

水分调控与种植模式对人工草地土壤水分及产量品质的影响

姜渊博，齐广平，银敏华，康燕霞，马彦麟，汪精海，贾琮，唐仲霞，汪爱霞

(甘肃农业大学水利水电工程学院,兰州 730070)

摘要: 针对河西走廊地区水资源短缺、天然草地退化严重和质量低下等问题,探究合理的水分调控与种植模式,以缓解草畜矛盾,改善生态环境,实现区域草地畜牧业可持续发展。试验采用 2 年大田试验,研究 3 种植模式(O:红豆草单播;A:红豆草+无芒雀麦混播;B:红豆草+无芒雀麦+长穗偃麦草混播)与 4 种水分调控[灌水上下限以土壤含水量占田间持水量 θ_{FC} 的百分比计,W0:充分灌水($75\% \sim 85\% \theta_{FC}$);W1:轻度水分亏缺($65\% \sim 75\% \theta_{FC}$);W2:中度水分亏缺($55\% \sim 65\% \theta_{FC}$);W3:重度水分亏缺($45\% \sim 55\% \theta_{FC}$)]对人工草地土壤水分特征、干草产量、品质及水分利用效率的影响。结果表明:(1)在时间维度(4—9 月)0—40 cm 土层土壤含水量表现为先减小后增大的变化趋势,且该变化趋势 W2、W3 较 W0、W1 明显,单播较混播明显,40—100 cm 土层土壤含水量呈现逐渐减小的变化规律;在空间垂直分布上,各处理土壤含水量呈先增大后减小之后趋于稳定的变化趋势;3 种植模式中土壤含水量均属于中等变异,且表层与 60—100 cm 土层变异系数较大。(2)随着水分亏缺加剧,单混播牧草产量均逐渐减小,WUE 先增大后减小,W1 较 W0 处理牧草产量差异不显著($p>0.05$),且 WUE 最高;A 和 B 种植模式 2 年平均总产量分别较 O 提高 16.01% 和 12.74%,2 年平均 WUE 分别较 O 提升 18.64% 和 11.19%。(3)适宜水分亏缺提升了牧草品质,混播模式较单播牧草品质改善。A 和 B 种植模式较 O 种植模式 2 年平均 ADF 分别降低 4.40% 和 2.73%,NDF 分别降低 2.82% 和 2.02%,CP 分别降低 3.53% 和 7.24%,但 W0 与 W1 水分处理,O 与 A 种植模式 CP 差异不显著。A 和 B 种植模式较 O 种植模式 2 年平均 Ash 分别提升 18.50% 和 16.58%,EE 分别提升 23.19% 和 20.37%,RFV 分别提升 4.87% 和 3.20%。通过主成分分析综合评价得出,轻度水分亏缺下红豆草与无芒雀麦混播是河西走廊地区人工草地高产优质高效的适宜水分调控与种植模式。

关键词: 人工草地; 土壤水分; 产量品质; 水分利用效率; 主成分分析

中图分类号: S152.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-2242(2022)06-0260-11

DOI:10.13870/j.cnki.stbcbxb.2022.06.032

Effects of Water Regulation and Planting Patterns on Soil Moisture, Yield and Quality in Artificial Grassland

JIANG Yuanbo, QI Guangping, YIN Minhua, KANG Yanxia, MA Yanlin,

WANG Jinghai, JIA Qiong, TANG Zhongxia, WANG Aixia

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

Abstract: In view of the shortage of water resources and the serious degradation and low quality of natural grassland in Hexi Corridor, the reasonable water regulation and planting patterns were explored to alleviate the contradiction between grass and livestock, improve the ecological environment and realize the sustainable development of regional grassland animal husbandry. The experiment was conducted in a 2-year field trial to study the effects of three planting patterns (O: Sainfoin (*Onobrychis viciifolia*) monoculture, A: Sainfoin and *Bromus inermis* mixture, B: Sainfoin, *B. inermis* and *Elytrigia elongate* mixture) and four types of water regulation (upper and lower limits of irrigation were based on the proportion of soil water content in field capacity (θ_{FC}), W0: adequate irrigation ($75\% \sim 85\% \theta_{FC}$), W1: slight water deficit ($65\% \sim 75\% \theta_{FC}$), W2: moderate water deficit ($55\% \sim 65\% \theta_{FC}$), W3: severe water deficit ($45\% \sim 55\% \theta_{FC}$)) on soil moisture characteristics, hay yield, quality and water use efficiency of artificial grass. The results showed that: (1) In the temporal dimension (from April to September), soil water content in 0—40 cm soil layer decreased firstly

and then increased, and this trend of W2 and W3 was more obvious than that of W0 and W1, and more obvious for monoculture than mixed sowing. Soil water content in 40—100 cm soil layer decreased gradually. In the vertical spatial distribution, the soil water content of each treatment increased firstly and then decreased, and then tended to be stable. The soil water contents of the three planting patterns were moderate variation, and the variation coefficient of surface layer and 60—100 cm soil layer was large. (2) With the aggravation of water deficit, the herbage yield of monoculture and mixed sowing decreased gradually, and the WUE increased firstly and then decreased. There was no significant difference in forage yield between W1 and W0 ($p>0.05$), and the WUE of W1 was the highest. Compared with O, the two-year average total herbage yield of A and B increased by 16.01% and 12.74%, respectively, and the two-year average WUE increased by 18.64% and 11.19%, respectively. (3) Suitable water deficit improved the herbage quality, and the herbage quality of mixed-sowing pattern was better than that of monoculture. Compared with O, the two-year average ADF, NDF and CP in planting patterns A and B decreased by 4.40% and 2.73%, 2.82% and 2.02%, and 3.53% and 7.24%, respectively. However, under W0 and W1 water treatment, there was no significant difference in CP between planting patterns O and A. Compared with O, the two-year average Ash of A and B increased by 18.50% and 16.58%, EE increased by 23.19% and 20.37%, and RFV increased by 4.87% and 3.20%, respectively. Through comprehensive evaluation of principal component analysis, it was concluded that the combination of slight water deficit and mixed sowing of *Sainfoin* and *B. inermis* was the suitable water regulation and planting pattern for artificial grassland with high yield, high quality and high efficiency in Hexi Corridor.

