

无芒雀麦与苜蓿混播草地生产力提升的水氮调控模式

汪爱霞, 马彦麟, 齐广平, 康燕霞, 银敏华, 汪精海, 贾琰, 唐仲霞, 姜渊博

(甘肃农业大学水利水电工程学院, 兰州 730070)

摘要: 针对西北干旱草原区天然草地退化、水土流失严重以及人工草地生产力低下等问题, 研究种植模式和水氮调控对牧草产量、品质和水氮利用效率的影响, 以期获得高产高效的草地管理模式。以 3 年生紫花苜蓿和无芒雀麦(2018 年播种)为试验材料, 分析种植模式(无芒雀麦与苜蓿混播 D1, 无芒雀麦单播 D2)、施氮(纯氮)量(N1:60 kg/hm²; N2:120 kg/hm²)和灌水量(以灌水下限占田间持水量 θ_f 的百分比计, 轻度亏水 65% θ_f 、中度亏水 55% θ_f 、重度亏水 45% θ_f 分别记为 W1、W2、W3, 灌水上限均为 85% θ_f)3 个因素对牧草产量、品质和水氮利用效率的影响。结果表明:(1)增加灌水量和施氮量有利于牧草株高和茎粗的生长, 与 W3N1 处理相比, W1N2 处理混播苜蓿、混播无芒雀麦和单播无芒雀麦三茬平均株高分别增加 27.41%、20.26% 和 26.55%, 茎粗分别增加 11.32%、4.11% 和 20.98%; 混播对无芒雀麦株高有促进作用, 对茎粗有抑制作用。(2)灌水量和施氮量的增加有利于提高牧草产量和品质, W1N2 处理牧草年产量和粗蛋白(CP)含量最高, 与 W3N1 处理相比, W1N2 处理下混播牧草年产量、CP 含量分别增加 42.16%、27.00%, 单播牧草年产量、CP 含量分别增加 38.59%、37.26%, 混播牧草 ADF 和 NDF 分别降低 19.56% 和 33.86%, 单播牧草 ADF 和 NDF 分别降低 21.29% 和 25.53%。(3)随着灌水量的增加, IWUE 和 WUE 减小, PFP_N 增大; 增加施氮量, 混播模式 IWUE、WUE 和 PFP_N 均减小, 单播模式 IWUE 和 PFP_N 减少, WUE 增大。(4)基于主成分分析得出, 混播模式轻度亏水(灌水下限 65% θ_f)高氮量(120 kg/hm²)处理综合得分最高, 为适宜的水氮管理模式。研究结果可为西北干旱半干旱草原区牧草的种植管理提供理论依据。

关键词: 水氮调控; 喷灌; 豆禾混播; 产量; 品质; 主成分分析

中图分类号:S54;S274.3 文献标识码:A 文章编号:1009-2242(2022)02-0322-09

DOI:10.13870/j.cnki.stbcbxb.2022.02.041

Water and Nitrogen Regulation Patterns for Productivity Improvement of *Bromus inermis* and Alfalfa Mixed Grassland

WANG Aixia, MA Yanlin, QI Guangping, KANG Yanxia, YIN Minhua,

WANG Jinghai, JIA Qiong, TANG Zhongxia, JIANG Yuanbo

(College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070)

Abstract: In response to the problems of natural grassland degradation, serious soil erosion, and low productivity of artificial grassland in arid steppe region of Northwest China, effects of planting patterns, water and nitrogen regulation on forage yield, quality and water and nitrogen use efficiency were investigated in order to obtain a high-yielding and high efficiency grassland management pattern. In this study, triennial alfalfa and *Bromus inermis* (sown in 2018) were used as experimental materials to analyze planting patterns (mixed alfalfa and *B. inermis*, unicast *B. inermis*; namely D1, D2), the amount of nitrogen application (N 60 kg/hm², 120 kg/hm²; namely N1, N2), and irrigation water gradient (calculated by the percentage of irrigation water limit to the field water holding capacity, light deficit 65% θ_f , moderate deficit 55% θ_f , severe deficit 45% θ_f , recorded as W1, W2, W3, the upper limit of irrigation is 85% θ_f) on forage yield, quality and water and nitrogen use efficiency. The results showed that: (1) Increasing irrigation amount and nitrogen application rate was beneficial to the growth of plant height and stem diameter. Compared with

收稿日期:2021-09-13
资助项目:国家重点研发计划项目(2016YFC0400306);甘肃省高校创新基金项目(2020B-131);甘肃省教育厅产业支撑计划项目(2021CYZC-20);甘肃农业大学盛彤笙创新基金项目(GSAU-STS-2021-18);甘肃农业大学水利水电工程学院青年教师科技创新基金项目(SLXY-QN-2019-05)
第一作者:汪爱霞(1994—),女,在读硕士研究生,主要从事节水灌溉与农业生态研究。E-mail:2807680900@qq.com
通信作者:齐广平(1969—),男,教授,博士生导师,主要从事节水灌溉与农业生态研究。E-mail:qiqp@gsau.edu.cn

W3N1 treatment, the average plant height of mixed alfalfa and *B. inermis*, unicast *B. inermis* increased by 27.41% and 20.26%, 26.55%, and stem diameter increased by 11.32% and 4.11%, 20.98% under W1N2 treatment, and mixed forage had a promoting effect on *B. inermis* plant height and a suppressing effect on stem diameter. (2) The increase of irrigation amount and nitrogen application rate was beneficial to improve the forage yield and quality. The annual yield and crude protein (CP) content of forage under W1N2 treatment were the highest, and compared with W3N1 treatment, the annual yield and CP content of mixed forage increased by 42.16% and 27.00%, and unicast forage increased by 38.59% and 37.26%. Respectively, ADF and NDF of mixed forage decreased by 19.56% and 33.86%, and unicast forage decreased by 21.29% and 25.53%. (3) With the increase of irrigation amount, IWUE and WUE decreased, while PFP_N increased. With the increase of nitrogen application rate, IWUE, WUE and PFP_N decreased in mixed forage, while IWUE and PFP_N decreased and WUE increased in unicast forage. Based on the principal component analysis, the highest combined score of light deficit (irrigation lower limit: 65% θ_f) and high nitrogen (120 kg/hm²) was obtained in the mixed forage, which was a suitable water and nitrogen management pattern in the region. This result can provide a theoretical basis for forage planting management in arid and semi-arid grassland region of Northwest China.

