合对无芒雀麦建植期的水分及肥料利用效率具有显著影响 (图 3)。WUE 随灌溉量的增加呈显著降低的趋势 ($P<0.05$)。在同一灌溉量的条件下,施肥处理 (F_1 、 F_2) 较不施肥处理 (F_0) 的 WUE 显著提升 ($P<0.05$),但水肥交互对 WUE 影响不显著 ($P>0.05$)。其中, W_1F_2 处理的 WUE 最高 ($0.113\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$),而 W_3F_0 处理的 WUE 最低 ($0.068\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$)。PFP_N 与 PFP_P 的变化趋势高度一致,灌溉量、施肥量及交互作用均对 PFP_N 与 PFP_P 产生极显著影响 ($P<0.01$)。在同一施肥水平下, PFP_N 与 PFP_P 随着灌溉量的增加而增加,而 F_1 处理下的 PFP_N 与

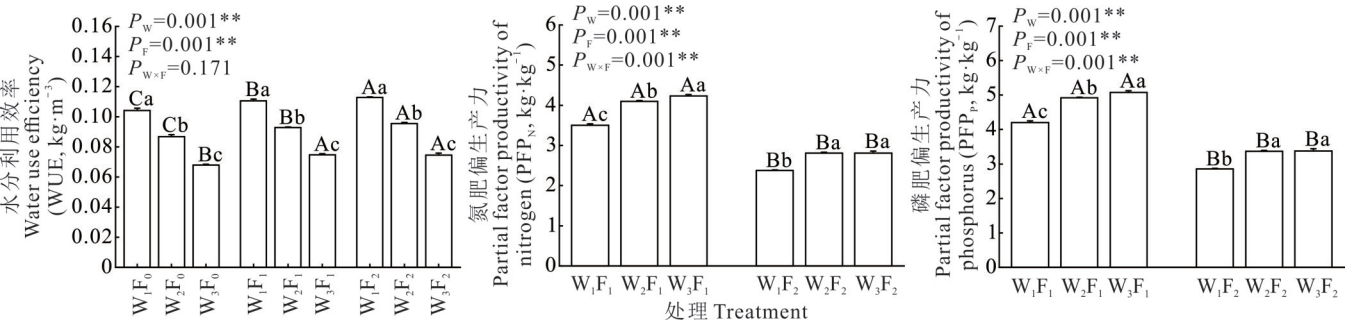


图 3 不同水肥处理下无芒雀麦的水肥利用效率

Fig. 3 Water and fertilizer use efficiency of *B. inermis* under different water and fertilizer treatments

