

西北内陆干旱区水分调控对豆禾混播草地群落稳定性的影响及评价

康瑶, 银敏华, 马彦麟, 齐广平, 康燕霞, 姜渊博, 张宏斌

(甘肃农业大学水利水电工程学院, 甘肃 兰州 730070)

摘要:在西北内陆干旱区干旱少雨, 探寻高产节水的草地群落以实现生态环境的稳定。通过2 a (2019和2020年)田间试验, 对比分析了4种水分调控梯度(充分灌溉W0, 75%~85%的田间持水量(FC); 轻度亏水W1, 65%~75% FC; 中度亏水W2, 55%~65% FC; 重度亏水W3, 45%~55% FC)和3种豆禾混播组合(紫花苜蓿+无芒雀麦, A1; 紫花苜蓿+无芒雀麦+长穗偃麦草, A2; 紫花苜蓿+无芒雀麦+长穗偃麦草+草地早熟禾, A3)对群落稳定性的影响。结果表明: 水分调控与混播组合对混播草地组分稳定性无显著影响, 但显著影响混播草地功能稳定性(产量和粗蛋白含量)和种间相容性, 水分调控与混播组合的交互效应对草地的组分稳定性、功能稳定性和种间相容性均无显著影响。综合评价得出, 轻度水分亏缺条件下紫花苜蓿+无芒雀麦+长穗偃麦草混播处理的加权关联度最高, 综合排名最优, 是西北内陆干旱区适宜的豆禾混播组合与灌水管理模式, 该研究可为当地人工草地高效节水可持续生产提供理论基础及技术支持。

关键词:水分调控; 豆禾混播; 群落稳定性; 产量; 综合评价

中图分类号:S812.3 **文献标志码:**A **文章编号:**1009-5500(2022)04-0121-12

DOI:10.13817/j.cnki.cycp.2022.04.016



建植优质高产人工草地可有效缓解天然草地压力, 防止退化, 亦可有效解决冬春饲料匮乏问题, 促进科学放牧制度的建立, 助力退化草地封育改良, 对保障牧草生产力, 促进草畜平衡和维持生态环境具有重要意义^[1-2]。人工草地建植的生态学本质是在人为农作措施下维护开放性的亚稳态生产系统, 它面临的最重要问题是群落稳定性的维持^[3-4]。提高人工草地的群落稳定性不仅是合理有效地建植、利用、管理和改良人工草地的基本依据, 同时也是衡量人工草地质量

的一个重要标准, 是草地长期维持生产力的基础^[5-6]。稳定性是指自然生态系统在受到外力干扰的情况下通过自身调节机制使系统恢复到以前状态的一种能力, 是植物群落结构与功能的一个综合性特征^[7-8]。影响植物群落稳定性的因子较多, 物种多样性被认为是决定性因素之一^[9]。植物多样性与稳定性的关系, 主要包括正相关、负相关和不相关3种模式, 但正相关模式的认可度更高, 其核心理论认为生态系统越简单越不稳定, 主要是因为物种多样性越高, 生态系统抵抗外界干扰因子能力越强, 植物群落越稳定; 但不能一概而论, 冗余种的缺失虽降低了多样性, 但不会影响稳定性, 而取决于群落中物种的作用和地位, 且这种作用和地位随外界干扰、环境压力、种间相容性的改变而发生变化^[10-11]。研究表明, 适宜的物种种类可减少种间竞争, 提高对环境资源的利用能力, 进而提高种间相容性, 但适宜牧草种类的确定需依据环境时空异质性而定^[12-13]。环境压力也是人工草地群落稳定性调控的一种途径, 可通过灌水和施肥等方式改变

收稿日期:2021-01-12; **修回日期:**2021-04-06

基金项目:国家重点研发计划(2016YFC0400306); 甘肃省高等学校创新能力提升项目(2019A-57); 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(SLSDXY-QN201905)

作者简介:康瑶(1996-), 女, 甘肃定西人, 硕士研究生。

Email:kangy0223@163.com

齐广平为通信作者。Email:qigp@sau.edu.cn

环境压力进而影响群落稳定性,适宜的施肥量和灌水量可提高草地的生产力和稳定性,但适宜的施肥量和灌水量的阈值还未有定论^[13-14]。内陆干旱草原区因气候干旱、降水量少、蒸发量大、水资源匮乏、土壤贫瘠,人工草地建植草种筛选不理想、环境压力大、稳定性差等问题较为突出,因此选育适宜于内陆干旱草原区的牧草种类以及营造适宜于牧草生长的环境,是生态学和草学研究领域关注的重要内容^[15]。

混播人工草地能较充分地利用空间,增加光能、二氧化碳、土壤水分及养分的利用率,而且可以延长土地使用寿命,增强对恶劣环境的抵抗力^[16-18]。豆科牧草具有较高的产量和蛋白含量,且可进行生物固氮,禾本科牧草碳水化合物含量丰富,豆禾混播人工草地以其较高的生产力、较好的适口性和较高的营养价值受到世界许多地区人们的重视^[19]。研究发现,通过利用苜蓿高蛋白、耐盐碱、耐贫瘠等特点,和禾本科牧草混播,可以提高牧草的蛋白含量,均衡营养,减小牛羊等动物患膨胀病的几率,还可以提高水、土、光、热等资源的利用率^[17,20-21]。并可在关键时期通过灌溉的方式缓解牧草因受旱而造成的减产或死亡,提高人工草地的建植成功率以及生产力^[22]。但适宜耐旱区

域且具有较高稳定性的豆禾牧草种类以及适宜的环境压力的确定是豆禾混播人工草地亟待解决的关键问题^[23]。因此,本研究通过对建植第3年和第4年的豆禾混播人工草地进行水分调控,研究水分调控在组分、功能稳定性及种间相容性3个方面对群落稳定性的影响,采用灰色关联度法对各指标进行综合评价,确定稳定性较优的水分调控及混播组合,以期为实现西北内陆干旱区人工草地高效节水可持续生产提供理论基础及技术支持。

1 材料和方法

1.1 试验地概况

试验点位于甘肃省张掖市肃南裕固族自治县明花乡前滩村,地理坐标E 98°30',N 39°40',区内平均海拔1 386 m。试验区气候干燥,年均降水量84 mm,年平均蒸发量2 145 mm,年平均气温6.3℃,全年日照时数3 024 h,无霜期135 d,属温带大陆型气候^[21]。试验地土壤为砂壤土,土壤容重为1.4 g/cm³,田间持水量29.68%,pH值7.25,全氮、铵态氮、速效磷含量分别为0.18 g/kg、7.26 mg/kg、3.19 mg/kg,电导率2.49 mS/cm。气象数据由试验地农业气象站测定(图1)。