Keywords: artificial grassland; soil moisture; yield and quality; water use efficiency; principal component analysis

天然草地面积辽阔,生产潜力巨大,是陆地生态系统的重要组成部分,也是畜牧业发展的主要饲料基地^[1]。近年来,全球气候变暖和土地荒漠化等问题日益突出,造成天然草地生态系统功能紊乱、退化严重,由此引起的草畜失衡和土壤盐碱化等制约着农牧区增产增收与生态环境可持续发展。积极响应国家生态文明建设与乡村振兴战略,建植人工草地,可推动粮草兼顾立体农业发展,缓解饲草供应不足现状,助力草原生态修复^[2]。

相关研究^[3]表明,牧草混播可改善土壤环境,协同草种优势,丰富生物多样性,增加人工草地利用年限,同时优良性状草种混播是保障人工草地高产优质、绿色高效的有效途径之一。红豆草为多年生豆科牧草,适应性强,营养丰富,可培肥土壤,预防家畜膨胀病,有“牧草皇后”的美称^[4]。无芒雀麦和长穗偃麦草属多年生禾本科牧草,具有良好的再生性、耐牧性和适口性,是我国畜牧业发展的优势种与建群种^[5]。大量研究^[6]表明,豆科与禾本科牧草混播不仅可提升草地生产力,均衡饲草营养价值,提高资源利用率,还能改善土壤结构,减少病虫害发生。混播中的豆禾牧草占据不同生态位,可优化植被冠层结构,改善田间微环境。此外,豆禾牧草的种间竞争使得豆科牧草的根瘤固氮作用进一步强化,有利于土壤氮素平衡^[7]。土壤水分是植株水分的重要来源和养分循环、物质转化的载体^[8]。在水资源短缺地区,水是植株生长的主

要限制性因子^[9]。调亏灌溉是在作物一定生育时期主动施以水分胁迫,调节植株生理特性,使光合产物在不同组织器官间重新分配,从而实现作物提产优质高效^[10]。相关研究^[11]表明,前期轻度亏水下,青贮玉米和秣食豆混播不会显著降低鲜干草产量,反而有利于作物品质与水分利用效率的提高。冰草与紫花苜蓿混播高产节水的最优灌水量为达到田间持水量的 45%^[12]。全生育期调亏灌溉下,随亏水程度加剧,紫花苜蓿产量逐渐减小,品质提升,分生育期调亏中,分枝期亏水对牧草产量影响最大^[13]。

河西走廊位于西北干旱半干旱地区农牧交错地带,光热充足,农业基础雄厚,天然草地面积为 983.52 万 hm^2 ,而优质人工草地面积仅为 15 万 hm^2 ,只占草地总面积的 1.5%^[14],区内水资源不足,利用率低,草原生态环境恶化,饲草质量低下,严重制约着农牧业的可持续发展^[15]。目前,关于水分调亏对牧草生长及产量品质影响报道较多,但系统研究河西走廊地区不同组分牧草种植模式对水分调控响应关系的研究较少,其作用机理尚不明确。此外水分调控下混播牧草相较于单播在提产优质方面效果如何,不同混播模式间差异如何都需进一步研究。因此,本研究分别采用单(红豆草)、双(红豆草+无芒雀麦)、多(红豆草+无芒雀麦+长穗偃麦草)3 类种植模式,以单播红豆草为对照,设置 4 种水分调控梯度,探究不同种植模式与水分调控对人工草地土壤水分、产量品质和水分

利用效率的影响,旨在明确河西走廊地区人工草地适宜的种植与水分调控策略,以期为区域人工草地高产优质、生态恢复提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

于 2019 年 4 月至 2020 年 9 月在甘肃省张掖市肃南裕固族自治县明花乡前滩村(39°40′N,98°47′E)开展大田试验,试验区平均海拔为 1 388 m。2019 年和 2020 年全年降水量分别为 153.6,91.7 mm,牧草生长季总降水量分别为 133,69 mm,平均气温分别为 19,20 ℃(图 1),年均蒸发量 2 144 mm,全年日照时间 3 020 h,全年无霜期为 132 天左右,夏季炎热,冬季寒冷,属温带大陆性气候。试验地土壤类型为砂壤土,田间持水量为 29.68%(体积含水量),土壤容重为 1.4 g/cm³,0—100 cm 土层土壤 pH 为 7.35,有机质含量 3.24 g/kg,全氮含量 0.28 g/kg,碱解氮含量 25.04 mg/kg,速效磷含量 3.20 mg/kg,速效钾含量 225.21mg/kg,硝态氮含量 7.44 mg/kg,铵态氮含量 8.13 mg/kg。

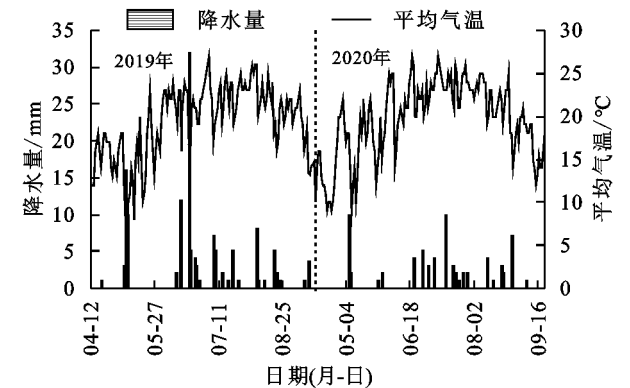


图 1 2019—2020 年牧草生长季每日气象资料

1.2 试验材料

选取多年生禾本科牧草无芒雀麦(卡尔顿无芒雀麦, *Bromus inermis* cv. Carlton)和长穗偃麦草(长穗偃麦草, *Elytrigia elongate*)及豆科牧草红豆草(甘肃红豆草, *Onobrychis viciifolia*)为供试草种,均由甘肃农业大学草业学院提供。