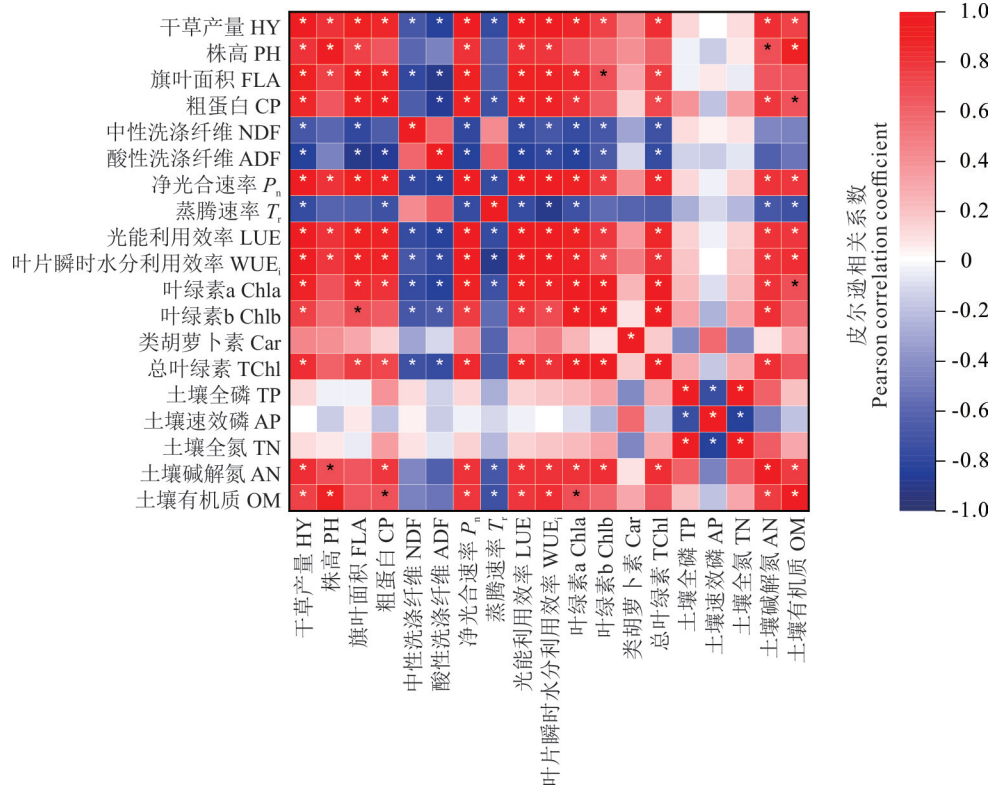


图4 无芒雀麦光合特性、生产性能及土壤养分含量的相关性热图

Fig. 4 Correlation heat map of photosynthetic characteristics, production performance and soil nutrients of *B. inermis*

*: $P < 0.05$.

PFP_p均显著高于F₂处理($P < 0.05$),其中W₃F₁处理的PFP_N与PFP_p均最高,分别为4.23和5.08 kg·kg⁻¹,且显著高于W₁F₁处理($P < 0.05$)。

2.7 相关性分析

对无芒雀麦生产性能、光合性能及土壤养分含量进行相关性分析,结果表明,干草产量和 P_n 均与株高、FLA、CP、LUE、 WUE_i 、Chla、Chlb、TChl、土壤AN和土壤OM呈显著正相关($P < 0.05$),与NDF、ADF和 T_r 呈显著负相关($P < 0.05$,图4)。CP含量与FLA、 P_n 、LUE、 WUE_i 、Chla、TChl、土壤AN和土壤OM呈显著正相关($P < 0.05$)。土壤TP与TN呈显著正相关($P < 0.05$)。

2.8 主成分分析

对不同水肥处理下无芒雀麦干草产量、生长性状、营养品质和光合特性指标进行主成分分析,以特征值大于1和方差贡献率来确定最优的主成分数。第1主成分和第2主成分特征值均大于1。第1主成分对总方差贡献率达76.3%,以 P_n 、LUE、干草产量、 WUE_i 和Chla贡献较大。第2主成分对总方差贡献率达9.5%,以Car和 T_r 贡献较大。其累计方差贡献率达到85.8%,可以代表所有农艺性状、营养品质及光合特性的绝大部分信息(图5和表5)。综合评价结果表明,W₃F₁处理综合评价得分最高,W₃F₂处理次之,W₁F₀处理综合评价得分最低。

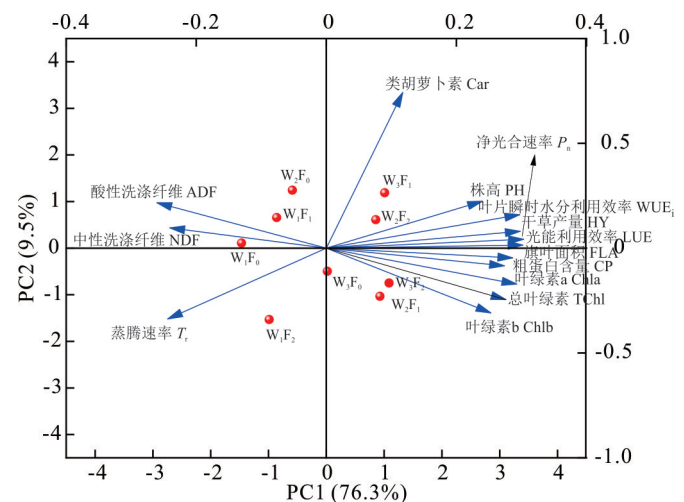


图5 不同水肥处理下无芒雀麦主要指标的主成分分析双标图

Fig. 5 Principal component analysis biplot of main indexes of *B. inermis* under different water and fertilizer treatments

表 5 不同水肥处理下无芒雀麦的综合评价结果

Table 5 Comprehensive evaluation results of *B. inermis* under different water and fertilizer treatments