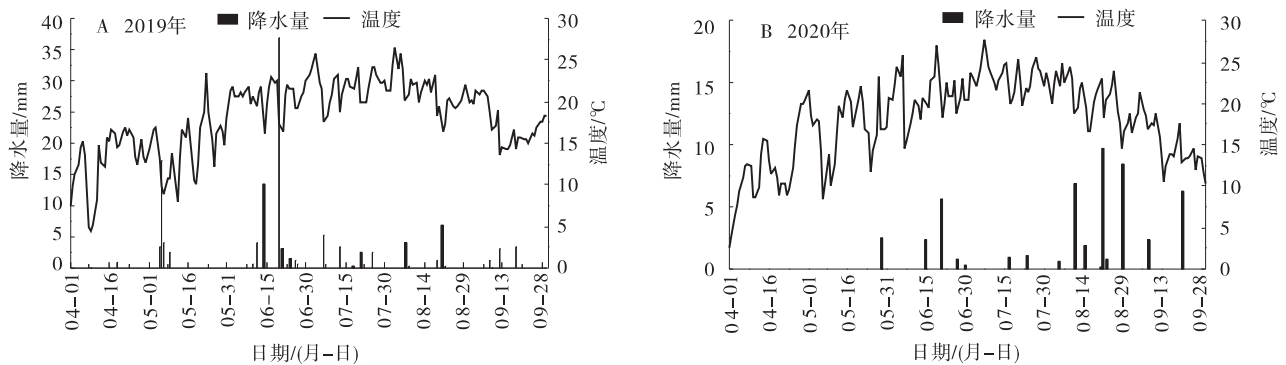


图1 2019年和2020年试验期间降水量和平均气温

Fig. 1 Rainfall and average temperature during the 2019 and 2020 trials

1.2 试验设计

供试草种以当地种植面积最广的紫花苜蓿(*Medicago sativa*)为基础,依次添加不同禾草进行组合,试验为双因素完全随机区组设计,a因素为混播组合(a=3),分别设2种牧草混播(A1)、3种牧草混播(A2)、4种牧草混播(A3);b因素为水分调控梯度(b=4),分别为充分灌溉(W0)、轻度水分亏缺(W1)、中度水分亏缺(W2)、重度水分亏缺(W3);参试的4种牧草

各设单播(仅作为种间相容性研究),3次重复,共84个小区,具体试验处理如表1所示。小区面积均为5 m×5 m,各小区间设1 m的隔离过道。于2017年5月按1:1的混播比例进行条播,行距为30 cm,播量为35 kg/hm²。灌水采用微喷灌,喷灌直径2~4 m,灌水量由各试验小区前布设的水表控制(精度为0.000 1 m³)。本试验数据取自建植第3年至第4年(2019~2020年),每年刈割3次,每茬于初花期进行刈割,从建

植第3年第2茬起开始试验,2019年第1茬,为保证牧草正常返青,对所有试验小区进行充分灌水,以确保开始水分调控前各小区土壤水分达到试验设计起始

水平,通过2年5茬的试验,研究群落稳定性随着时间的变化规律。试验期间施肥、除草等田间管理各小区保持一致。

表1 豆禾混播草地水分调控梯度及群落配置

Table 1 Water regulation gradients and community arrangements of bean-grain mixed seeding grassland

编号	水分处理	混播组合
W0A1	充分灌溉(75%~85% FC)	紫花苜蓿+无芒雀麦
W1A1	轻度亏水(65%~75% FC)	
W2A1	中度亏水(55%~65% FC)	
W3A1	重度亏水(45%~55% FC)	
W0A2	充分灌溉(75%~85% FC)	紫花苜蓿+无芒雀麦+长穗偃麦草
W1A2	轻度亏水(65%~75% FC)	
W2A2	中度亏水(55%~65% FC)	
W3A2	重度亏水(45%~55% FC)	
W0A3	充分灌溉(75%~85% FC)	紫花苜蓿+无芒雀麦+长穗偃麦草+草地早熟禾
W1A3	轻度亏水(65%~75% FC)	
W2A3	中度亏水(55%~65% FC)	
W3A3	重度亏水(45%~55% FC)	

注:FC为田间持水量

1.3 指标测定

产量测定:分别于每一茬牧草初花期,采用1 m×1 m的样方,留茬2 cm进行刈割并分成两部分,一部分称取鲜重,另一部分将各草种分开,并分别称取鲜重,然后放入烘箱105℃杀青1 h,65℃烘24 h至恒重,并分别称取干重,折算干草产量^[21]。

品质测定:利用各茬次初花期所取烘干后的混合草样,粉碎过筛后测定品质。粗蛋白含量(CP)利用K1160全自动凯氏定氮仪进行测定,中性洗涤纤维含量(NDF)和酸性洗涤纤维含量(ADF)采用Van Soest法通过半自动纤维分析仪(F800)测定^[21]。

$$\text{相对产量总和}^{[3]}: RYT = \frac{Y_{ij}}{Y_{ii}} + \frac{Y_{ji}}{Y_{jj}} \quad (1)$$

该式中 Y_{ij} 为种i与种j混播时分种i的产量; Y_{ii} 为种i单播的产量; Y_{ji} 为种j与种i混播时分种j的产量; Y_{jj} 为种j单播的产量。 $RYT=1$,说明在该组合下种间和种内无干扰或干扰相等; $RYT<1$,说明在该组合下种间干扰大于种内干扰,未充分利用环境资源, $RYT>1$,说明该组分种间干扰小于种内干扰,各个竞争种可能有某种程度的生态位分化,环境资源被充分利用。

$$\text{变异系数}: CV_i = V_i / X \quad (2)$$

该式中, V_i 为各种牧草指标的标准差, X 为各种牧

草指标的平均值。变异系数是衡量各指标值离散程度的一个统计量,该研究中通过茬次间变异系数来衡量群落稳定性的时间变异性,变异系数越小,说明群落越稳定^[24]。

组分稳定性:通过豆禾比来衡量组分的稳定性。根据上述所测分产量,分别计算出豆科牧草、禾本科牧草在总产量中所占比例^[25]。

功能稳定性:功能稳定性包括产草量、牧草品质和土壤特征等^[16]。产量稳定性是草地系统功能稳定性的重要标志^[3]。本研究通过牧草产量、品质的变化来衡量功能的稳定性。

种间相容性:用相对产量总和来衡量种间相容性^[26]。

1.4 综合评价方法

评价方法采用灰色关联度分析法,得出的结果定量地考虑了多个因素的作用,不仅可以进行定性的解释,还可以进行定量的精确描述^[27],避免确定权重的主观随意性,从而形成可比的综合性能指标^[28-29]。该方法能对本研究群落稳定性的综合评价给出准确的排序结果。先从各综合评价的比较数列 X_i 中各选取最佳的值构成参考数列 X_0 ^[30],后对各指标值进行无量纲化处理,消除各指标的量纲所带来的误差,然后求出各处理的关联系数,并计算出各指标的权重系数,

后通过加权关联度得出各处理的排序。

关联系数 $\xi_{i(k)} =$

$$\frac{\min \min |x_{ij}(k) - x_i(k)| + \rho \max \max |x_{ij}(k) - x_i(k)|}{|x_{ij}(k) - x_i(k)| + \rho \max \max |x_{ij}(k) - x_i(k)|} \quad (3)$$

$$\text{等权关联度 } r_i = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \xi_{i(k)} \quad (4)$$

$$\text{权重系数 } W_i = \frac{r_i}{\sum r_i} \quad (5)$$

$$\text{加权关联度 } r'_i = \sum_{k=1}^n W_{i(k)} \xi_{i(k)} \quad (6)$$

1.5 数据处理

运用 Excel 2016 对数据进行处理,利用 SPSS 19.0 软件对不同处理指标进行单因素方差分析(One-way ANOVA),利用 Origin 9.0 软件绘图。

2 结果与分析

2.1 水分调控对不同混播组合组分稳定性的影响

4 种水分调控下,混播组合 A1、A2 和 A3 在 5 茬中的豆科牧草比例分别为 56.21%~66.98%(图 2-A)、56.22%~67.06%(图 2-B)和 59.15%~67.44%(图 2-C)。水分调控($F=1.962, P=0.132$)与混播组合($F=1.274, P=0.289$)作为单一因子和交互效应($F=1.031, P=0.417$)对豆科牧草比例的影响均不显著。相同水分条件下, A2 的豆科牧草比例分别较 A1 和 A3 显著减少 2.41% 和 1.99%(图 2-D)。相同混播组合下, W1 的豆科牧草比例分别较 W0、W2 和 W3 显著减少 2.84%、2.42% 和 4.23%。所有处理中, W1A2 的豆科牧草比例平均值(59.47%)和变异系数(0.035)均最小。