Keywords: water and nitrogen regulation; sprinkling irrigation; bean and grass mixed sowing; yield; quality; principal component analysis

我国六大牧区集中在西北地区,草原面积约占全国草原的 75%^[1],近年来该区域畜牧业发展迅速,草畜矛盾日渐突出^[2],传统的天然草地已经不能满足现代化畜牧业的发展^[3]。人工草地的建植可缓解天然草地退化带来的放牧压力,使供不应求的退化草地得以休养生息,同时可协调草地利用在时间和空间上的不平衡,有效缓解草畜矛盾。因此,建植人工草地成为现代化畜牧业生产体系中不可或缺的一部分,人工草地的牧草种类主要以豆科与禾本科牧草混播为主。紫花苜蓿(*Medicago sativa* L.)作为一种抗逆性强、高产、优质的豆科牧草,在我国大多数牧区被广泛种植^[4-5]。无芒雀麦(*Bromus inermis* Layss.)生命力强、饲口性好、营养丰富,是我国温带和寒温带建造人工草地的优质草种^[6]。苜蓿与无芒雀麦混播产量品质都优于其单播牧草^[7-8],可以为家禽家畜提供优质的干草饲料和放牧草场^[9],从而为畜牧业的可持续发展提供有力保障。此外,紫花苜蓿和无芒雀麦根系发达,叶量丰富,植被覆盖率高,可有效缓解该地区风力侵蚀造成的水土流失问题。

水分和养分是豆禾混播草地发展的主要限制因子,但我国西北地区水资源匮乏、土壤贫瘠,传统的灌水和施肥模式造成大量水氮资源浪费。此外,农业农村部于 2020 年提出了“一控、二减”节水节肥节药的要求,并提出在 2030 年实现化肥农药零增长以及灌溉水有效利用系数为 0.6 的宏观目标,因此,在该地区进行合理的水肥调控具有重要意义。水分亏缺在限制牧草生长的同时还影响土壤微生物的生长发育^[10],灌水量过高降低粗蛋白含量,增大牧草纤维含

量^[11],可见,适宜的灌水量有利于旱区牧草的生长。氮素作为作物生长的基础养分,能有效提高牧草生产力和品质^[12]。目前,对旱区牧草的研究集中于水氮等各单项因子对牧草生理生长、产量、品质、光合作用和水氮利用效率的影响,水氮双因子协同调控的研究集中在玉米、小麦、蔬菜等方面,而对于牧草生产等方面的研究较少。

河西走廊地区降水稀少,光热资源丰富,气温日变化偏大,有利于作物物质的积累,被称为“西北粮仓”,且畜牧业发达,但近几年草原退化问题严峻^[13],对该区域的畜牧业产生一定的威胁,如何在节水节肥条件下提高牧草生产力成为研究的重点。本研究通过大田试验,分别针对无芒雀麦单播和无芒雀麦与苜蓿混播,分析水氮供应对牧草生长特性、品质、灌溉水利用效率(IWUE)、水分利用效率(WUE)和氮肥偏生产力(PFP_N)的影响,并通过主成分分析得出最优的种植与水氮管理模式,以期对豆禾混播人工草地的建立提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

于 2020 年 5—10 月在甘肃省张掖市肃南裕固族自治县明花乡(98°49′50″E, 38°40′36″N)试验站进行。区域内海拔 1 368 m,年均日照时间 3 034 h,多年平均降水量 90 mm,蒸发量 1 731 mm,年平均气温 7.3 ℃,无霜期 131 天。气象数据(图 1)由小型智慧型农业气象站测定。试验地土壤质地为砂壤土,田间持水量为 33.0%(体积含水率),0—100 cm 土层土

壤平均容重为 1.44 g/cm³,全氮含量 0.21 g/kg,速效钾含量 0.17 g/kg,速效磷含量 3.16 mg/kg,pH 为 7.4。

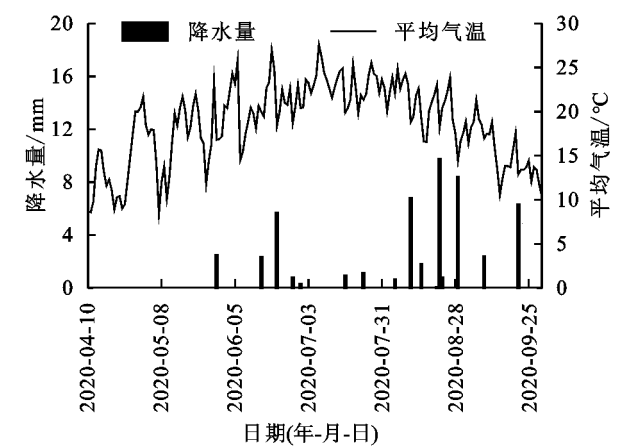


图 1 2020 年 4—10 月降水量和平均气温分布

1.2 试验设计

供试苜蓿品种为“清水紫花苜蓿”(简称苜蓿),无芒雀麦品种为“卡尔顿无芒雀麦”,由甘肃农业大学草业学院提供。本研究中牧草(苜蓿与无芒雀麦)为 3 年生牧草(于 2018 年 5 月播种),灌水方式为喷灌(灌水量由各小区支管上水表控制),喷头为蝶形喷头,由大禹节水公司提供,喷射半径 2~3 m,喷头流量 0.2 m³/h,布置在小区中央,紫花苜蓿和无芒雀麦于 2018 年 5 月播种,播种方式为条播,播深 2 cm,行距 31.25 cm(每个小区 17 行牧草)。小区之间设保护行(图 2),试验小区除草、打药等田间农艺管理措施一致。

参考该地区生产实践以及其他学者研究,确定本试验种植模式、灌水水平和施氮水平 3 个因素,试验设计见表 1。种植模式(图 2)为紫花苜蓿与无芒雀麦同行混播(D1,播种比例 1:1,播种量均为 15 kg/hm²)

和无芒雀麦单播(D2,30 kg/hm²);灌水量以土壤体积含水率(用 TDR 测定)占田间持水率的百分数 θ_f 计,灌水上限均为 85% θ_f ,灌水下限分别为 65% θ_f (W1,轻度亏水)、55% θ_f (W2,中度亏水)和 45% θ_f (W3,重度亏水),在苜蓿(苜蓿和无芒雀麦生育时期不同,以苜蓿生育时期为准)的现蕾期和初花期进行水分调亏,其余生育时期充分灌溉(75%~85% θ_f),计划湿润层 80 cm;供试肥料为尿素 CO(NH₂)₂ (N 的质量分数为 46.4%),第 1 茬在分枝期施肥,第 2 茬和第 3 茬在上茬刈割后施肥,3 茬间施肥比例为 5:3:2,施氮水平为低氮量 60 kg/hm² (N1)、高氮量 120 kg/hm² (N2),共 12 个处理,设 3 个重复,共计 36 个小区,试验小区面积为 25 m² (5 m×5 m),试验采取完全随机区组设计。苜蓿 3 茬均在初花期刈割,无芒雀麦第 1 茬在孕穗期至初花期刈割,第 2 茬在孕穗期刈割,第 3 茬在拔节期后停止生长。