1.3 试验设计

本试验采用完全随机区组设计,设种植模式与水分调控 2 个因素,其中种植模式设 3 种,分别为红豆草单播(O)、红豆草+无芒雀麦混播(A)和红豆草+无芒雀麦+长穗偃麦草混播(B);另各自下设 4 个水分调控梯度,分别为充分灌水(75%~85% θ_{FC} , W0)、轻度水分亏缺(65%~75% θ_{FC} , W1)、中度水分亏缺(55%~65% θ_{FC} , W2)、重度水分亏缺(45%~55% θ_{FC} , W3),计划湿润层深度为 80 cm,各水分处理均以计划湿润层土壤体积含水量占田间持水量

($\theta_{field\ capacity}$, θ_{FC})的百分比控制,当土壤含水量下降至各自处理对应 θ_{FC} 百分比下限时开始灌水,灌水上限为其各自设计区间上限。共计 12 个处理,各处理均重复 3 次,共 36 个小区,小区面积为 5 m×5 m,小区间设 1 m 的隔离带。牧草于 2017 年 5 月建植,采用人工同行条播方式(1:1 比例混播),行距 25 cm,播种量 35 kg/hm²,播种前选用磷酸二铵(18% N, 46% P)作为底肥,施肥量为 140 kg/hm²。

采用喷灌灌水方式,小区间布设聚乙烯管道,各小区中心位置设 1.5 m 高支管 1 个,上设塑料蝶形喷头,喷头为全圆喷洒,喷洒半径为 2~4 m,灌水量由水表(精度 0.000 1 m³)监测,球阀控制,试验开展期间,各小区田间管理与当地保持一致,2019 年和 2020 年均刈割 3 茬。

1.4 测定项目与方法

1.4.1 土壤体积含水量 在每个试验小区距中心位置 1.25 m 处随机布设 1 个 150 cm 长的时域反射仪(time-domain reflectometry, TDR)探管,采用 PI-CO-BT TDR 仪器(IMKO, 德国)监测土壤 0—120 cm 土层体积含水量。在牧草全生育期每隔 3~5 天测定 1 次,灌水前后和降水后加测并定期利用烘干法对数据进行校核,土壤含水量测定主要用于判断试验小区土壤水分是否达到灌水下限,进而计算灌水量。

1.4.2 变异系数 经典统计学中用变异系数(CV)表示土壤水分的波动,其值越大,表示土层间水分变化越剧烈,其值越小,表示土壤水分越稳定,通常 $CV \leq 0.1$ 代表弱变异性, $0.1 < CV < 1$ 代表中等变异性, $CV \geq 1$ 代表强变异性。

$$CV = S / \bar{X} \tag{1}$$

式中: S 为标准差; $\bar{X}$ 为土壤含水量均值(%)。

1.4.3 产量 于每茬红豆草初花期(各处理牧草生育期以红豆草计,3 茬刈割时间 2019 年分别为 6 月 10 日、7 月 27 日、9 月 15 日,2020 年分别为 6 月 13 日、7 月 30 日、9 月 19 日)利用 1 m×1 m 样方随机选取 1 块样地留茬 5 cm 进行刈割,并立即称量鲜重,之后放入烘箱,于 105 ℃杀青 30 min 后,75 ℃恒温烘 48 h 至恒重,冷却后称其干重计算干草产量(Y , kg/hm²)。

1.4.4 耗水量

$$ET = P + M + K - \Delta W - Q - D_p \tag{2}$$

式中: ET 为耗水量(mm); P 为有效降水量(mm); M 为灌水量(mm); K 为地下水补给量(mm); ΔW 为试验初末土壤水分变化量(mm); Q 为径流量(mm); D_p 为深层渗漏量(mm);试验地地下水位较深,地表平整,灌水依据田间持水量百分比计,故忽略 K 、 Q 和 D_p 。

1.4.5 水分利用效率

$$WUE = Y / ET \tag{3}$$

式中:WUE 为水分利用效率(kg/m^3);Y 为牧草产量(kg/hm^2);ET 为耗水量(mm)。

1.4.6 品质指标 粗蛋白(crude protein, CP)含量:在红豆草每茬初花期,收获各处理植株地上部分,经过杀青、烘干、粉碎后,利用全自动凯氏定氮仪(K1160,中国)测定植株含氮量,计算牧草的粗蛋白含量(%)公式为:

$$CP=6.25\omega_N \quad (4)$$

式中:6.25 为换算系数; ω_N 为植株含氮量(%)。

酸性洗涤纤维(acid detergent fiber, ADF)和中性洗涤纤维(neutral detergent fiber, NDF)含量:利用半自动纤维分析仪(F800,中国)通过范氏(Van Soest)洗涤纤维分析法测定牧草酸性洗涤纤维和中性洗涤纤维含量(%)。

相对饲喂价值(relative feeding value, RFV)计算公式为:

$$\text{RFV}=(120/V_{\text{NDF}})\times(88.9-0.779V_{\text{ADF}})/1.29 \quad (5)$$

式中: V_{NDF} 为牧草中性洗涤纤维含量(%) ; V_{ADF} 为牧草酸性洗涤纤维含量(%)。

粗灰分含量(crude ash, Ash):在马弗炉利用直接灰化法测定粗灰分含量(%)。

粗脂肪含量(ether extract, EE):利用脂肪测定仪(SOX606)通过索氏浸提法测定粗脂肪含量(%)。

1.5 数据分析与处理

采用 Microsoft Excel 2019 进行数据整理、绘图;采用 Surfer 18 进行土壤含水量等值线图绘制;采用 IBM SPSS Statistics 22.0 软件用单因素(One-way ANOVA)和 Duncan 法进行方差分析和多重比较($p<0.05$),用双因素方差分析(Two-way ANOVA)进行水分处理与种植模式及其交互效应分析($p<0.05$);采用 Origin 2019b 进行主成分分析及绘图。