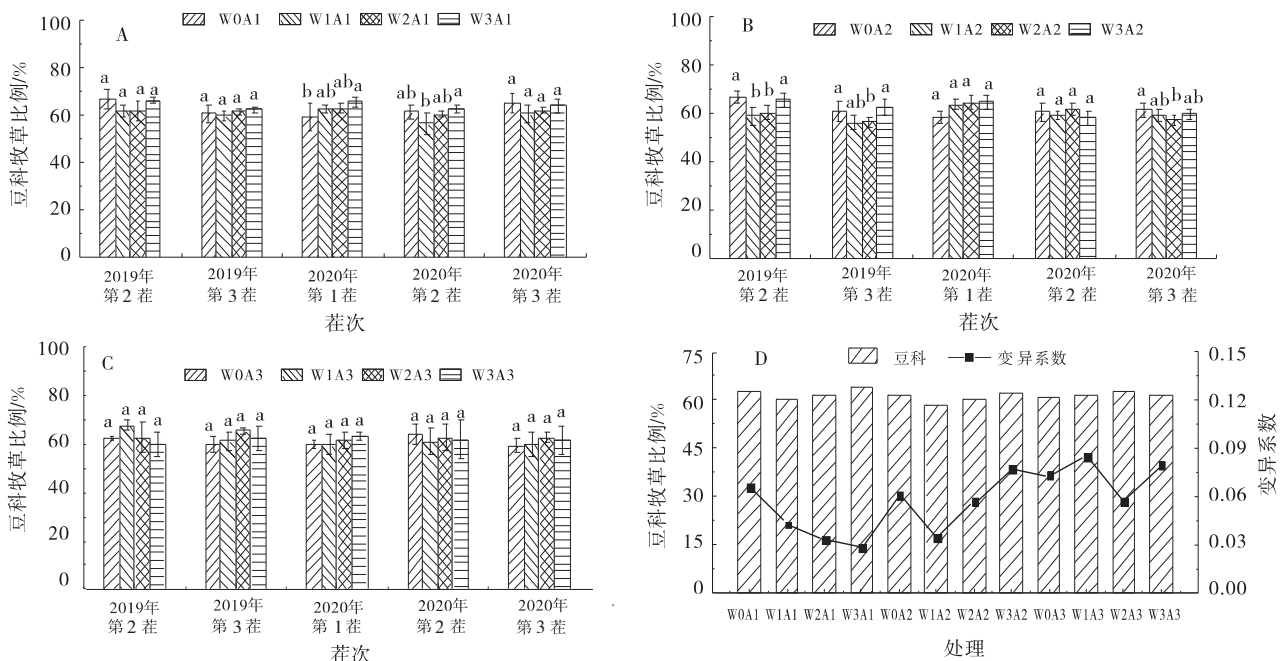


图 2 不同处理豆科牧草比例、均值及变异系数

Fig. 2 Changes in the proportion, mean value and coefficient of variation of legume forage in different treatments

注:不同小写字母表示同一茬次不同水分处理之间该指标差异显著($P<0.05$);图 A、B、C 分别为混播组合 A1、A2、A3 在不同水分处理下各茬次之间各指标值,图 D 为均值和变异系数,下同

4 种水分调控下,混播组合 A1、A2 和 A3 在 5 茬中的豆科牧草比例分别为 33.02%~47.79%(图 3-A)、32.94%~43.78%(图 3-B)和 32.56%~40.85%(图 3-C)。水分调控($F=1.962, P=0.132$)与混播组合($F=1.274, P=0.289$)作为单一因子和交互效应($F=1.031, P=0.417$)对禾本科牧草比例的影响均不显

著。相同水分处理下, A2 的禾本科牧草比例最高,较 A1 和 A3 分别增加 3.85% 和 3.16%。相同混播组合下, W1 的禾本科牧草比例显著高于 W0、W2 和 W3,分别增加 4.47%、3.78% 和 6.80%(图 3-D)。所有处理中, W1A2 的禾本科牧草比例平均值最高,为 40.53%,且变异系数(0.036)最小。

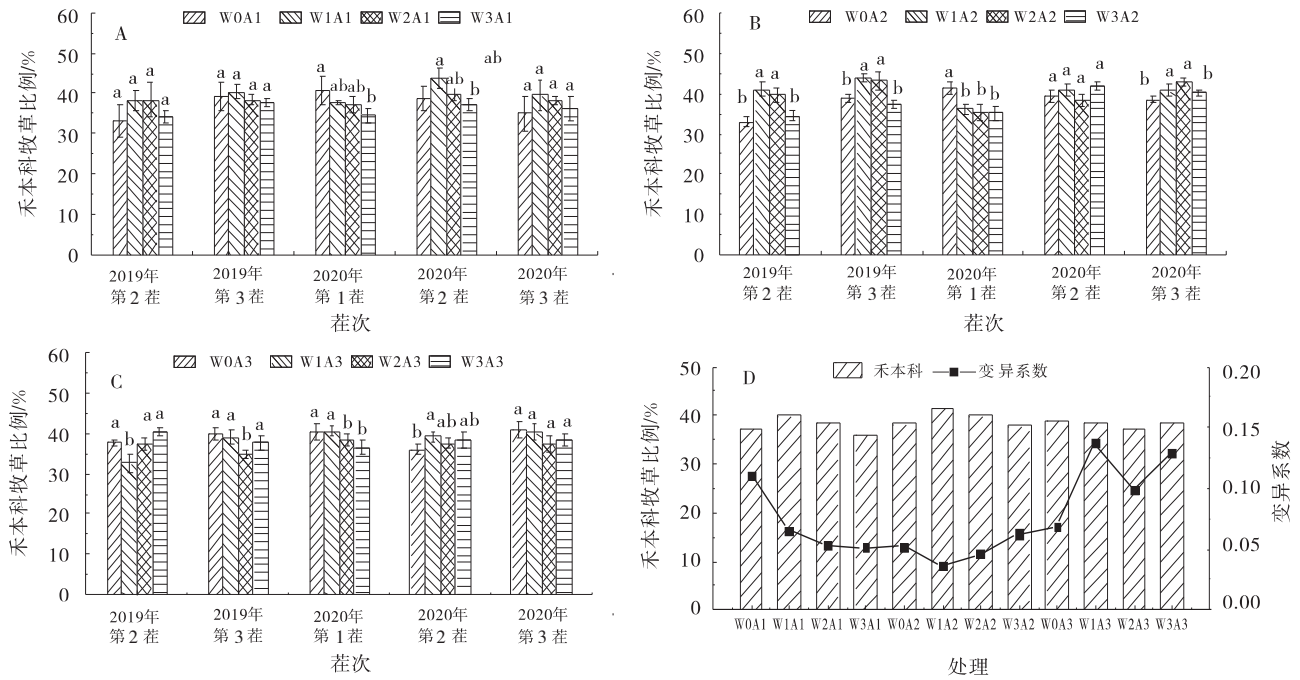


图3 不同处理禾本科牧草比例、均值及变异系数

Fig. 3 The proportion, mean value and coefficient of variation of gramineous forages in different treatments