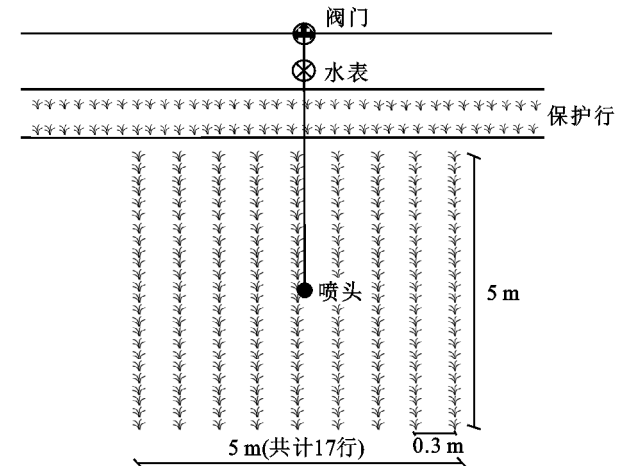


图 2 试验小区布置示意

表 1 试验设计

试验处理	种植模式	灌水下限/%			施氮水平/ (kg·hm ⁻²)
		灌水水平	分枝期	现蕾期	
D1W1N1	混播(D1)	轻度亏水(W1)	75	65	60(N1)
D1W1N2					120(N2)
D1W2N1		中度亏水(W2)	75	55	60(N1)
D1W2N2					120(N2)
D1W3N1		重度亏水(W3)	75	45	60(N1)
D1W3N2					120(N2)
D2W1N1	单播(D2)	轻度亏水(W1)	75	65	60(N1)
D2W1N2					120(N2)
D2W2N1		中度亏水(W2)	75	55	60(N1)
D2W2N2					120(N2)
D2W3N1		重度亏水(W3)	75	45	60(N1)
D2W3N2					120(N2)

1.3 指标测定与方法

1.3.1 株高、茎粗 株高、茎粗测定:在苜蓿分枝期(3 茬分别于 5 月 10 日、7 月 6 日和 8 月 30 日)、现蕾期(5 月 26 日、7 月 18 日和 9 月 15 日)、初花期(6 月

10 日、7 月 31 日和 9 月 28 日)对紫花苜蓿和无芒雀麦的株高茎粗进行测量(测定时间以苜蓿的生育时期为准)。混播草地每个小区分别选取 10 株长势均匀的紫花苜蓿和无芒雀麦进行标记,单播草地选取 10

株长势均匀的无芒雀麦进行标记,从植株底部用卷尺测量株高,用游标卡尺在距地面 5 cm 处测量茎粗,每个生育时期测 1 次,取平均值。

1.3.2 牧草产量、品质

(1)牧草产量。全季牧草均于苜蓿初花期对紫花苜蓿和无芒雀麦的产量进行测定。混播草地每个小区随机选择 1 m² 的样方 2 个,在距地面 5 cm 处刈割,样方 1 将苜蓿和无芒雀麦分开,分别测其鲜重,样方 2 直接测混合鲜重;单播草地每个小区随机选择 1 m² 的样方 1 个,测其鲜重。将所取样品放入烘箱,105 ℃杀青 0.5 h,75 ℃烘 48 h 至恒重,冷却后称其干重,计算干草产量。

(2)牧草品质。将烘干草样粉碎后过 0.4 mm 筛,将混播草地里的混合草样(苜蓿与无芒雀麦)和单播无芒雀麦草样分别称取 0.50 g 进行粗蛋白含量、酸性洗涤纤维和中性洗涤纤维测定。测 3 荏,每荏测 3 个重复,求平均值。

粗蛋白(crude protein,CP,%)的测定:依据国标 GB/T 6432—94,用 H₂SO₄ 消煮法,利用凯氏定氮仪(K1160)测定。

酸性洗涤纤维(acid detergent fiber,ADF,%)和中性洗涤纤维(neutral detergent fiber,NDF,%)的测定:采用 Goering 和 Van Soest 法,用半自动纤维分析仪(F800)测定 ADF 和 NDF。

1.3.3 土壤水分监测

(1)土壤含水率:土壤含水率采用 TDR 每 7 天监测 1 次,灌水和降雨前后加测,用烘干法校核。

(2)耗水量:水量平衡法计算

$$ET = 10 \sum_{i=1}^n (\theta_{i1} - \theta_{i2}) H_i \gamma_i + I + P_0 + K \quad (1)$$

式中: i 为不同土层序号; n 为土层总数; θ_{i1} 和 θ_{i2} 为第 i 层土壤在试验始末的含水率(%); H_i 为第 i 层土层深度(cm); γ_i 为第 i 层干密度(g/cm³); I 为试验开展期间总灌水量(mm); P_0 为试验开展期间有效降水量(mm); K 为地下水补给(忽略不计)。

1.3.4 水氮利用效率

(1)灌溉水利用效率(irrigation water use efficiency,IWUE,kg/m³)

$$IWUE = Y/I \quad (2)$$

式中: Y 为牧草产量(kg/hm²); I 为灌水量(m³/hm²)。

(2)水分利用效率(water use efficiency,WUE,kg/m³)

$$WUE = Y/ET \quad (3)$$

式中: Y 为牧草产量(kg/hm²); ET 为耗水量(m³/hm²)。

(3)氮肥偏生产力(nitrogen partial factor productivity,PPF_N,kg/kg)

$$PPF_N = Y/F \quad (4)$$

式中: Y 为牧草产量(kg/hm²); F 为施氮量(kg/hm²)。

1.4 数据分析

试验数据采用 Microsoft Excel 2019 进行计算,Origin 9.0 软件作图,SPSS Statistics 24 软件进行方差分析和主成分分析。