处理 Treatment	第 1 主成分得分 First principal component score (PC1)		第 2 主成分得分 Second principal component score (PC2)		综合评价结果 Comprehensive evaluation result	
	得分 Score	排序 Rank	得分 Score	排序 Rank	综合得分 Composite score	排序 Rank
W ₁ F ₀	-1.466	9	0.111	5	-1.292	9
W ₂ F ₀	-0.587	6	1.244	1	-0.384	6
W ₃ F ₀	0.019	5	-0.496	6	-0.038	5
W ₁ F ₁	-0.857	7	0.658	3	-0.690	7
W ₂ F ₁	0.929	3	-1.033	8	0.712	4
W ₃ F ₁	1.010	2	1.188	2	1.030	1
W ₁ F ₂	-0.988	8	-1.533	9	-1.049	8
W ₂ F ₂	0.855	4	0.612	4	0.828	3
W ₃ F ₂	1.086	1	-0.749	7	0.882	2

3 讨论

3.1 水肥调控对无芒雀麦光合色素和光合特性的影响

光合作用是植株生长最基础的能量与物质代谢过程,也是对逆境胁迫极其敏感的生理过程之一。本研究表明,适宜的氮磷水肥调控(W₃F₁处理)较 W₁F₀提升了 P_n (21.22%)、 WUE_t (31.18%)及 LUE(19.85%),并促进叶绿素的合成,这主要得益于氮磷水肥耦合直接影响植株叶片色素、气孔闭合及光合呼吸酶活性,并通过刺激土壤酶活性的方式提高水分和养分的运输速率,进而加快植株养分积累过程^[23-24];而适宜的氮磷营养不仅是合成叶绿素和核酮糖-1,5-二磷酸羧化酶/加氧酶(ribulose-1,5-bisphosphate carboxylase/oxygenase, Rubisco)的关键原料,也直接参与光合电子传递和光合磷酸化过程^[23,25]。W₃F₁处理可能通过协调气孔导度与 Rubisco 活性^[26],同步优化了光合碳同化与氮素在光合机构中的分配效率^[25,27]。而在 W₁F₀处理下,水分与养分胁迫共同导致叶绿体结构受损、气孔关闭和羧化效率下降,最终抑制光合同化能力^[28]。本研究的趋势与玉米(*Zea mays*)^[29]、小麦(*Triticum aestivum*)^[30]等作物的水肥耦合趋势吻合。

3.2 建植期水肥调控对无芒雀麦生物量分配与养分积累的影响

本研究表明无芒雀麦建植第 1 年总体生物量积累有限,但不同氮磷水肥调控依然对无芒雀麦的产量及品质产生显著影响,其中 W₃F₁处理在产量和粗蛋白含量方面均表现优异,较 W₁F₀处理干草产量提升了 28.31%,CP 含量增长了 24.32%。尽管 W₃F₁处理的单株株高和旗叶面积均优于 W₃F₂处理,但产量却无差异,这是因为较高的氮磷供应和水分充足条件能促进无芒雀麦分蘖数的增长^[31],W₃F₂处理通过增加单位面积茎蘖数补偿了单株生长的不足,从而在群体水平上实现了与 W₃F₁处理相当的产量。然而,在低灌溉量和不施肥处理下,无芒雀麦受到干旱胁迫和养分供应不足的影响,光合产物优先分配至根系以维持水分的吸收,导致大量有机质被根系消耗,抑制茎秆中养分的转移^[25,27],进而影响植株的生长发育及牧草的品质;当施肥过量后,则会导致无芒雀麦生育期推迟,植株干物质积累达到峰值后会出现小幅度下降^[32],高肥(F₂)则造成过度输入、盐分胁迫或养分失衡等不利因素。此外,在不同的水肥调控下无芒雀麦的养分积累与紫花苜蓿^[3,33]、小麦^[34]、水稻(*Oryza sativa*)^[35]、羊草(*Leymus chinensis*)^[36]等作物的生长趋势类似。