2.2 水分调控对不同混播组合牧草功能稳定性的影响

2.2.1 牧草产量 牧草产量随生长季的推进逐渐减少,且各茬次之间差异显著($P < 0.05$) (图4)。4种水分调控下,混播组合A1、A2和A3在5茬中的牧草产量分别为3 489.40~5 608.60 kg/hm² (图4-A)、3 217.47~6 492.47 kg/hm² (图4-B)和3 929.40~6 454.23 kg/hm² (图4-C)。水分调控($F=5.201, P=0.003$)与混播组合($F=4.710, P=0.014$)作为单一因子对牧草产量的影响显著,但二者交互效应($F=0.086, P=0.997$)对牧草产量的影响不显著。相同水分处理下,A2的牧草产量显著高于其他混播组合,较A1和A3分别增加14.54%和3.27%。相同混播组合下,W1的牧草产量显著高于W2和W3(分别增加8.17%和19.56%),与W0之间无显著差异($P > 0.05$) (图4-D)。所有处理中,W0A2的牧草产量平均值达到最大,为5596.3kg/hm²,其次为W1A2,两者差异不显著,且都具有较低的变异系数。

2.2.2 牧草粗蛋白含量 4种水分调控下,混播组合A1、A2和A3在5茬中的牧草粗蛋白含量分别为15.61%~20.14% (图5-A)、16.50%~20.97% (图5-B)和14.71%~20.15% (图5-C)。水分调控($F=4.180, P=0.010$)作为单一因子对牧草粗蛋白含量的

影响显著,而混播组合($F=0.852, P=0.433$)和二者交互效应($F=0.210, P=0.972$)对牧草粗蛋白含量的影响不显著。相同水分处理下,A2的牧草粗蛋白含量显著高于A1和A3,分别增加2.63%和2.08%。相同混播组合下,W1的牧草粗蛋白含量显著高于其他水分处理,较W0、W2和W3分别增加5.07%、6.37%和8.49% (图5-D)。所有处理中,W1A2的牧草粗蛋白含量平均值最大,为19.52%,且变异系数(0.025)最小。

2.2.3 牧草酸性、中性洗涤纤维含量 4种水分调控下,混播组合A1、A2和A3在5茬中的牧草酸性洗涤纤维含量分别为23.26%~39.30% (图6-A)、22.12%~39.80% (图6-B)和22.02%~37.66% (图6-C)。水分调控($F=0.920, P=0.438$)与混播组合($F=0.399, P=0.673$)作为单一因子和交互效应($F=0.089, P=0.997$)对牧草酸性洗涤纤维含量的影响均不显著。相同水分处理下,A2的牧草ADF含量较A1减少2.49% ($P < 0.05$),与A3差异不显著。相同混播组合下,W1的牧草ADF含量较W0、W2和W3分别减少6.72%、2.34%和8.58% ($P < 0.05$) (图6-D)。所有处理中,W1A2的牧草ADF含量平均值最低,为30.96%,且其具有较低的变异系数。

4种水分调控下,混播组合A1、A2和A3在5茬中

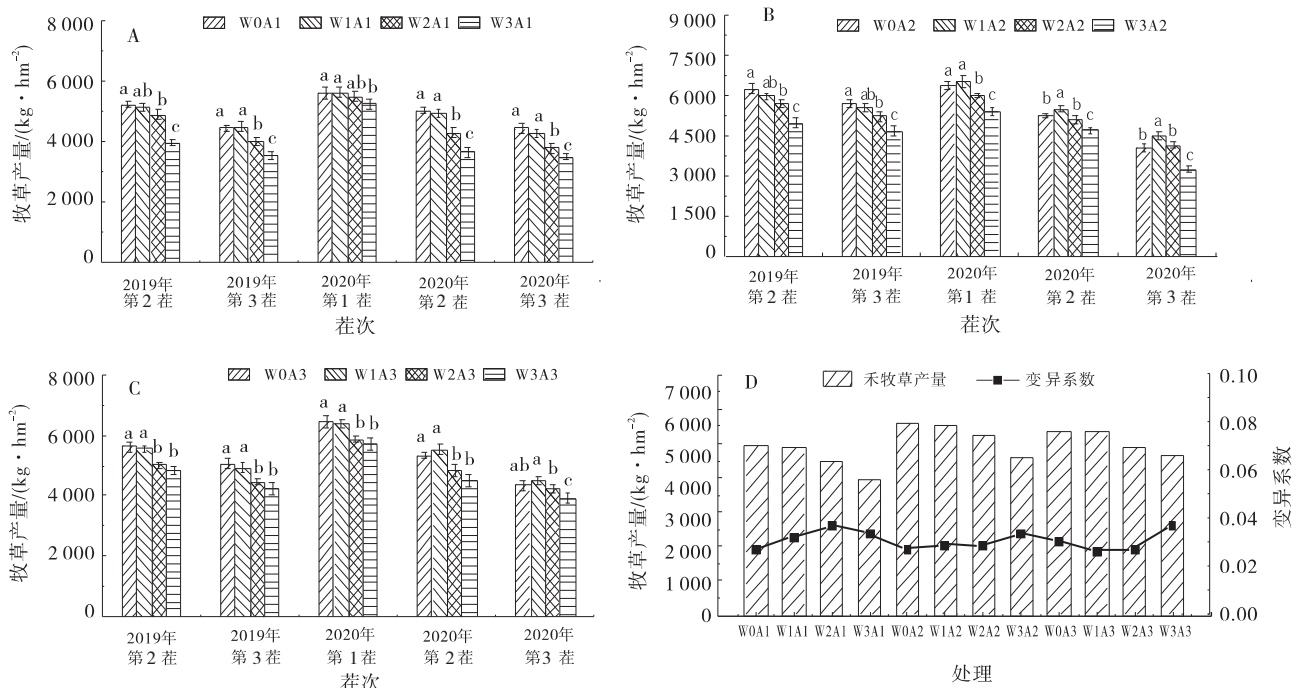


图4 不同处理牧草产量、均值及变异系数

Fig. 4 Changes of forage yield, mean value and coefficient of variation in different treatments