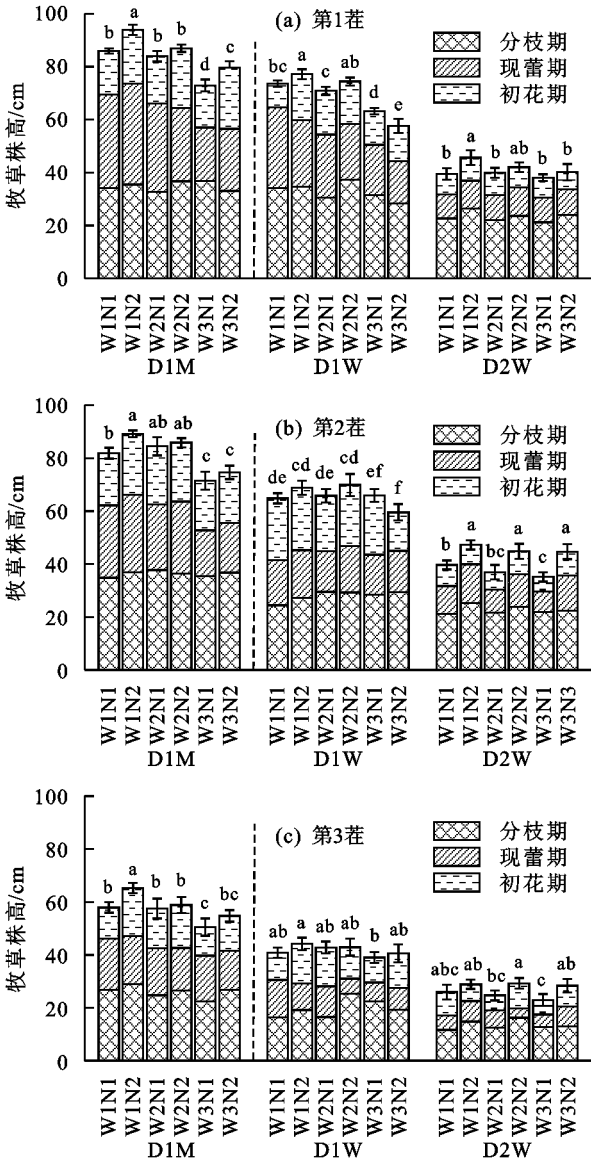
2 结果与分析

2.1 水氮调控及种植模式对牧草生长特性的影响

2.1.1 水氮调控及种植模式对牧草株高的影响 由图 3 可知,种植模式、灌水量和施氮量对牧草株高的影响显著($P < 0.05$)。第 2 荏较第 1 荏混播苜蓿、混播无芒雀麦和单播无芒雀麦株高分别降低 3.25%,7.70%和 1.29%;第 3 荏较第 1 荏混播苜蓿、混播无芒雀麦和单播无芒雀麦株高分别降低 31.52%,34.80%和 39.91%。可见,光热资源不充足可导致牧草株高生长滞缓。灌水量相同时,N2 较 N1 处理混播苜蓿、混播无芒雀麦和单播无芒雀麦 3 荏平均株高分别增加 6.55%,2.12%和 15.91%;施氮量相同时,W1 较 W2 处理混播苜蓿、混播无芒雀麦和单播无芒雀麦 3 荏平均株高分别增加 3.59%,1.25%和 4.16%,W1 较 W3 处理混播苜蓿、混播无芒雀麦和单播无芒雀麦 3 荏平均株高分别增加 17.39%,13.41%和 8.31%。由此可知,适当增加水氮有利于牧草株高的生长,与 W3N1 处理相比,W1N2 处理下混播苜蓿、混播无芒雀麦和单播无芒雀麦 3 荏平均株高分别增加 27.41%,20.26%和 26.55%。灌水量和施氮量相同时,D1 较 D2 处理无芒雀麦 3 荏平均株高增加 62.40%。不同生育时期牧草株高的增幅不同,分枝期增幅最大,现蕾期和初花期牧草株高日增长量降低,随着亏水程度的加剧,牧草株高的增幅减少。综上可知,施氮和灌水均能促进牧草株高生长,混播较单播有利于促进无芒雀麦的生长。

2.1.2 水氮调控及种植模式对牧草茎粗的影响 由图 4 可知,种植模式、灌水量和施氮量对牧草茎粗的影响达到显著水平($P < 0.05$)。第 2 荏较第 1 荏混播苜蓿与无芒雀麦茎粗分别减小 14.06%和 14.55%,单播无芒雀麦茎粗减小 8.59%;第 3 荏较第 1 荏混播苜蓿与无芒雀麦茎粗分别减小 28.11%和 29.05%,单播无芒雀麦茎粗减小 17.15%。可见,光热资源不充足不利于牧草茎粗的生长。灌水量相同时,N2 较 N1 处理混播苜蓿、混播无芒雀麦和单播无芒雀麦 3 荏平均茎粗分别增加 4.24%,3.35%和 5.79%。施氮量相同时,W1 较 W2 处理混播苜蓿、混播无芒雀麦和单播无芒雀麦 3 荏平均茎粗分别增加 5.33%,2.15%和

6.67%，W1 较 W3 处理混播苜蓿、混播无芒雀麦和单播无芒雀麦 3 茬平均茎粗分别增加 6.65%，3.07%和 15.14%。由此可知，适宜的水氮有利于牧草茎粗的生长，与 W3N1 处理相比，W1N2 处理下混播苜蓿、混播无芒雀麦和单播无芒雀麦 3 茬平均茎粗分别增加 11.32%，4.11%和 20.98%。灌水量和施氮量相同时，D1 较 D2 处理无芒雀麦 3 茬平均茎粗减小 11.27%。不同生育时期，牧草茎粗的增幅不同，分枝期增幅最大；现蕾期和初花期牧草茎粗日增长量降低，随着亏水程度的加剧，牧草茎粗的增幅相应减少，表明施氮和灌水均能促进苜蓿和无芒雀麦茎粗的生长，混播在一定程度上抑制无芒雀麦茎粗的生长。



注：W1、W2、W3 分别表示轻度亏水、中度亏水、重度亏水；N1、N2 分别表示低氮、高氮量；D1M 表示混播苜蓿，D1W 表示混播无芒雀麦，D2W 表示单播无芒雀麦，不同小写字母表示不同处理下的差异显著 ($P < 0.05$)。下同。

图 3 水氮调控及种植模式对不同牧草生育期株高的影响

2.2 水氮调控及种植模式对牧草产量和品质的影响

2.2.1 水氮调控及种植模式对牧草产量的影响 由

图 5 可知，第 2 茬、第 3 茬较第 1 茬混播和单播牧草产量分别降低 6.85%，41.93%和 8.37%，72.01% ($P < 0.05$)。在第 1 茬牧草中，灌水量相同时，N2 较 N1 处理混播牧草产量提高 12.31%，单播牧草产量提高 9.67%。施氮量相同时，W1 较 W2 处理混播和单播牧草产量分别增加 6.7%和 10.53%；W1 较 W3 处理混播和单播牧草产量分别提高 24.6%和 21.93% ($P < 0.05$)。第 2 茬产量、第 3 茬产量和年产量随灌水量和施氮量的变化与第 1 茬牧草基本一致。对于牧草年总产量，混播牧草较单播牧草提高 111.51%。施氮量相同时，混播牧草 W1N2 较 W2N1 和 W3N1 处理产量分别提高 21.07%和 42.16%，单播牧草 W1N2 较 W2N1 和 W3N1 处理产量分别提高 21.84%和 38.59% ($P < 0.05$)，且混播和单播牧草均在轻度亏水高氮量处理下获得最大年产量，分别为 26 050.73，12 186.10 kg/hm²，说明混播模式下适量添加灌水量和施氮量有利于牧草产量的累积。