3.3 水肥调控对无芒雀麦土壤养分含量的影响

水肥调控不仅影响作物生物量的积累,也直接作用于土壤环境。本研究表明,W₃F₂处理显著提升土壤 AP、AN 含量,其中 TP、AP、TN 和 AN 含量较 W₁F₀处理分别提升 20.28%、19.06%、6.45% 和 174.24%($P<0.05$),其中对 AN 含量提升最为显著;W₃F₁处理的土壤 AP、AN 含量较 W₁F₀处理分别提升 13.79%、131.27%($P<0.05$),同时 PFP_N、PFP_P显著高于 W₃F₂处理,这源于肥料的输入与适宜的水分促进土壤微生物的活性和养分转

移^[34]。此外,高肥(F₂)可提高土壤脲酶活性,加速尿素的分解,释放的NH₄⁺-N与根系分泌物形成螯合效应,也从侧面体现出无芒雀麦具备改善土壤的潜在能力。这与水氮耦合对鸭茅(*Dactylis glomerata*)^[37]和旱藕(*Canna indica*)^[38]的研究结果一致,即在0~20 cm土壤中适宜的水氮耦合处理可显著提高鸭茅草地的OM、TP、全钾含量($P<0.05$),旱藕地土壤AN、AP和速效钾含量分别较对照组显著提高25.52%、39.70%和34.67%($P<0.05$)。

本研究表明,不同水肥处理对无芒雀麦的综合效应存在显著差异,W₃F₁处理(灌溉6800 m³·hm⁻²,施N 120 kg·hm⁻²、P₂O₅ 100 kg·hm⁻²)综合评分最高(表5),但水肥交互作用对多项测定指标(如P_n、LUE、T_r、TP、TN等)的影响不显著($P>0.05$,表1和表4),可能是因为在设定的水肥梯度范围内,灌溉量和施肥量对无芒雀麦关键生理过程和部分土壤养分的影响主要表现为独立的主效应^[2]。此外,无芒雀麦作为耐旱性较强的禾本科牧草,其光合器官和根系对水分和养分的积累,以及土壤中水分运移和养分转化过程在短期内可能主要以加和方式响应水肥输入的增加,而在一定范围内具有相对独立性^[4]。

4 结论

水肥调控对无芒雀麦的光合特性、生产性能及土壤养分含量均具有明显的改善效果,当灌溉量为6800 m³·hm⁻²和施N量为120 kg·hm⁻²、施P₂O₅量为100 kg·hm⁻²时,有利于无芒雀麦光合产物的形成及土壤养分的改善,进而提高其生产性能。

参考文献 References:

- [1] Yu A P, Jiang A C, Zhang H H, *et al.* Comparison and comprehensive evaluation of agronomic traits and productivity of 14 *Bromus inermis*. *Acta Agrestia Sinica*, 2024, 32(10): 3205—3214.
于爱萍, 蒋昂辰, 张浩浩, 等. 14份无芒雀麦种质农艺性状与生产性能的比较及综合评价. *草地学报*, 2024, 32(10): 3205—3214.
- [2] Luo F M. Effect of water and fertilizer regulation on yield and quality of *Bromus inermis* Leyss. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2024.
罗凤敏. 水肥调控对无芒雀麦产量及品质特性的影响. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2014.
- [3] Sha B P, Xie Y Z, Gao X Q, *et al.* Effects of coupling of drip irrigation water and fertilizer on yield and quality of alfalfa in the yellow river irrigation district. *Acta Prataculturae Sinica*, 2021, 30(2): 102—114.