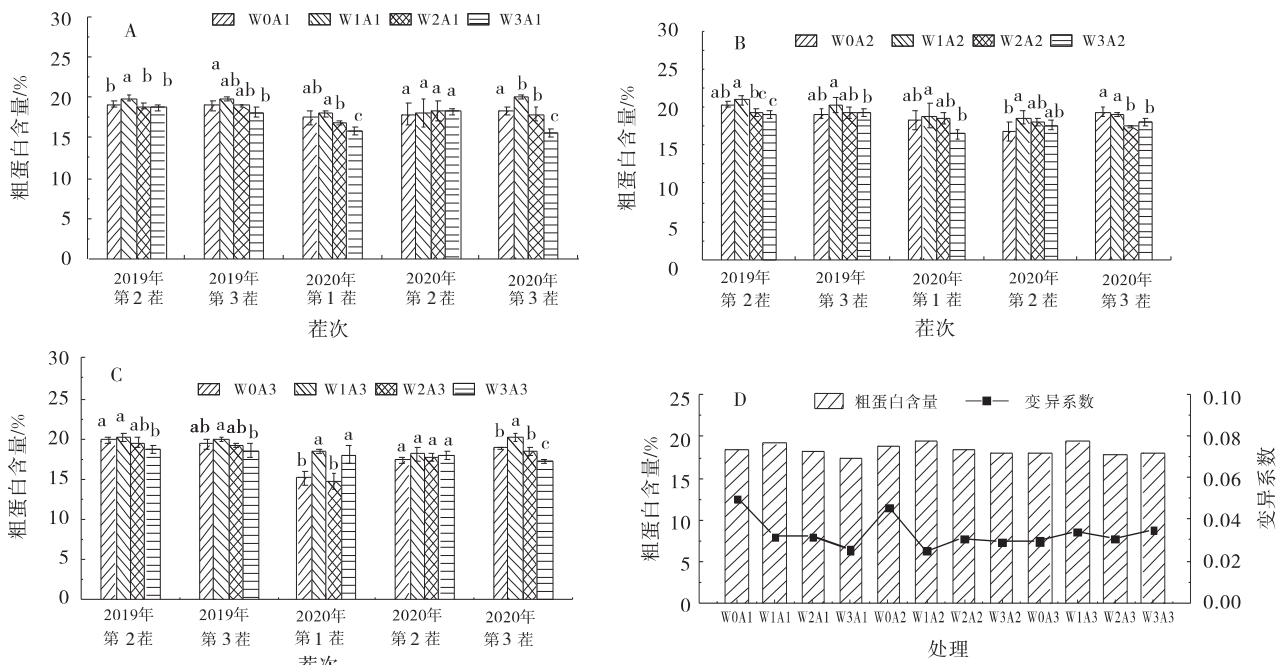


图5 不同处理粗蛋白含量、均值及变异系数

Fig. 5 Changes of crude protein content, mean value and coefficient of variation in different treatments

的牧草中性洗涤纤维含量分别为 30.66%~64.29% (图 7-A)、28.31%~61.15% (图 7-B) 和 31.60%~64.10% (图 7-C)。水分调控 ($F=0.811, P=0.494$) 与混播组合 ($F=0.277, P=0.759$) 作为单一因子和交互效应 ($F=0.059, P=0.999$) 对牧草中性洗涤纤维含量的影响均不显著。相同水分处理下, A2 的牧草

NDF 含量较 A1 减少 3.91% ($P<0.05$), 与 A3 差异不显著。相同混播组合下, W1 的牧草 NDF 含量显著低于其他水分处理, 较 W0、W2 和 W3 分别减少 9.57%、8.04% 和 10.41% (图 7-D)。所有处理中, W1A2 的牧草 NDF 含量平均值最低, 为 46.98%, 且变异系数最小 (0.021)。

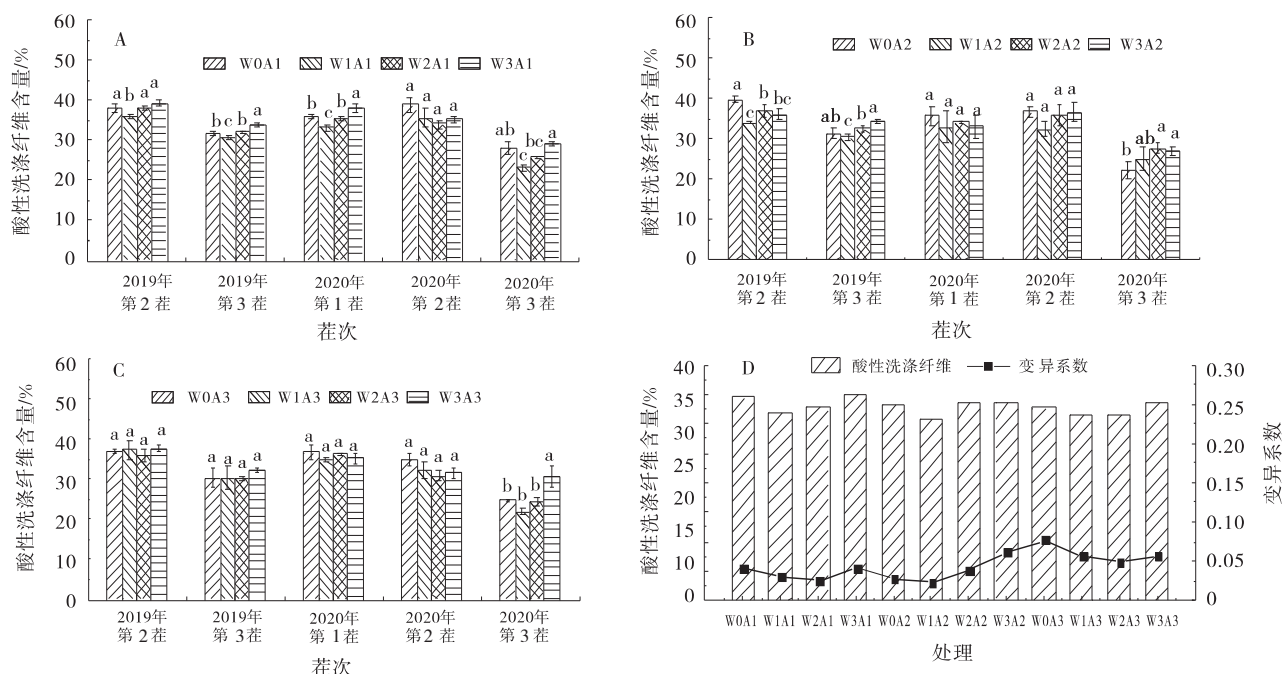


图 6 不同处理酸性洗涤纤维含量、均值及变异系数

Fig. 6 Acid detergent fiber content, mean value and variation coefficient in different treatments

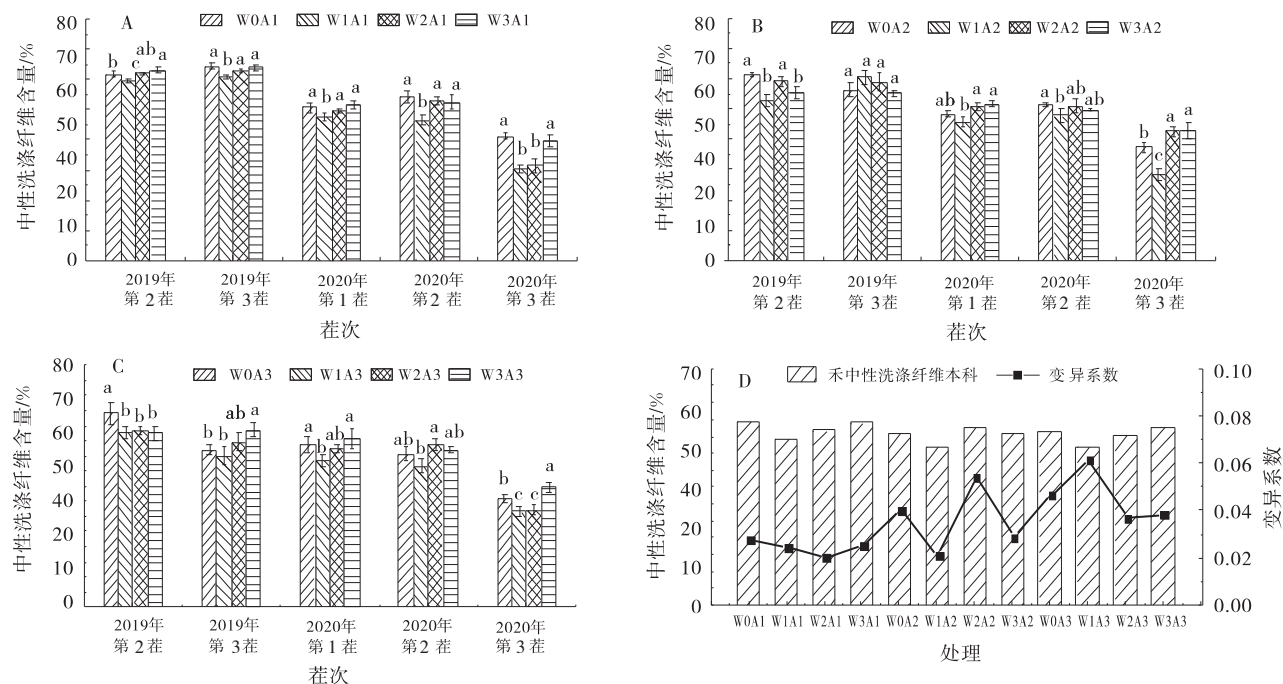


图 7 不同处理中性洗涤纤维含量、均值及变异系数

Fig. 7 Changes of neutral detergent fiber content, mean value and variation coefficient in different treatments