2 结果与分析

2.1 水分调控与种植模式对人工草地土壤水分的影响

2.1.1 土壤水分的时空变化特征 土壤水分与气温、降水、灌水、土壤质地、地表覆盖度及植被根系分布等因素密切相关。2019 年与 2020 年土壤水分时空分布规律基本一致,以 2020 年牧草生长季土壤水分变化为例,分析不同处理对人工草地土壤水分时空分布的影响(图 2)。总体来看,从 4—9 月,0—40 cm 土层土壤含水量表现为先减小后增加的趋势,7,8 月份最低,之后随气温降低逐渐有上升趋势。同一种植模式下,0—40 cm 表层土壤在 W2 和 W3 水分处理下,土壤含水量随时间变化比 W0 和 W1 更明显。同一水分处理下,红豆草单播较 2 种混播处理 0—40 cm 土

层土壤含水量随时间变化在 W0 和 W1 条件下变化更加明显,W2 和 W3 水分处理下,不同种植模式间表层土壤含水量随时间变化差异不明显。40—100 cm 土层土壤含水量,随着时间的推移,呈逐渐减小的变化趋势。100—120 cm 土层土壤含水量随时间波动幅度较小,基本呈稳定趋势。从空间土壤水分垂直分布看,各处理土壤含水量变化呈现先增大后减小,之后趋于稳定的变化趋势。其中 0—60 cm 土层土壤含水量逐渐增加,60—100 cm 土层土壤含水量逐渐减小,之后 100—120 cm 土层土壤含水量变化逐渐趋于稳定,该变化规律在 W0 与 W1 水分处理下更为明显。

2.1.2 不同处理下土壤水分垂直变异特性 由不同种植模式人工草地土壤水分随土层深度垂直变异特性(表 1)可知,0—20 cm 土层土壤含水量最小值在 O 种植模式下最小,为 13.02%,A 和 B 种植模式最小值较 O 分别提升 5.07%和 3.61%;同时在 O 种植模式下,0—20 cm 土层土壤含水量最大值为 23.50%,A 和 B 种植模式最大值较 O 分别提升 3.15%和 3.87%;从均值来看,与种植模式 O 相比,A 和 B 种植模式在 0—20 cm 土层的土壤含水量有所提高,提高率分别为 5.75%和 5.64%,20—60 cm 土层土壤含水量表现为混播较单播有所降低。从变异系数看,3 种植模式下的土壤水分均属于中等变异,0—40 cm 与 60—100 cm 土层土壤水分波动较大,而 100—120 cm 土层土壤水分较稳定,敏感性较低。

2.2 水分调控与种植模式对人工草地产量和水分利用效率的影响

2.2.1 水分调控与种植模式对人工草地产量的影响

2019 年与 2020 年各茬次间牧草干物质产量(表 2)变化规律基本一致,均表现为第 1 茬>第 2 茬>第 3 茬;相同种植模式下,随着水分亏缺的加剧,牧草产量呈减小趋势;混播牧草(A、B)产量明显高于单播牧草(O),2020 年产量较 2019 年产量略有降低。其中 O、A 和 B 3 种植模式下,2 年间第 1 茬牧草干物质产量占比均最高,分别占 2 年平均总产量的 37.65%,41.92%和 40.85%。2 年间,水分处理(WT)、种植模式(PM)对牧草干物质产量影响极显著($p<0.01$),二者交互效应(WT×PM)对牧草干物质产量[除 2019 年第 2 茬影响显著($p<0.05$)]在 2 年的第 1 茬和第 2 茬均有极显著影响($p<0.01$),第 3 茬和总产量影响不显著($p>0.05$)。2 年间,同一种植模式下,除个别茬次外,W0 与 W1 水分处理间牧草产量差异不显著($p>0.05$),与 W2、W3 之间差异显著($p<0.05$),其中,O 种植模式 2 年平均产量在充分灌水(W0)下最高(15 009.45 kg/hm^2),较 W1、W2 和 W3 分别提升 3.65%,31.38%和 47.84%;A 和 B 种植模式 2 年平均产量在轻亏(W1)处理下分别为 16 543.50,15 908.75 $\text{kg}/$