沙栢平, 谢应忠, 高雪芹, 等. 地下滴灌水肥耦合对紫花苜蓿草产量及品质的影响. *草业学报*, 2021, 30(2): 102—114.
- [4] Tang Z X, Qi G P, Yin M H, *et al.* Effects of water and nitrogen regulation on nitrogen, phosphorus and potassium accumulation, quality, water and N utilization of *Bromus inermis*. *Chinese Journal of Grassland*, 2023, 45(5): 60—70.
唐仲霞, 齐广平, 银敏华, 等. 水氮调控对无芒雀麦氮磷钾累积、品质及水氮利用的影响. *中国草地学报*, 2023, 45(5): 60—70.
- [5] Jiang Y B, Kang Y X, Qi G P, *et al.* Irrigation scheduling based on yield and quality in *Bromus inermis*. *Acta Prataculturae Sinica*, 2022, 31(11): 158—171.
姜渊博, 康燕霞, 齐广平, 等. 基于产量与品质的无芒雀麦灌溉制度研究. *草业学报*, 2022, 31(11): 158—171.
- [6] Wang A X, Qi G P, Yin M H, *et al.* Effects of water and nitrogen regulation on growth and radiation utilization of alfalfa and *Bromus inermis* Leysis. mixed cropping grassland. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2023, 41(2): 168—178.
汪爱霞, 齐广平, 银敏华, 等. 水氮调控对苜蓿与无芒雀麦混播草地生长和辐射利用的影响. *干旱地区农业研究*, 2023, 41(2): 168—178.
- [7] Zhao Z W, Qin Y L, Wu Y, *et al.* Effects of nitrogen addition on plant-soil-microbe stoichiometry characteristics of different functional group species in *Bothriochloa ischemum* community. *Soil Ecology Letters*, 2021, 4: 362—375.
- [8] Zhang X G, Hu X T, Ran H, *et al.* The response of grape yield and water fertilizer utilization to water and fertilizer coupling in greenhouse and its simulation. *China Rural Water and Hydropower*, 2019(1): 1—5.
张兴国, 胡笑涛, 冉辉, 等. 水肥耦合对温室葡萄产量和水肥利用的影响. *中国农村水利水电*, 2019(1): 1—5.
- [9] Xing Y Y, Zhang F C, Wu L F, *et al.* Determination of optimal amount of irrigation and fertilizer under drip fertigated system based on tomato yield, quality, water and fertilizer use efficiency. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31(Supple1): 110—121.