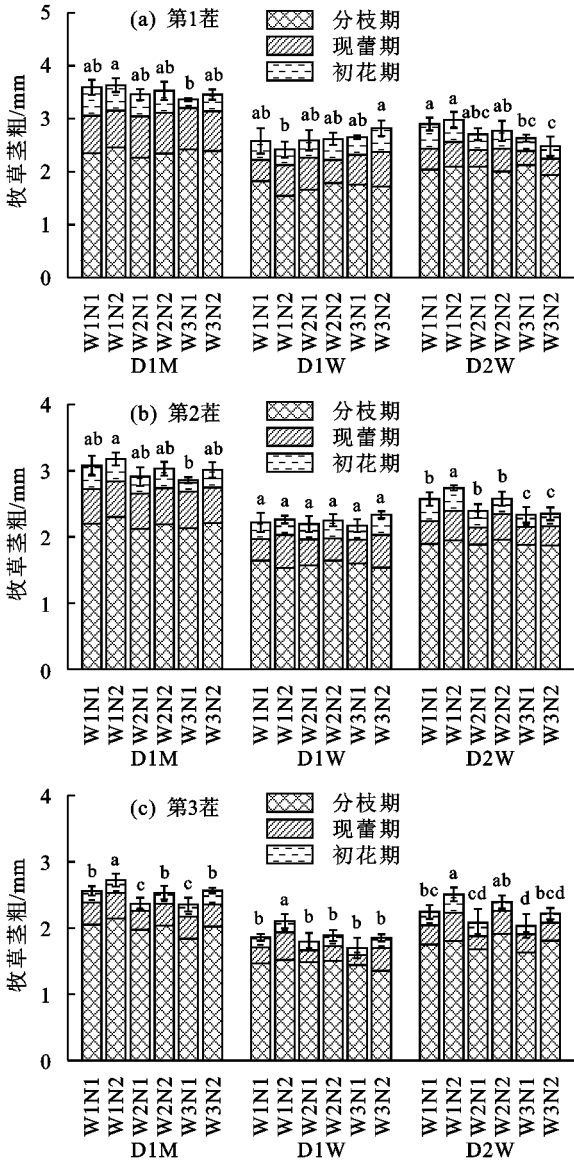


图 4 水氮调控及种植模式对不同牧草生育期茎粗的影响

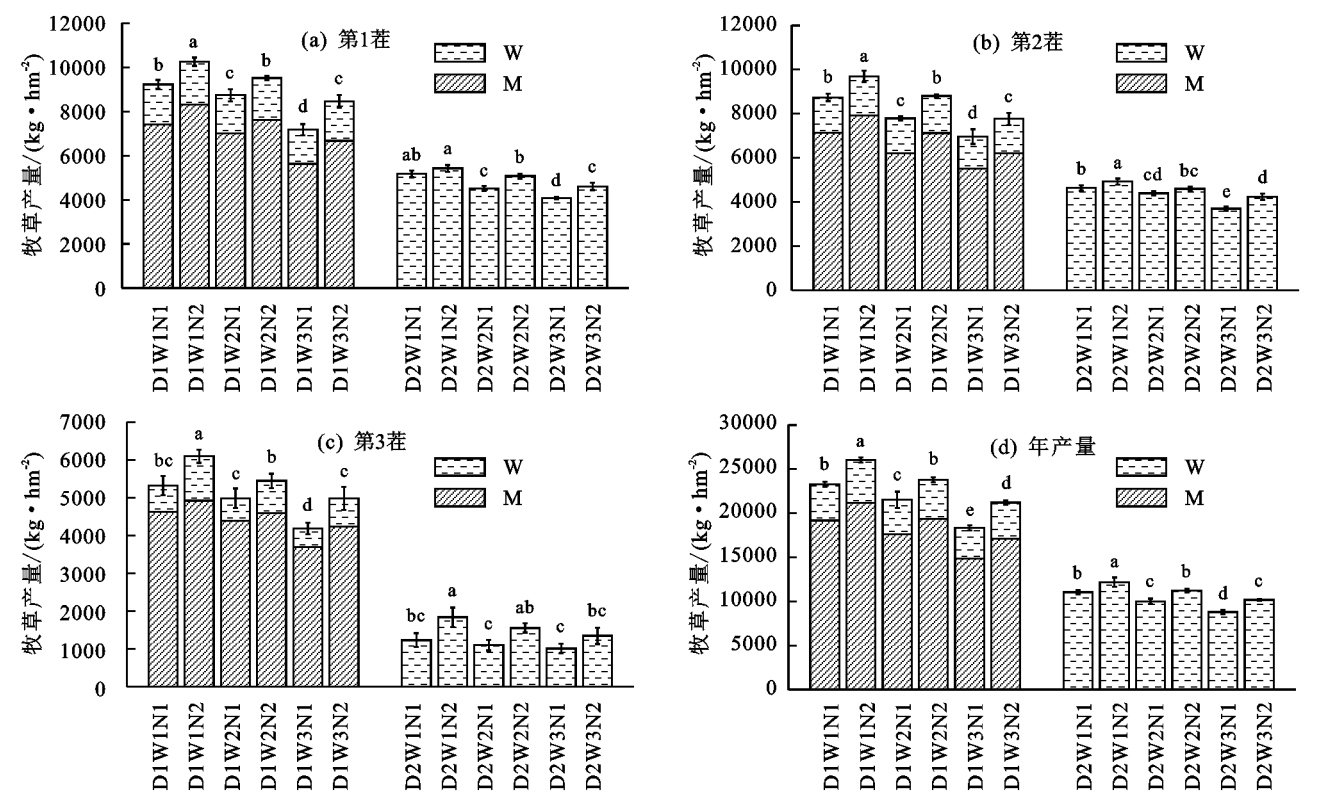


图5 水氮调控及种植模式对牧草产量的影响

2.2.2 水氮调控及种植模式对牧草品质的影响 水氮调控及种植模式对牧草粗蛋白含量(CP)、酸性洗涤纤维(ADF)和中性洗涤纤维(NDF)的影响见表2。由表2可知,混播牧草CP、ADF和NDF显著大于单播牧草,灌水量对牧草CP、ADF和NDF的影响极显著($P<0.01$),施氮量对其影响显著($P<0.05$),交互作用对其影响不显著($P>0.05$)。混播牧草在W1N2处理下牧草CP最高,达到21.40%,W3N1处理下牧草CP最低,与W1N2处理相比降低27.00%。单播牧草W1N2处理下牧草CP最高,达到16.43%,

W3N1处理下牧草CP最低,与W1N2处理相比降低37.26%。牧草ADF和NDF是反映牧草品质的重要指标之一,其值过高,会导致饲料中碳水化合物以及能量的缺乏,反之,牧草的营养价值更佳。混播牧草W1N2处理下牧草ADF和NDF最低,分别为30.77%和38.70%,与W3N1相比,分别降低19.56%和33.86%;单播牧草W1N2处理下ADF和NDF最低,分别为24.38%和32.84%,与W3N1相比,分别降低21.29%和25.53%,说明适当增加水氮施用量能改善牧草品质。