2.3 水分调控对不同混播组合群落种间相容性的影响

4种水分调控下,混播组合A1、A2和A3在5茬中的牧草相对产量总和分别为1.21~1.54(图8-A)、1.78~2.13(图8-B)和1.41~1.95(图8-C)。水分调控($F=3.613, P=0.020$)与混播组合($F=119.714, P$

$=0.000$)作为单一因子对牧草相对产量总和的影响显著,但二者交互效应($F=0.789, P=0.583$)对牧草相对产量总和的影响不显著。相同水分处理下,A2的RYT分别较A1和A3增加38.84%和21.22% ($P<0.05$)。相同混播组合下,W1的RYT显著高于其他

水分处理,分别较W0、W2和W3增加7.21%、5.29%和7.34%,但W0、W2和W3之间无显著差异($P>$

0.05)(图8-D)。所有处理中,W1A2的RYT平均值最大,为2.03,且其具有较小的变异系数。

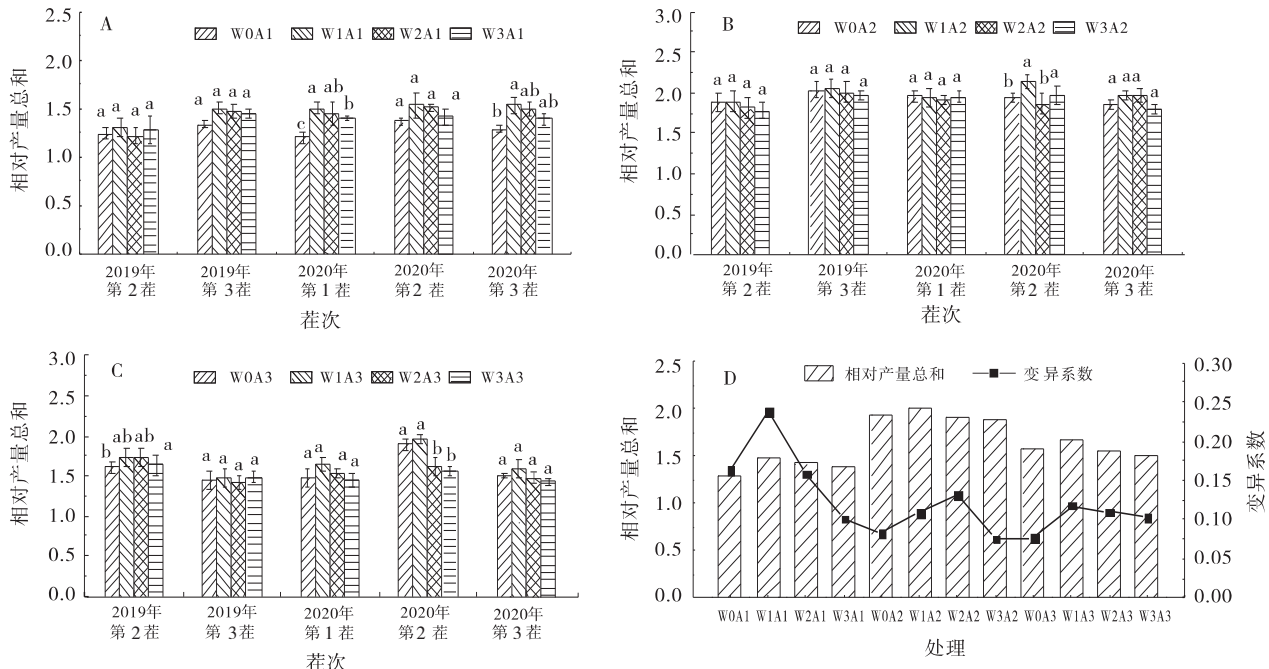


图8 不同处理相对产量总和、均值及变异系数

Fig. 8 Changes in the sum, mean and coefficient of variation of relative yields in different treatments

2.4 群落稳定性综合评价

不同处理各项指标的平均值见表2。各项指标的等权关联度均在0.5以上,关联度及权重由大到小依次为粗蛋白含量(CP)、豆科比例、酸洗纤维含量(ADF)、产量、禾草比例、中洗纤维含量(NDF)和相对产量总和(RYT)(表3)。W1A2加权关联度最高

(0.9289),W1A1、W1A3、W2A2、W2A3和W3A3的加权关联度在0.7~0.85,稳定性较好,W0A1、W2A1、W3A1的加权关联度在0.7以下,稳定性较差(表4)。可见,轻度亏水条件下,混播组合紫花苜蓿+无芒雀麦+长穗偃麦草(A2)的豆禾比例最优,产量、品质最好,群落稳定性最高。

表2 不同处理各项性状指标平均值

Table 2 Mean values of each trait index for different treatments

处理	豆科比例 /%	禾草比例 /%	牧草产量 /($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)	粗蛋白含量 /%	酸性洗涤纤维含量 /%	中性洗涤纤维含量 /%	相对产量总和
W0A1	62.63	37.37	4 928.71	18.35	34.48	54.44	1.29
W1A1	60.10	39.90	4 881.67	19.16	31.73	49.04	1.45
W2A1	61.60	38.40	4 480.28	18.17	33.07	51.74	1.50
W3A1	64.04	35.96	3 962.11	17.33	35.09	54.10	1.64
W0A2	61.76	38.24	5 596.30	18.80	33.15	50.97	1.93
W1A2	58.47	41.53	5 509.17	19.52	30.96	46.98	1.99
W2A2	60.10	39.90	5 221.16	18.50	33.50	52.46	2.03
W3A2	62.20	37.80	4 580.28	18.11	33.49	51.03	1.90
W0A3	61.02	38.98	5 355.69	18.09	32.73	51.27	1.70
W1A3	61.71	38.29	5 374.13	19.36	31.36	46.97	1.68
W2A3	62.95	37.05	4 872.30	17.90	31.49	50.29	1.73
W3A3	61.67	38.33	4 642.92	18.06	33.54	52.74	1.95

表 3 不同处理各指标关联系数及等权关联度

Table 3 Correlation coefficients and equal-weighted correlations of each index for different treatments

处理	豆科比例	禾草比例	牧草产量	粗蛋白含量	酸性洗涤纤维含量	中性洗涤纤维含量	相对产量总和
W0A1	0.646 9	0.646 9	0.950 2	0.754 3	0.617 0	0.535 6	0.333 4
W1A1	0.868 1	0.823 8	1.000 2	0.909 8	0.881 1	0.806 1	0.391 9
W2A1	0.774 2	0.708 9	0.690 4	0.725 9	0.728 9	0.643 3	0.413 7
W3A1	0.658 1	0.577 6	0.493 2	0.620 2	0.579 0	0.547 0	0.491 3
W0A2	0.765 1	0.698 2	0.556 0	0.832 7	0.721 3	0.682 9	0.786 1
W1A2	1.000 0	0.999 9	0.587 8	0.999 8	1.000 2	0.998 9	0.903 1
W2A2	0.868 3	0.824 0	0.725 0	0.779 1	0.690 5	0.610 7	0.987 8
W3A2	0.741 9	0.671 3	0.748 1	0.717 8	0.691 8	0.679 5	0.735 3
W0A3	0.807 8	0.749 1	0.653 8	0.714 6	0.762 5	0.667 1	0.533 1
W1A3	0.768 0	0.701 6	0.645 1	0.958 2	0.934 8	0.999 9	0.513 4
W2A3	0.705 4	0.629 6	0.989 8	0.687 8	0.914 3	0.721 9	0.557 5
W3A3	0.770 2	0.704 2	0.789 5	0.710 8	0.687 7	0.598 7	0.826 8
等权关联度	0.781 2	0.727 9	0.735 8	0.784 3	0.767 4	0.707 6	0.622 8
权重系数	0.152 4	0.142 0	0.143 5	0.153 0	0.149 7	0.138 0	0.121 5