- 邢英英, 张富仓, 吴立峰, 等. 基于番茄产量品质水肥利用效率确定适宜滴灌灌水施肥量. 农业工程学报, 2015, 31(增刊 1): 110—121.
- [10] Ge J H, Han X Y, Wang Q, *et al.* From photosynthesis to grain formation: A comprehensive evaluation of nitrogen-phosphorus co-optimization strategies in mung bean (*Vigna radiata* L.) cultivation. Field Crops Research, 2025, 333: 110112.
- [11] Shi G Q, Jiererge, Sui X Q, *et al.* Impact of foliar microelement fertilizer application on seed yield of *Bromus inermis*. Chinese Journal of Grassland, 2024, 46(6): 66—76.
- 石国庆, 吉尔尔格, 隋晓青, 等. 叶面喷施微肥对无芒雀麦种子生产的影响. 中国草地学报, 2024, 46(6): 66—76.
- [12] Wang G X, Cheng G D. The characteristics of soil resources and sustainable development in the arid northwest China. Advances in Earth Science, 1999(5): 492—497.
- 王根绪, 程国栋. 西北干旱区土壤资源特征与可持续发展. 地球科学进展, 1999(5): 492—497.
- [13] Zhang Y Y, Hu D D, Ma C H, *et al.* Leaf structure and photosynthetic properties of alfalfa in response to bacteria and phosphorus addition. Acta Prataculturae Sinica, 2024, 33(8): 133—144.
- 张盈盈, 胡丹丹, 马春晖, 等. 苜蓿叶片结构和光合特性对菌磷添加的响应. 草业学报, 2024, 33(8): 133—144.
- [14] Liu X S, Sun Y L, An X X, *et al.* Effects of phosphorus application and inoculation with arbuscular mycorrhizal fungi and phosphorus-solubilizing bacteria on the photosynthetic characteristics and biomass of alfalfa. Acta Prataculturae Sinica, 2023, 32(3): 189—199.
- 刘选帅, 孙延亮, 安晓霞, 等. 施磷和接种解磷菌对紫花苜蓿光合特性及生物量的影响. 草业学报, 2023, 32(3): 189—199.
- [15] Liu L Y, Jia Y S, Wang Z J, *et al.* The law and correlation of chlorophyll and nutrient content changes during alfalfa drying. Chinese Journal of Grassland, 2021, 43(11): 60—68.
- 刘丽英, 贾玉山, 王志军, 等. 苜蓿干燥过程中叶绿素与营养物质含量的变化及相关性. 中国草地学报, 2021, 43(11): 60—68.
- [16] Huang W, Chang W, Yu S Y, *et al.* Comprehensive evaluation of production performance and nutritional quality of 16 *Bromus inermis* germplasm resources. Pratacultural Science, 2021, 38(11): 2237—2246.
- 黄薇, 常巍, 余淑艳, 等. 16 份无芒雀麦种质资源生产性能与营养品质的综合评价. 草业科学, 2021, 38(11): 2237—2246.
- [17] Zhang Y Y, An X X, Ma C H, *et al.* The coupling of phosphate solubilizing bacteria and phosphate fertilizer to improve the growth and photosynthetic performance of alfalfa. Chinese Journal of Grassland, 2023, 45(11): 43—51.
- 张盈盈, 安晓霞, 马春晖, 等. 解磷细菌与磷肥耦合提高苜蓿生长及光合性能. 中国草地学报, 2023, 45(11): 43—51.
- [18] Yang K X, Zhao J T, Wang X Z, *et al.* Effects of different irrigation methods and phosphorus application on alfalfa yield, quality and water and phosphorus use efficiency. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2023, 39(21): 130—138.
- 杨开鑫, 赵建涛, 王旭哲, 等. 不同灌溉方式及施磷对紫花苜蓿产量、品质及水磷利用效率的影响. 农业工程学报, 2023, 39(21): 130—138.
- [19] An X X, Li X, Cao G H, *et al.* Effects of arbuscular mycorrhizal fungi and phosphorus fertilizer interaction on the aboveground biomass and nutritional quality of alfalfa. Chinese Journal of Grassland, 2023, 45(4): 90—99.
- 安晓霞, 李想, 曹冠华, 等. 菌磷互作对紫花苜蓿地上生物量及营养品质的影响. 中国草地学报, 2023, 45(4): 90—99.
- [20] Guo W, Li D D, Xu J S, *et al.* Effects of application of straw and organic-inorganic fertilizers on soil quality and wheat yield in different texture fluvo-aquic soils. Acta Pedologica Sinica, 2024, 61(5): 1360—1373.
- 郭伟, 李丹丹, 徐基胜, 等. 秸秆与有机无机肥配施对不同质地潮土土壤质量和小麦产量的影响. 土壤学报, 2024, 61(5): 1360—1373.
- [21] Zhang D L, Chai Q, Yin W, *et al.* Response of maize agronomic traits, yield, water and fertilizer use efficiency to intercropping green manure under reduced irrigation levels in arid irrigation areas. Agricultural Research in the Arid Areas, 2024, 42(5): 85—96.
- 张刁亮, 柴强, 殷文, 等. 干旱灌区减量灌水下玉米农艺性状、产量及水肥利用效率对间作绿肥的响应. 干旱地区农业研究, 2024, 42(5): 85—96.
- [22] Du J X, Han T F, Qu X L, *et al.* Spatial-temporal evolution characteristics and driving factors of partial phosphorus productivity in major grain crops in China. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2022, 28(2): 191—204.
- 都江雪, 韩天富, 曲潇林, 等. 中国主要粮食作物磷肥偏生产力时空演变特征及驱动因素. 植物营养与肥料学报, 2022, 28(2): 191—204.
- [23] Liu C G, Wang Y J, Pan K W, *et al.* Carbon and nitrogen metabolism in leaves and roots of dwarf bamboo (*Fargesia denudata*)