hm²,较 W0 降幅最小,分别降低 4.14%,2.61%。另外,从 2 年总产量看,A、B 种植模式牧草 2 年平均总产量分

别达 14 811.20,14 393.48 kg/hm²,较 O 种植模式均有显著提升($p<0.05$),分别提升 16.01%,12.74%。

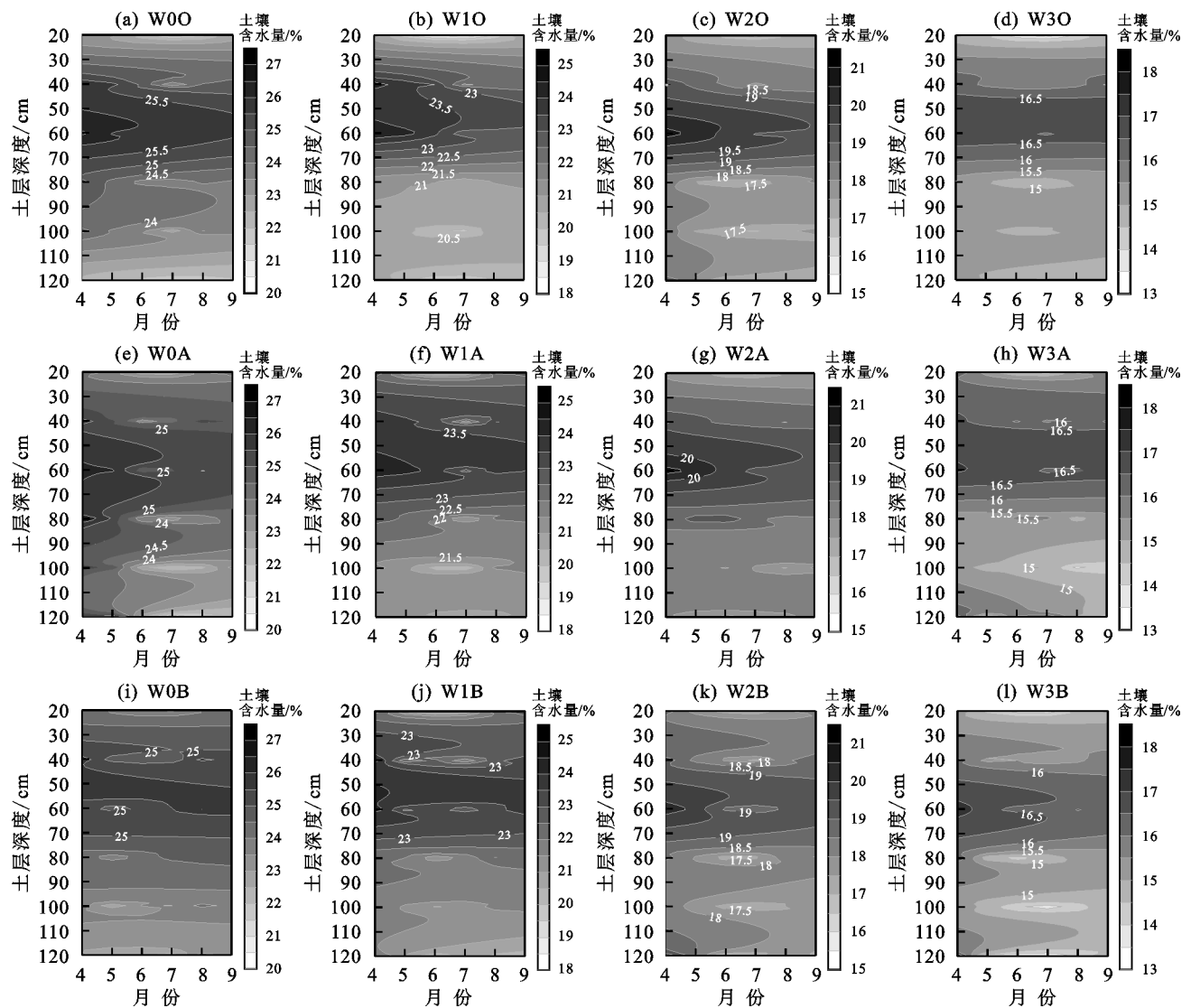


图 2 2020 年牧草生长季不同处理下土壤水分时空分布

表 1 2020 年不同种植模式土壤水分垂直变异性						
种植模式	土层深度/cm	最小值/%	最大值/%	均值/%	标准差	变异系数
红豆草(O)	0—20	13.02	23.50	18.43	3.25	0.176
	20—40	15.51	25.93	20.58	3.68	0.179
	40—60	16.40	26.72	21.49	3.62	0.169
	60—80	14.49	25.23	19.48	3.55	0.182
	80—100	14.50	24.78	19.22	3.37	0.175
红豆草+无芒雀麦(A)	100—120	14.26	22.60	18.62	2.83	0.152
	0—20	13.68	24.24	19.49	3.49	0.179
	20—40	15.78	25.73	20.84	3.52	0.169
	40—60	16.29	26.40	21.44	3.55	0.166
	60—80	14.34	26.65	20.12	3.65	0.181
红豆草+无芒雀麦+长穗偃麦草(B)	80—100	13.62	25.26	19.34	3.47	0.179
	100—120	13.45	26.40	19.36	3.25	0.168
	0—20	13.49	24.41	19.47	3.77	0.193
	20—40	14.99	25.96	20.45	3.88	0.190
	40—60	16.22	26.27	21.19	3.58	0.169
	60—80	14.22	24.86	19.89	3.72	0.187
	80—100	13.71	24.31	19.30	3.59	0.186
	100—120	13.24	24.13	19.03	3.39	0.178

2.2.2 水分利用效率 从 2019—2020 年不同处理下牧草水分利用效率(图 3)可知,2 年间各茬次牧草水分利用效率变化规律基本一致,呈现先增大后减小的变化趋势,且第 1 茬>第 2 茬>第 3 茬,混播牧草水分利用效率明显高于红豆草单播;水分处理、种植模式对牧草水分利用效率有极显著影响($p<0.01$),二者交互效应(除个别茬次外),对牧草水分利用效率影响极显著($p<0.01$);从年平均水分利用效率(图 3d)来看,同一水分调控模式下,各种植模式间水分利用效率表现为 A>B>O,其中 A、B 种植模式 2 年平均水分利用效率较 O 种植模式分别提高 18.64%和 11.19%;相同种植模式下,各水分处理间牧草水分利用效率表现为 W1 最高,其中 W1、W2 和 W3 水分处理 2 年平均水分利用效率较 W0 分别提升 8.84%, 2.87%和 2.54%。可见,在 W1 水分处理下 A 种植模式可有效提升作物产量,减少土壤水分无效蒸发,从而保证较高的水分利用效率。