表 4 不同处理的加权关联度及排序

Table 4 Weighted correlation and ranking of different treatments

处理	加权关联度	排序
W0A1	0.6489	11
W1A1	0.8227	2
W2A1	0.6769	10
W3A1	0.5698	12
W0A2	0.7206	7
W1A2	0.9289	1
W2A2	0.7801	4
W3A2	0.7122	8
W0A3	0.7035	9
W1A3	0.7961	3
W2A3	0.7484	5
W3A3	0.7254	6

3 讨论

3.1 水分调控对不同混播组合组分稳定性的影响

混播草地中各物种比例的消长,可反映混播草地群落的稳定性并预测草地未来的发展趋势^[17]。本研究以建植第 3、4 年豆禾比例的变化来表征组分稳定性,结果表明,水分调控与混播组合作为单一因子和交互效应对豆科、禾本科牧草比例的影响均不显著。这与董世魁^[31]研究得出,灌水可增加群落中非优势种群产量组分比,相应地降低优势种群产量组分比的结论存在偏差。这可能由以下两方面因素导致。1) 混播组合不同,在本研究中,不同水分调控可能同等程度地提高或降低了豆科与禾本科牧草的产量,使得豆科

与禾本科牧草的比例对水分调控的敏感度较小。2) 本试验区的地下水埋深较浅,可一定程度上补给牧草根区水分需求,从而降低对灌溉水的依赖。混播组合的多样性不等于群落的稳定性,随着建植年限增加,群落中某些物种逐渐消退,群落达到稳定^[5]。本研究中混播组合紫花苜蓿+无芒雀麦+长穗偃麦草,由于草地早熟禾建植年限的增加及群落的演替,草地早熟禾逐渐消退,而混播组合紫花苜蓿+无芒雀麦+长穗偃麦草的组分稳定性较强。

3.2 水分调控对不同混播组合功能稳定性的影响

群落功能稳定性包括产量稳定性和品质稳定性。产量稳定性是草地系统功能稳定性的重要标志^[3],粗蛋白和粗纤维含量则是评价牧草品质的两个重要指标,提高粗蛋白含量,降低纤维含量,是提高饲草品质的重要内容^[16]。本研究选取混播牧草产量、粗蛋白含量、酸性洗涤纤维含量、中性洗涤纤维含量等指标来表征群落的功能稳定性。结果表明,水分调控显著影响牧草产量,与充分灌水无显著差异。牧草粗蛋白含量随水分亏缺程度的提高,先增大后减小,轻度水分亏缺的牧草粗蛋白含量显著高于其他水分调控。这与董国锋等^[32]、马彦麟等^[33]、李天琦等^[34]、寇丹等^[35]对紫花苜蓿的研究结果一致。水分调控、混播组合及二者交互效应对牧草酸性、中性洗涤纤维含量的影响均不显著,且随建植年限的延长,牧草酸性、中性洗涤纤维含量逐渐减小。这与康文彦等^[21]、寇丹等^[35]的研究结果一致。在 3 种混播组合中,紫花苜蓿+无芒雀

麦+长穗偃麦草的产量、品质均优于其他组合,功能稳定性最高。这与郑伟等^[24]在不同混播方式下豆禾混播草地群落稳定性的研究结果相似。

3.3 水分调控对不同混播组合种间相容性的影响

相对产量总和可衡量群落的种间相容性^[24]。草地群落越稳定其种间相容性越好,竞争就越弱^[36]。本研究表明,轻度水分亏缺条件下,3种混播组合的相对产量总和均较高,说明适度的可减弱群落间竞争,增强群落稳定性,且以混播组合紫花苜蓿+无芒雀麦+长穗偃麦草的相对产量总和最高。这与李治国^[3]、王博杰等^[16]、郑伟等^[24]的研究结果一致。

4 结论

水分调控与混播组合对草地的组分稳定性无显著影响,但显著影响草地的功能稳定性(产量和粗蛋白含量)和种间相容性,水分调控与混播组合的交互效应对草地的组分稳定性、功能稳定性和种间相容性均无显著影响。

紫花苜蓿+无芒雀麦+长穗偃麦草组合在轻度水分亏缺(土壤水分为田间持水量的65%~75%)条件下加权关联度最高,综合评价结果最优,是适宜西北内陆干旱草原区的种植灌水模式。

参考文献:

- [1] 杜忠毓,安慧,文志林,等. 荒漠草原植物群落结构及其稳定性对增水和增氮的响应[J]. 生态学报,2021,41(6): 2359-2371.
- [2] 吴勇,刘晓静,童长春,等. 施氮对西北荒漠灌区紫花苜蓿土壤进化性质及微生物数量的影响[J]. 草原与草坪,2020,40(6):58-64.
- [3] 李治国. 紫花苜蓿、无芒雀麦混播群落稳定性及其产量因子模型建立的研究[D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学,2005.
- [4] 党承林,王崇云,王宝荣,等. 植物群落的演替与稳定性[J]. 生态学杂志,2002,21(2):30-35.
- [5] 赵俊权. 18种引进优良牧草混播草地生产力和群落稳定性及可持续利用研究[D]. 兰州:兰州大学,2007.
- [6] 王元素. 云贵高原山区混播草地初级生产力和群落时间稳定性研究[D]. 兰州:甘肃农业大学,2005.
- [7] Man Jianguo, Wang Dong, Yu Zhenwen. The length of micro-sprinkling hoses delivering supplemental irrigation affects photosynthesis and dry matter production of winter wheat[Z]. Field Crops Research,2014.
- [8] 蔡志凤. 黄土区苜蓿人工草地群落特征、多样性及其稳定性研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2011.
- [9] 张立敏,陈斌,李正跃. 应用中性理论分析局域群落中的物种多样性及稳定性[J]. 生态学报,2010,30(6): 1556-1563.
- [10] 姚天华,朱志红,李英年,等. 功能多样性和功能冗余对高寒草甸群落稳定性的影响[J]. 生态学报,2016,36(6): 1547-1558.
- [11] 向洁,王富强,郭宝光,等. 不同混播方式下豆禾混播草地的种间竞争关系研究[C]//2017中国草学会年会论文集,2017: 378.
- [12] 郑伟,朱进忠,库尔班,等. 不同混播方式下豆禾混播草地种间竞争动态研究[J]. 草地学报,2010,18(4): 568-575.
- [13] 侯利萍,何萍,范小杉,等. 生态阈值确定方法综述[J]. 应用生态学报,2021,32(2): 711-8.
- [14] 张永亮. 杂花苜蓿+无芒雀麦混播群落种群生理生态和稳定性研究[D]. 兰州:甘肃农业大学,2005.
- [15] Zhou Junju, Zhao Yaru, Liu Chunfang. Impacts of ecological restoration projects on the ecosystem carbon storage of inland river basin in arid area, China[J/OL]. Ecological Indicators, 2020, 118: 106803 [2020-08-06]. <http://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106803>.
- [16] 王博杰,唐海萍,何丽,等. 农牧交错区旱作条件下苜蓿和冰草人工草地稳定性研究[J]. 草业学报,2016,25(4): 222-9.
- [17] 谢开云,曹凯,万江春,等. 新疆半干旱区不同豆科/禾本科牧草混播草地生产力的变化研究[J]. 草业学报,2020,29(4): 29-40.
- [18] 王元素,蒋文兰,洪绶曾,等. 人工混播草地群落稳定性研究进展[J]. 中国草地,2005(4): 58-63,73.
- [19] 谢开云,张英俊,李向林,等. 无芒雀麦和紫花苜蓿在(1:1)混播中的竞争与共存[J]. 中国农业科学,2015,48(18): 3767-3778.
- [20] 武瑞鑫,赵海明,李源,等. 海河平原区不同紫花苜蓿品种生产性能评价[J]. 中国草地学报,2018,40(6): 86-92.
- [21] 康文彦,齐广平,康燕霞,等. 不同灌水模式对禾豆混播人工草地产量与品质的影响[J]. 水利规划与设计,2020,198(4):103-109,131.
- [22] 黄泽. 黄土高原半干旱区典型人工草地与天然草地土壤水分平衡研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2017.