- subjected to drought for two consecutive years during sprouting period. *Journal of Plant Growth Regulation*, 2014, 33(2): 243–255.
- [24] Lu J Y, Yang H M, Tian H, *et al.* Effect of water addition on carbon, nitrogen and phosphorus concentrations, and stoichiometric characteristics of alfalfa stems and leaves at different growth stage. *Chinese Journal of Grassland*, 2021, 43(6): 25–34.
- 陆皎云, 杨惠敏, 田宏, 等. 水分对不同生育时期紫花苜蓿茎叶碳、氮、磷含量及化学计量特征的影响. *中国草地学报*, 2021, 43(6): 25–34.
- [25] Foyer C H, Descourviers P, Kunert K J. Protection against oxygen radicals: an important defense mechanism studied in transgenic plants. *Plant, Cell and Environment*, 1994, 17: 507–523.
- [26] Shanguan Z P, Shao M A, Dyckmans J. Effects of nitrogen nutrition and water deficit on net photosynthetic rate and chlorophyll fluorescence in winter wheat. *Journal of Plant Physiology*, 2000, 156(1): 46–51.
- [27] Wu L L, Tian C, Zhang L, *et al.* Research advance in the roles of water-nitrogen-oxygen factors in mediating rice growth, photosynthesis and nitrogen utilization in paddy soils. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2021, 32(4): 1498–1508.
- 吴龙龙, 田仓, 张露, 等. 稻田水氮氧环境因子对水稻生长发育、光合作用和氮利用的调控研究进展. *应用生态学报*, 2021, 32(4): 1498–1508.
- [28] Xu X P, Fu X D, Liao H, *et al.* Advances in study of ammonium assimilation and its regulatory mechanism in plants. *Chinese Bulletin of Botany*, 2016, 51(2): 152–166.
- 徐晓鹏, 傅向东, 廖红, 等. 植物铵态氮同化及其调控机制的研究进展. *植物学报*, 2016, 51(2): 152–166.
- [29] Chen Z H, Wei T B. Effects of coupling of irrigation and nitrogen fertilization on photosynthesis dry matter accumulation and yield of maize. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2025, 41(4): 1–9.
- 陈朝辉, 魏廷邦. 水肥耦合对玉米光合作用、干物质积累量和产量的影响. *中国农学通报*, 2025, 41(4): 1–9.
- [30] Cui Z K, Ding Z W, Shi Y, *et al.* Effects of water and nitrogen management on photosynthetic matter production and yield of wheat. *Journal of Applied Ecology*, 2024, 35(6): 1564–1572.
- [31] Wu W, Dong X O, Chen G M, *et al.* The elite haplotype OsGATA8-H coordinates nitrogen uptake and productive tiller formation in rice. *Nature Genetics*, 2024, 56: 1516–1526.
- [32] Cassman K G, Dobermann A, Walters D T. Agroecosystems, nitrogen-use efficiency, and nitrogen management. *Ambio*, 2002, 31(2): 132–140.
- [33] Lu B F, Kang W J, Shi S L, *et al.* The study on dynamics of nitrogen fixation efficiency of alfalfa-rhizobia symbiosis. *Chinese Journal of Grassland*, 2024, 46(6): 36–48.
- 陆保福, 康文娟, 师尚礼, 等. 紫花苜蓿与根瘤菌共生过程中固氮效率的动态研究. *中国草地学报*, 2024, 46(6): 36–48.
- [34] He P. Comprehensive evaluation of the effects of different water and fertilizer patterns on physiological growth and soil nutrients in winter wheat. Zhengzhou: North China University of Water Resources and Electric Power, 2024.
- 何平. 不同水肥模式对冬小麦生理生长和土壤养分影响的综合评价. 郑州: 华北水利水电大学, 2024.
- [35] Meng X Y, Zhou L Y, Zhang Z X, *et al.* Effects of different irrigation patterns on growth, water and radiation use efficiency of rice. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2019, 50(11): 285–292.
- 孟翔燕, 周凌云, 张忠学, 等. 不同灌溉模式对水稻生长、水分和辐射利用效率的影响. *农业机械学报*, 2019, 50(11): 285–292.
- [36] Su F Y, Hao M D, Guo H H, *et al.* Effects of nitrogen fertilizer on the yield and nutrition absorption of artificial *Leymus chinensis* grassland. *Acta Agrestia Sinica*, 2015, 23(4): 893–896.
- 苏富源, 郝明德, 郭慧慧, 等. 施用氮肥对人工羊草草地产量及养分吸收的影响. *草地学报*, 2015, 23(4): 893–896.
- [37] Liu X Y, Mao P C, Zheng M L, *et al.* Effects of water and nitrogen coupling treatment on yield, quality and soil characteristics of *Dactylis glomerata* under forest. *Acta Agrestia Sinica*, 2025, 33(5): 1602–1611.
- 刘晓宇, 毛培春, 郑明利, 等. 水氮耦合处理对林下鸭茅草产量与品质及土壤特性的影响. *草地学报*, 2025, 33(5): 1602–1611.
- [38] Fan W J, Yang X, He H Y, *et al.* Effect of water and nitrogen coupling on the yield and physiology characteristics of edible canna and the physical and chemical properties of soil. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2022, 35(5): 1069–1078.
- 樊吴静, 杨鑫, 何虎翼, 等. 水氮耦合对旱藕产量、生理特性和土壤理化性状的影响. *西南农业学报*, 2022, 35(5): 1069–1078.