表2 水氮调控及种植模式对牧草品质的影响

单位:%

处理	粗蛋白 含量(CP)	酸性洗涤 纤维含量(ADF)	中性洗涤 纤维含量(NDF)	处理	粗蛋白 含量(CP)	酸性洗涤 纤维含量(ADF)	中性洗涤 纤维含量(NDF)
D1W1N1	19.00±1.44ab	31.57±2.20cd	41.10±1.35cd	D2W1N1	13.73±0.57bc	28.83±3.02c	36.43±2.45c
D1W1N2	21.40±1.85a	30.77±0.93d	38.70±1.40d	D2W1N2	16.43±0.44a	24.38±2.20d	32.84±1.62d
D1W2N1	17.82±2.31bc	34.23±0.91bc	45.81±2.83ab	D2W2N1	11.92±0.72bcd	33.60±1.62ab	40.58±1.52b
D1W2N2	19.47±0.87ab	33.58±2.14bcd	43.80±3.22bc	D2W2N2	13.86±0.78b	27.91±2.20c	37.53±1.67c
D1W3N1	15.62±0.40c	38.25±2.61a	49.11±1.36a	D2W3N1	10.31±0.52d	36.86±0.81a	44.10±1.84a
D1W3N2	16.84±1.29bc	36.61±1.20ab	47.33±1.88ab	D2W3N2	11.63±0.84cd	32.93±0.50b	41.46±0.86ab
灌水量 W	**	**	**	灌水量 W	**	**	**
施氮量 N	*	ns	*	施氮量 N	**	**	*
W×N	ns	ns	ns	W×N	ns	ns	ns

注:表中数据为平均值±标准差; **表示存在极显著性差异($P<0.01$); *表示存在显著性差异($P<0.05$); ns表示无显著性差异($P>0.05$)。下同。

2.3 水氮调控及种植模式对牧草水氮利用效率的影响

由表3可知,灌水量和耗水量均随着亏水程度加剧逐渐减小,单播较混播灌水总量和耗水总量分别减

少12.31%和10.98%,可见,单播牧草的耗水强度小于混播。混播较单播牧草IWUE、WUE和PFP_N分别显著提高87.38%,88.71%和112.97%,灌水量和

施氮量对牧草 IWUE、WUE 和 PFP_N 的影响极显著 ($P<0.01$),其交互作用对牧草 IWUE 和 WUE 的影响不显著 ($P>0.05$),对牧草 PFP_N 的影响极显著 ($P<0.01$)。施氮量相同时,随着灌水量的增加,IWUE 和 WUE 减小,PFP_N 增大,混播模式下,W1 较 W3 处理 IWUE、WUE 减少 5.41%和 5.33%,PFP_N 增加 25.51%;单播模式下,W1 较 W3 处理 IWUE 和 WUE 分别减少 2.70%和 6.61%,PFP_N 增加 23.35%。灌水量相同时,随着施氮量的增加,在混播模式下,IWUE、WUE

和 PFP_N 均减小,N2 较 N1 处理 IWUE、WUE 和 PFP_N 分别减少 6.10%,4.15%和 44.33%;单播模式下,N2 较 N1 处理 IWUE 和 PFP_N 分别减少 7.25%和 43.69%,WUE 增加 2.71%。混播和单播牧草在 W2N1 处理下 IWUE 最大,分别为 5.66,2.89 kg/m³,W1N1 处理牧草 PFP_N 最大,分别为 388.03,183.94 kg/kg,W3N2 处理 WUE 最大,分别为 4.41,2.37 kg/m³。表明高灌水量降低牧草的 WUE 和 IWUE,高氮量降低牧草的 PFP_N。

表 3 水氮调控及种植模式对牧草水氮利用效率的影响

处理	灌水量/ (m ³ · hm ⁻²)	灌溉水利用效率/ (kg · m ⁻³)	耗水量/ (m ³ · hm ⁻²)	水分利用效率/ (kg · m ⁻³)	氮肥偏生产力/ (kg · kg ⁻¹)
D1W1N1	4532.12±210.58b	5.14±0.04c	5421.25±111.09c	4.29±0.06b	388.03±4.99a
D1W1N2	5407.62±163.73a	4.82±0.05d	6436.56±106.61a	4.05±0.04d	217.09±2.40d
D1W2N1	3916.30±151.52c	5.66±0.24a	4910.24±148.73d	4.38±0.10ab	369.74±15.35b
D1W2N2	4516.31±99.06b	5.26±0.06bc	5698.65±104.68b	4.17±0.01c	198.11±2.44e
D1W3N1	3549.75±116.71d	5.37±0.07b	4090.63±94.12e	4.40±0.06a	305.41±4.87c
D1W3N2	3949.71±79.19c	5.16±0.08bc	4805.14±191.92d	4.41±0.04a	275.85±2.28f
灌水量 W	—	* *	* *	* *	* *
施氮量 N	—	* *	* *	* *	* *
W×N	—	* *	ns	ns	* *
D2W1N1	4025.50±149.38b	2.83±0.05a	5055.53±112.60b	2.18±0.05c	183.94±3.96a
D2W1N2	4257.48±53.24a	2.57±0.08ab	5514.15±123.11a	2.20±0.10c	101.55±4.29d
D2W2N1	3722.36±112.25c	2.89±0.03 a	4482.06±74.28bcd	2.23±0.07bc	166.69±5.16b
D2W2N2	3957.42±121.45b	2.74±0.06ab	4702.77±91.86c	2.33±0.04ab	93.49±1.58de
D2W3N1	3199.67±100.86d	2.86±0.07a	3878.85±170.21e	2.32±0.07ab	146.54±4.46c
D2W3N2	3525.37±154.58c	2.69±0.08b	4284.23±240.71d	2.37±0.03a	84.90±0.94e
灌水量 W	—	* *	* *	* *	* *
施氮量 N	—	ns	* *	*	* *
W×N	—	ns	ns	ns	* *

2.4 主成分分析

由于牧草的单项指标不能全面反映牧草品质和产量的优劣,故对牧草粗蛋白含量(CP)、酸性洗涤纤维(ADF)、中性洗涤纤维(NDF)、产量(Y)、灌溉水利用效率(IWUE)、水分利用效率(WUE)和氮肥偏生产力(PFP_N)进行数据归一化处理,采用主成分分析法对 7 个指标进行降维数学统计分析(表 4、表 5)。主成分分析后提取的 2 个主成分特征值>1,累积贡献率达到 90.045%,表明这 2 个主成分包含 7 个指标的主要信息。主成分 1 包含总变异信息的 64.636%,反映 CP、Y、IWUE 和 WUE 4 个指标的影响,主成分 2 解释原始信息的 25.409%,主要以 ADF 和 NDF 的影响为主。主成分综合得分和综合排序(表 5)得出,最优处理为 D1W1N2,最劣处理为 D2W3N1。不同灌水量处理下,W1 的综合得分大于 W2 和 W3;不同施氮量处理下,N1 的综合得分大于 N2;不同种植模式下,混播的综合得分大于单播。表明混播模式下轻