- [23] 王建光. 农牧交错区苜蓿—禾草混播模式研究[D]. 北京:中国农业科学院, 2012.
- [24] 郑伟, 加娜尔古丽, 唐高溶, 等. 不同混播方式下豆禾混播草地群落稳定性的测度与比较[J]. 草业学报, 2015, 24(3): 155—167.
- [25] 加娜尔古丽·穆沙. 昭苏马场豆禾混播草地种间组分筛选及其稳定性研究[D]. 乌鲁木齐:新疆农业大学, 2012.
- [26] 董世魁, 胡自治. 人工草地群落稳定性及其调控机制研究现状[J]. 草原与草坪, 2000(3): 3—8.
- [27] 张军, 李建明, 张中典, 等. 水肥对番茄产量、品质和水分利用率的影响及综合评价[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2016, 44(7): 215—222.
- [28] 郑伟, 朱进忠, 加娜尔古丽. 不同混播方式豆禾混播草地生产性能的综合评价[J]. 草业学报, 2012, 21(6): 242—251.
- [29] 娜日苏, 梁庆伟, 杨秀芳, 等. 阿鲁科尔沁旗燕麦新品种的灰色关联度评价[J]. 饲料研究, 2019, 42(3): 83—86.
- [30] 张爽. 短花针茅荒漠草原主要植物种群间相互关系对放牧的响应[D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学, 2020.
- [31] 董世魁. 高寒地区多年生禾草混播草地群落稳定性及其调控机制研究[D]. 兰州:甘肃农业大学, 2001.
- [32] 董国锋, 成自勇, 张自和, 等. 调亏灌溉条件下秦王川灌区苜蓿种植效益初步分析[J]. 灌溉排水学报, 2006: 85—87.
- [33] 马彦麟, 齐广平, 汪精海, 等. 西北荒漠灌区紫花苜蓿产量和营养品质对水肥调控的响应[J]. 甘肃农业大学学报, 2018, 53(6): 171—179, 186.
- [34] 李天琦, 赵力兴, 林志玲, 等. 灌溉量对科尔沁沙地紫花苜蓿产量和水分利用效率的影响[J]. 中国草地学报, 2020, 42(2): 117—123.
- [35] 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.
- [36] 朱爱民, 韩国栋, 康静, 等. 长期放牧对豆花针茅荒漠草原不同功能群植物重要值的影响[J]. 草原与草坪, 2020, 40(5): 59—67.

Effect and evaluation of water regulation on the stability of bean–grain mixed seeding grassland communities in the inland dry zone of Northwest China

KANG Yao, YIN Min-hua, MA Yan-lin, QI Guang-ping, KANG Yan-xia,
JIANG Yuan-bo, ZHANG Hong-bin

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

Abstract: Based on the characteristics of drought and less rainfall in the inland arid region of Northwest China, grassland yield is low and unstable, so it is of great significance to explore more high-yield and water-saving grassland communities to realize the stability of ecological environment. Through two years of field experiments (2019 and 2020), four water regulation gradients (fully irrigated W0, 75%~85% FC (field water capacity); Mild water deficit W1, 65%~75% FC; Moderate water deficit W2, 55%~65% FC; Severe water deficit W3, 45%~55% FC) were compared and analyzed for the effect on the community stability. Three bean-grain mixed seeding combinations (Alfalfa/*Brumos inermis* (A1), Alfalfa/*B. inermis*/*Elytrigia elongata* (A2) and Alfalfa/*B. inermis*/*E. elongate*/*Poa pratensis*. (A3) were studied in the field experiments. The results showed that the combination of water regulation and

mixed seeding had no significant effect on the component stability of mixed seeded grass, but significantly affected the functional stability (yield and crude protein content), and interspecific compatibility of mixed seeded grass. The interaction effect of water regulation and mixed sowing combination didn't significantly affect the component stability, functional stability or interspecific compatibility of the grasses. The comprehensive evaluation showed that under mild water deficit conditions, A2 mixed sowing treatment had the highest weighted correlation and the best comprehensive ranking, which is a suitable bean-grain mixed sowing combination and irrigation management mode in the northwest inland arid zone.

Key words: water regulation; bean-grain mixed seeding; community stability; yield; comprehensive evaluation

(上接 121 页)

Screening of *Trichogramma dendrolimi* under low humidity stress and its development in *Antheraea pernyi* eggs

ZHOU Li-li¹, YUAN Wei-ning², ZHANG Mei-jiao², ZHANG Xin-rui²,
LIU Chang-zhong¹

(1. College of Plant Protection, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China; 2. Institute of Plant Protection, Gansu Academy of Agricultural Sciences, Gansu Agricultural Pest Natural Enemy Engineering Research Center, Lanzhou 730070, China)

Abstract: *Trichogramma dendrolimi* is widely used in biological control of most lepidopteran pests. But there are few available bee species in the arid areas of Northwest China, so the domestication of *Trichogramma dendrolimi* with low humidity tolerance is very necessary. At the same time, the study on the development process of *Trichogramma dendrolimi* in eggs of tussah is of great significance for its large-scale propagation. In order to achieve the application requirements of agriculture, this study selected out a low humidity tolerant strain of *T. dendrolimi* through low humidity press method, then measured its parasitism rate and bee emergence rate on the eggs of tussah (*Antheraea pernyi*), and observed the development process under 50% relative humidity condition. The results showed that the parasitism rate and the emergence rate of *T. dendrolimi* decreased with the decrease of relative humidity. After the treatment of low humidity stress, the morphology of *T. dendrolimi* could not be significantly different. Under the condition of $(25 \pm 0.5) ^\circ\text{C}$, the development period of *T. dendrolimi* in the egg of tussah was 10 d, including the egg stage of 30 h, larval stage of 24 h, prepupal stage of 72 h, and pupal stage of 106 h. At 240h after oviposition, *T. dendrolimi* emerged into an adult, and mating was completed in the egg of tussah, finally bitted on tussah eggs shell and get out. The whole process was same to nature individuals with 70% humidity (control). In conclusion, low humidity stress can reduce the parasitism rate and emergence rate of *T. dendrolimi*, but does not lead to significant differences in individual growth, development and morphology.

Key words: low humidity stress; *Trichogramma dendrolimi*; development process; parasitism rate; emergence rate; tussah egg