表 2 不同水分处理下各种植模式牧草干物质产量

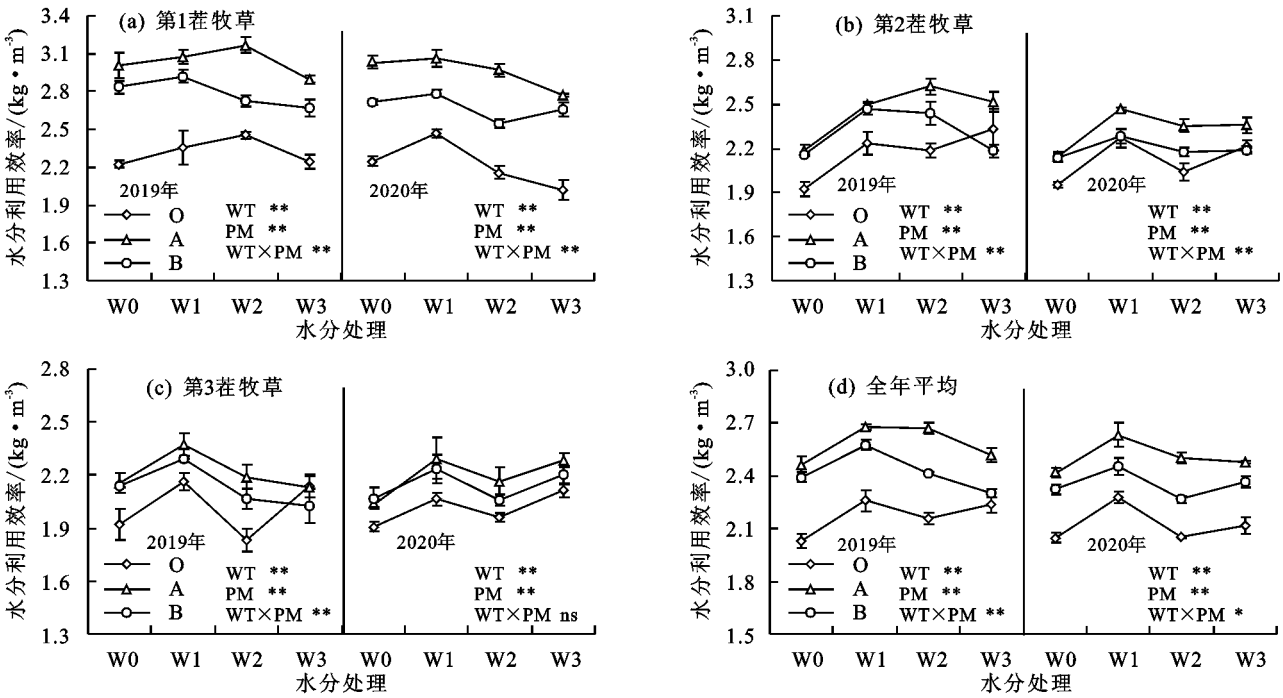
年份	茬次	水分处理	干物质产量/(kg·hm ⁻²)			显著性检验 <i>p</i> 值		
			O	A	B	WT	PM	WT×PM
2019	第 1 茬	W0	5941.2Ca	7487.8Aa	6805.2Ba	402.13**	233.74**	6.96**
		W1	5661.2Ca	7286.8Aa	6586.3Ba			
		W2	4479.1Cb	5955.6Ab	5304.1Bb			
		W3	3651.3Bc	4646.0Ac	4955.4Ac			
	第 2 茬	W0	4919.3Aa	5198.8Aa	5112.3Aa	163.29**	28.83**	3.60*
		W1	4646.3Ba	5059.0Aa	5045.7Aa			
		W2	3900.7Bb	4669.4Ab	4686.3Ab			
		W3	3469.7Bc	3839.8Ac	3514.9ABc			
	第 3 茬	W0	4286.7Ba	4695.4Aa	4517.0ABa	111.18**	16.95**	0.68ns
		W1	4126.9Ba	4378.1ABb	4479.6Aa			
		W2	3402.3Bb	3769.6Ac	3823.9Ab			
		W3	3218.0Ab	3443.4Ad	3463.4Ac			
	合计	W0	15147.2Ca	17382.0Aa	16434.5Ba	325.89**	108.67**	1.52ns
		W1	14434.4Ba	16723.9Ab	16111.6Aa			
		W2	11782.1Bb	14394.6Ac	13814.3Ab			
		W3	10339.0Bc	11929.2Ad	11933.7Ac			
2020	第 1 茬	W0	5846.4Ca	7382.8Aa	6782.8Ba	425.12**	231.20**	4.50**
		W1	5490.3Cb	7072.9Aa	6572.9Ba			
		W2	3988.0Bc	5256.7Ab	5156.7Ab			
		W3	3397.3Cd	4577.3Bc	4877.3Ac			
	第 2 茬	W0	4881.1Aa	5097.6Aa	4960.0Aa	238.46**	26.25**	4.15**
		W1	4585.9Bb	4926.4Aa	4792.1ABa			
		W2	3634.0Bc	4237.4Ab	4364.0Ab			
		W3	3385.2Ad	3679.6Ac	3505.2Ac			
	第 3 茬	W0	4144.2Ba	4595.4Aa	4471.8Aa	126.35**	10.89**	1.47ns
		W1	4095.1Ba	4363.8Aa	4340.9Aa			
		W2	3444.2Bb	3569.6ABb	3787.0Ab			
		W3	3183.1Ac	3300.4Ab	3243.0Ac			
	合计	W0	14871.7Ca	17075.8Aa	16214.6Ba	467.73**	127.57**	2.40ns
		W1	14527.4Cb	16363.1Aa	15705.9Ba			
		W2	11066.2Bc	13063.7Ab	13307.7Ab			
		W3	9965.6Bd	11557.3Ac	11625.5Ac			

注:WT、PM 和 WT×PM 分别表示水分处理、种植模式和二者的交互效应;不同小写字母表示同一种植模式下不同水分处理之间差异显著($p<0.05$);不同大写字母表示同一水分处理下不同种植模式之间差异显著($p<0.05$);* 表示在 $p<0.05$ 水平存在显著差异;** 表示在 $p<0.01$ 水平存在显著差异;ns 表示无显著性差异($p>0.05$)。