度亏水较高氮量是当地适宜的水氮施用量。

表 4 主成分因子荷载与方差贡献率

成分	因子荷载	
	主成分 1	主成分 2
CP	0.800	0.580
ADF	−0.439	0.875
NDF	−0.598	0.784
Y	0.943	0.273
IWUE	0.987	−0.031
WUE	0.974	0.127
PFP _N	0.667	−0.182
特征值	4.843	1.906
方差贡献率/%	64.636	25.409
累积贡献率/%	64.636	90.045

3 讨论

3.1 水氮调控及种植模式对牧草生长特性的影响
牧草生长发育与其干草产量和品质密切相关^[14],牧草属营养体作物,其产量即为所有地上部分

生物量,牧草株高、茎粗等生长指标与其产量呈正相关关系^[15]。适宜施氮量能促进作物根系吸水能力以及根系活性,土壤养分主要通过扩散作用或质流作用被根系截获。适宜的土壤水分有利于土壤中离子的扩散,从而促进作物吸收土壤养分及株高、茎粗、叶片等生长^[16]。此外,叶片中富含粗蛋白、粗脂肪以及碳水化合物^[17],生长指标的提高尤其是叶片重量的提高能够有效改善牧草品质。本研究表明,高的施氮量和灌水量均能促进苜蓿和无芒雀麦株高、茎粗的生长。这与高文瑞等^[18]的研究结果相似,即增加基质含水量和一定程度上增加施氮量可以增加植株的株高和茎粗,从而提高植株干鲜重。本试验在牧草再生期和分枝期进行充分灌溉,使得牧草的初期生长不因水分亏缺而受到约束,在现蕾期和初花期对牧草进行不同程度的水分胁迫,这样既能高效节水又能得到高产的牧草。

表 5 不同水氮调控和种植模式下牧草综合评价

处理	综合得分	综合排序	处理	综合得分	综合排序
D1W1N1	0.5326	2	D2W1N1	-0.1984	8
D1W1N2	0.5766	1	D2W1N2	-0.0202	7
D1W2N1	0.3580	4	D2W2N1	-0.4336	10
D1W2N2	0.3725	3	D2W2N2	-0.2546	9
D1W3N1	0.0317	6	D2W3N1	-0.6372	12
D1W3N2	0.1758	5	D2W3N2	-0.5032	11

本试验中,与单播比较,混播促进无芒雀麦株高的生长,一定程度上抑制无芒雀麦茎粗的生长。这一现象产生的主要原因可能是豆科苜蓿与禾本科无芒雀麦的生物学特性不同,2 种牧草的地下和地上部分出现不同水平的生态位分离,使 2 种牧草之间补偿并协同,促使生态因子(水分、肥料、空气、热量、光照和空间)资源利用率达到最佳^[7]。此外,混播草地中,苜蓿因根系发达,其根系吸收大多数的水分和养分,使得无芒雀麦茎粗的生长受到一定的抑制,从而使混播中的茎粗略小于单播。同时,无芒雀麦为了与苜蓿竞争水分、养分和充足的光热资源,其株高随着苜蓿株高的增加而相应增加,因而混播中无芒雀麦的株高显著高于单播。

3.2 水氮调控及种植模式对牧草产量和品质的影响

适宜的施氮量和灌水量是保证牧草高产的关键因素,成自勇^[19]研究表明,再生期和分枝期(分蘖期)是牧草对干旱和水分胁迫最敏感的时期,这一时期的水分胁迫严重影响最终的牧草产量。本试验表明,随着灌水量和施氮量的增加,牧草的产量随之增加,这与王振华等^[20]研究结果一致。混播牧草与单播牧草相较,混播牧草具有高产、稳产等优点,产草量可提高 14.0%~25.0%^[21]。本试验研究结果显示,混播牧草的产量显著高于单播牧草,这与汪精海等^[22]研究结果一致。主要原因是苜蓿有固氮作用,与无芒雀麦混播后通过共生菌所固定的氮一部分被无芒雀麦所利

用,促进无芒雀麦的生长;同时,混播草地中豆科苜蓿根系发达,能够吸收深层土壤中的部分水分和养分,满足自身的生长。

牧草品质是衡量牧草营养价值的关键指标,牧草粗蛋白含量越高,酸性洗涤纤维和中性洗涤纤维含量越低,牧草的营养价值和饲口性越好,从而其营养价值更高。毕舒贻^[23]研究得出,高灌水量和施氮量可以提高苜蓿的品质;罗凤敏等^[24]研究得出,合理的水氮施用量能得到品质优良的无芒雀麦,与本试验研究结果相似。其他学者^[25]研究表明,粗蛋白含量与灌水量呈负相关关系,纤维含量与灌水量呈正相关关系,即高灌水量的牧草品质不佳。这与本试验有差异,主要是因为本试验是在灌水的基础上施氮,施氮能提高牧草粗蛋白含量,降低纤维含量。因此,在水氮调控条件下,适宜的水氮施用量可以使牧草的品质更佳。

3.3 水氮调控及种植模式对牧草水氮利用效率的影响

合理的水氮施用量是保证作物高产的关键因子,产量的大小直接影响牧草灌溉水利用效率、水分利用效率和氮肥偏生产力。尹光华等^[26]研究表明,水氮多因子对水分利用效率有交互作用,水氮对水分利用效率体现为正效应。水分亏缺导致土壤气体的扩散受到限制,从而降低作物的养分利用效率和土壤含氧量。本试验研究得出,随着灌水量的增加,牧草氮肥偏生产力增加,但灌溉水利用效率和水分利用效率相应降低,这与王振华等^[20]研究结果一致。水分亏缺约束了牧草的光合作用,使叶片膨胀和光合作用减少,导致光合作用产物相应减少,从而使牧草减产,氮肥偏生产力减小,灌溉水利用效率增大。氮素添加通过降低种群稳定性和种间异质性显著降低生态系统稳定性^[27]。因此,合理控制草原氮素输入可减少氮素流失,降低氮素对环境质量的不利影响。有研究^[28]发现,土壤氮素随着施氮量的增加而增大,在一定程度上提高牧草产量和灌溉水利用效率,但显著减小氮肥偏生产力,造成氮素资源浪费。本试验研究结果得出,较高的施氮量可以提高牧草水分利用效率,但牧草的氮肥偏生产力显著降低。可见,当氮肥施用量过高,氮肥偏生产力显著降低,导致氮素资源浪费严重。

4 结 论

(1)增加灌水量和施氮量有利于提高牧草株高和茎粗,与 W3N1 处理相比,W1N2 处理下混播苜蓿、混播无芒雀麦和单播无芒雀麦 3 茬平均株高分别增加 27.41%,20.26%和 26.55%,茎粗分别增加 11.32%,4.11%和 20.98%;混播对无芒雀麦株高有促进作用,对茎粗有抑制作用,水氮处理相同,混播较单播处理无芒雀麦 3 茬平均株高增加 62.40%,茎粗减小 11.27%。

(2)灌水量和施氮量的增加有利于提高牧草产量和

品质, W1N2 处理牧草年产量最高, 混播为 26 050.73 kg/hm², 单播为 12 186.10 kg/hm², 与 W3N1 处理相比, W1N2 处理下混播和单播牧草年产量分别增加 42.16% 和 38.59%, 牧草 CP3 荏平均提高 27.00% 和 37.26%, 混播牧草 ADF 和 NDF 分别降低 19.56% 和 33.86%, 单播牧草 ADF 和 NDF 分别降低 21.29% 和 25.53%。

(3) 增加灌水量会减小 IWUE 和 WUE, 增大 PFP_N, 混播模式下, W1 较 W3 处理 IWUE 和 WUE 减小 5.41% 和 5.33%, PFP_N 增大 25.51%, 单播模式下, W1 较 W3 处理 IWUE 和 WUE 减少 2.70% 和 6.61%, PFP_N 增加 23.35%。随着施氮量的增加, 在混播模式下, IWUE、WUE 和 PFP_N 均减小, 单播模式下, IWUE 和 PFP_N 减少, WUE 增大。

(4) 基于主成分分析得出, 混播模式下轻度亏水(灌水下限 65% θ_f)高氮量(120 kg/hm²)综合得分最高, 其牧草的株高茎粗、产量、品质、灌溉水利用效率、水分利用效率和氮肥偏生产力可达到有机统一, 是西北干旱与半干旱地区较为合理的牧草种植管理模式。

参考文献:

- [1] 叶哈, 方静, 朱立志, 等. 我国牧区草原生态补偿机制构建研究[J]. 中国农业资源与区划, 2020, 41(12): 202-209.
- [2] 刘敏国, 许瑞, 杨惠敏. 紫花苜蓿的水分响应及灌溉效应[J]. 西南民族大学学报(自然科学版), 2019, 45(1): 16-22.
- [3] 张新时, 唐海萍, 董孝斌, 等. 中国草原的困境及其转型[J]. 科学通报, 2016, 61(2): 165-177.
- [4] Liu M G, Wang Z K, Mu L, et al. Effect of regulated deficit irrigation on alfalfa performance under two irrigation systems in the inland arid area of midwestern China [J]. *Agricultural Water Management*, 2021, 248: e106764.
- [5] 侯晨丽, 田德龙, 徐冰, 等. 不同水盐处理对苜蓿耗水、品质及产量的影响[J]. 水土保持学报, 2019, 33(6): 293-298.
- [6] 常巍, 张则宇, 黄薇, 等. 无芒雀麦农艺性状与产量形成关系的多重分析[J]. 中国草地学报, 2021, 43(4): 13-21.
- [7] 王小军, 曹文侠, 王世林, 等. 河西走廊多年生豆禾混播对牧草产量和品质的影响[J]. 草业科学, 2021, 38(7): 1339-1350.
- [8] Quinby M, Nave R, Sulc M, et al. Comparison of alfalfa mix with tall fescue and Bermuda-grass on forage accumulation, botanical composition, and nutritive value [J]. *Crop Science*, 2021, 61: 3746-3774.
- [9] 辛晓平, 徐丽君, 徐大伟, 等. 中国主要栽培牧草适宜性区划[M]. 北京: 科学出版社, 2015.
- [10] 唐雪娟. 水氮管理对呼伦贝尔人工草地建植影响研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2018.
- [11] Lu J Y, Yang M, Liu M G, et al. Leaf stoichiometry and resorption of N and P in Lucerne at different

growth stages under different water supplies[J]. *Journal of Plant Nutrition*, 2019, 42(5): 501-511.

- [12] 张学梅, 马千虎, 张子龙, 等. 施肥对高寒荒漠草原区混播人工草地产量和水分利用的影响[J]. 中国农业科学, 2019, 52(8): 1368-1379.
- [13] 马黎. 河西走廊绿洲区草产业发展现状及对策[D]. 兰州: 兰州大学, 2017.
- [14] 李泽民, 张晨, 张崇玉, 等. 不同品种苜蓿中营养成分相互关系及生物产量[J]. 中国农业科学, 2020, 53(6): 1269-1277.
- [15] 陈海玲, 徐军, 石凤翎, 等. 苜蓿雄性不育系高产优质杂交组合筛选[J]. 中国草地学报, 2016, 38(1): 7-13.
- [16] 石磊, 王军, 陈云, 等. 化肥减量配施生物菌肥对色素辣椒生长的影响[J]. 新疆农业科学, 2021, 58(5): 854-865.
- [17] 徐鑫磊, 宋彦涛, 赵京东, 等. 施肥和刈割对呼伦贝尔草甸草原牧草品质的影响及其与植物多样性的关系[J]. 草业学报, 2021, 30(7): 1-10.
- [18] 高文瑞, 王欣, 李德翠, 等. 不同水肥组合对辣椒植株生长及养分吸收的影响[J]. 中国农学通报, 2021, 37(9): 49-56.
- [19] 成自勇. 甘肃秦王川灌区苜蓿草地土壤水盐动态及其生态灌溉调控模式研究[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2005.
- [20] 王振华, 陈满洁, 吕德生, 等. 水氮耦合对加气滴灌加工番茄产量及品质的影响[J]. 农业工程学报, 2020, 36(19): 66-75.
- [21] 谢开云, 孟翔, 徐珍珍, 等. 新疆半干旱地区不同种类混播草地的牧草产量和营养价值研究[J]. 草地学报, 2021, 29(8): 1835-1842.
- [22] 汪精海, 李广, 余晓雄, 等. 调亏微喷灌对高寒荒漠区人工草地产量、品质及水分利用的影响[J]. 水土保持学报, 2021, 35(4): 200-207, 216.
- [23] 毕舒怡. 不同水肥组合对苜蓿生产性能和品质的影响[D]. 北京: 中国农业科学院, 2017.
- [24] 罗凤敏, 雷虹娟, 汪季, 等. 水肥调控对无芒雀麦品质的影响[J]. 草业科学, 2014, 31(11): 2135-2140.
- [25] 寇丹, 苏德荣, 吴迪, 等. 地下调亏滴灌对紫花苜蓿耗水、产量和品质的影响[J]. 农业工程学报, 2014, 30(2): 116-123.
- [26] 尹光华, 刘作新, 李桂芳, 等. 水肥耦合对春小麦水分利用效率的影响[J]. 水土保持学报, 2004, 18(6): 156-158, 162.
- [27] Ogle S M, McCarl B, Baker J, et al. Managing the nitrogen cycle to reduce greenhouse gas emissions from crop production and biofuel expansion[J]. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 2016, 21(8): 1197-1212.
- [28] 马彦霞, 张玉鑫, 王晓巍. 河西绿洲区大棚甘蓝产量、品质和养分吸收对不同水肥组合的响应[J]. 水土保持学报, 2018, 32(5): 270-276.