2.3 水分调控与种植模式对人工草地品质的影响

2.3.1 水分调控与种植模式对人工草地品质指标的影响 牧草品质优劣直接影响其适口性和家畜生长发育。从 2019—2020 年各水分处理牧草品质指标(表 3)可知,相同种植模式下,随水分亏缺的加剧,2 年间牧草粗蛋白、粗灰分、粗脂肪含量以及相对饲喂价值表现为先增加后减小的趋势;酸性洗涤纤维和中性洗涤纤维含量呈先减小后增大的趋势,即适度水分亏缺(W1)有利于牧草品质的改善。2 年间水分调控、种植模式[除对 2019 年酸性洗涤纤维含量影响显著($p<0.05$)]对牧草粗蛋白、酸性洗涤纤维、中性洗涤纤维、粗灰分、粗脂肪和相对饲喂价值的影响均极显著($p<0.01$),两者交互效应[除 2019 年酸性洗涤纤维和粗脂肪含量不显著($p>0.05$)、2020 年粗灰分和粗脂肪含量不显著($p>0.05$)、2020 年粗蛋白含量显著($p<0.05$)]均对各品质指标表现为极显著影响($p<0.01$)。

2 年中相同水分处理下,粗蛋白含量表现为单播(O)大于混播种植模式(A 和 B),A 和 B 种植模式较 O 种植模式 2 年平均粗蛋白含量分别降低 3.53% 和 7.24%,但 W0 与 W1 水分处理下,O 与 A 种植模式粗蛋白含量差异不显著($p>0.05$);酸性洗涤纤维和中性洗涤纤维含量表现为混播(A 和 B)较单播(O)种植模式有减小的趋势,A 和 B 种植模式较 O 种植模式 2 年平均酸性洗涤纤维含量分别降低 4.40% 和 2.73%,中性洗涤纤维含量分别降低 2.82% 和 2.02%;粗灰分含量、粗脂肪含量和相对饲喂价值基本呈现混播种植模式(A 和 B)大于单播(O)的规律,且在 W1 水分处理下更为明显,A 和 B 种植模式较 O 种植模式 2 年平均粗灰分含量分别提升 18.50% 和 16.58%,粗脂肪含量分别提升 23.19% 和 20.37%,相对饲喂价值分别提升 4.87% 和 3.20%。综上可知,红豆草+无芒雀麦的种植模式(A)在提升牧草品质方面更具优势。



注: WT、PM 和 WT×PM 分别代表水分处理、种植模式和二者的交互效应; * 表示在 $p<0.05$ 水平存在显著差异; ** 表示在 $p<0.01$ 水平存在显著差异; ns 表示无显著性差异 ($p>0.05$)。

图 3 不同水分处理下各种种植模式牧草的水分利用效率

表 3 2019—2020 年不同处理对牧草品质指标的影响

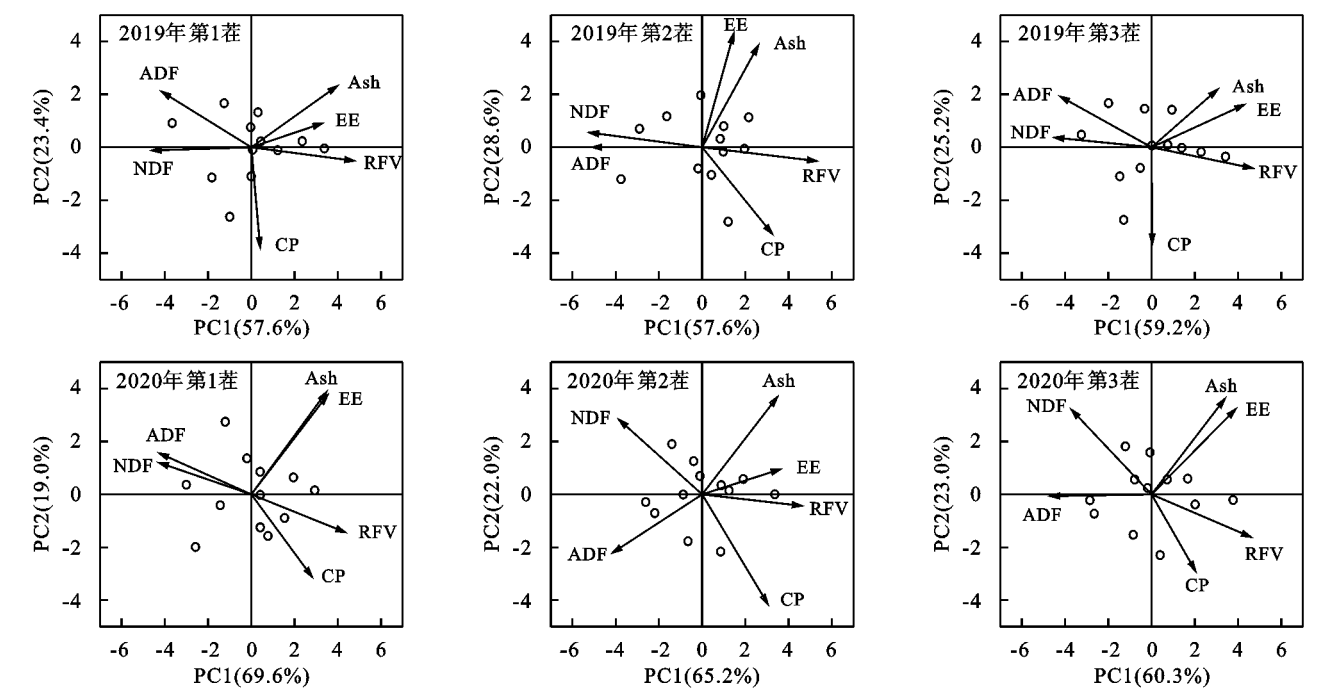
单位: %

年份	处理	CP	ADF	NDF	Ash	EE	RFV
2019	W0O	14.10Ac	38.85Aa	55.66Aa	9.38Cc	2.11Cbc	98.12Cd
	W1O	15.16Ab	36.45Ac	52.34Ac	10.44Ca	2.63Ba	107.85Cb
	W2O	15.27Ab	37.34Ab	53.07Ab	9.69Bb	2.37Bab	105.17Cc
	W3O	15.85Aa	36.70Abc	51.52Ad	8.92Cd	1.88Bc	109.05Aa
	W0A	13.71ABb	37.63Ca	52.96Ca	11.04Ab	2.51Ab	104.72Ac
	W1A	14.86ABa	35.81Ac	49.96Cc	11.85Aa	2.96Aa	113.66Aa
	W2A	14.48Ba	36.78Ab	50.78bCc	10.64Ac	2.69ABb	110.45Ab
	W3A	13.85Bb	37.03Ab	51.16Ab	9.85Bd	2.16Ac	109.28Ab
	W0B	13.19Bb	38.28Ba	54.02Ba	10.37Bbc	2.35Bb	101.76Bc
	W1B	14.46Ba	36.23Ac	50.76Bc	11.30Ba	2.82ABa	111.29Ba
	W2B	13.46Cb	37.35aAb	51.53Bb	10.63Ab	2.85Aa	108.05Bb
	W3B	13.84Bab	36.72Abc	50.70Ac	10.20Ac	2.39Ab	110.77Aa
	WT	30.66**	41.17**	141.91**	183.94**	36.89**	171.74**
	PM	80.41**	5.03*	84.78**	265.46**	22.11**	67.98**
2020	WT×PM	8.48**	2.05ns	6.16**	10.00**	1.65ns	7.23**
	W0O	13.79Ac	38.29Aa	52.40Aa	9.45Bb	2.18Bb	105.16Cd
	W1O	15.66Aa	36.04Ac	49.16ABd	10.69Ba	2.58Ca	115.11Ca
	W2O	14.56Ab	36.15Ac	50.40Ac	9.73Cb	2.18Bb	112.61Bb
	W3O	13.95Ac	37.25Ab	51.67Ab	8.96Bc	1.79Bc	108.05Bc
	W0A	13.72Ac	35.65Ca	51.14Ba	12.23Ab	2.89Ab	111.31Ac
	W1A	15.46Aa	32.52Cc	48.68Bc	12.95Aa	3.46Aa	121.54Aa
	W2A	14.42Ab	34.24Bb	49.74Bb	12.06Ab	2.76Ab	116.62Ab
	W3A	13.67Ac	34.32Cb	50.10Bb	10.93Ac	2.39Ac	115.49Ab
	W0B	12.79Bd	36.87Ba	51.64ABa	12.00Ab	2.80Aa	108.56Bc
	W1B	14.50Ba	33.66Bd	49.58Ac	12.85Aa	3.06Ba	117.67Ba
	W2B	14.02Ab	34.57Bc	50.07ABb	11.87Bb	2.78Aa	115.24Ab
	W3B	13.55Ac	35.27Bb	49.54Cc	10.85Ac	2.28Ab	115.37Ab
	WT	94.15**	128.78**	94.57**	141.43**	55.43**	158.29**
	PM	34.26**	232.73**	28.85**	525.77**	75.84**	118.56**
	WT×PM	2.64*	3.97**	8.20**	2.46ns	1.34ns	5.22**

注: CP 为粗蛋白含量; ADF 为酸性洗涤纤维含量; NDF 为中性洗涤纤维含量; Ash 为粗灰分含量; EE 为粗脂肪含量; RFV 为相对饲喂价值; WT、PM 和 WT×PM 分别表示水分处理、种植模式和二者的交互效应; 不同小写字母表示同一种种植模式下不同水分处理之间差异显著 ($p<0.05$), 不同大写字母表示同一水分处理下不同种植模式之间差异显著 ($p<0.05$); * 表示在 $p<0.05$ 水平存在显著差异; ** 表示在 $p<0.01$ 水平存在显著差异; ns 表示无显著性差异 ($p>0.05$)。

2.3.2 牧草品质指标间的相互关系 为了明确牧草各品质指标间的相互影响,采用主成分分析解释了各茬次牧草品质指标间的相互关系(图 4),各茬次主成分 1 与主成分 2 的累计贡献率均达到 80% 以上,能够解释牧草品质指标的绝大部分信息。各茬次牧草间的品质指标变化规律较为接近,呈现稳定趋势。其中酸性洗涤纤维与中性洗涤纤维含量与其余各品质指标间表现

为负相关关系,且二者与相对饲喂价值间呈现显著的负相关关系,这也间接表明酸性与中性洗涤纤维含量越小,相对饲喂价值越大,牧草适口性越好。各茬次中,酸性与中性洗涤纤维,粗灰分与粗脂肪、粗蛋白与相对饲喂价值均呈显著的正相关关系,且 2 年试验中第 1 茬正相关关系均强于 2,3 茬。而粗蛋白含量与粗灰分、粗脂肪间变化关系无明显联系。



注:PC1、PC2 分别代表主成分 1 和主成分 2。
图 4 基于主成分分析 2019—2020 年各茬次牧草品质指标间的相互关系

2.3.3 各处理牧草产量与品质综合评价 由产量与主成分分析综合得分绘制的二维散点分布图(图 5)可知,各茬次产量均表现为 W0 与 W1 水分条件下 3 种植植模式的产量基本高于产量平均值,且各种植模式间产量基本表现为 A>B>O;从各茬次品质综合得分来看,W1A、W1B 得分均较高,表明一定程度水分亏缺下混播草地能显著改善牧草品质。在 2019 年和 2020 年第 2 茬,W1B 处理综合得分较 W1O 有所降低,表明 W1B 处理在维持牧草优质方面稳定性较差。可见,轻度水分亏缺下,红豆草+无芒雀麦(A)种植模式可以保证牧草高产优质。

3 讨论

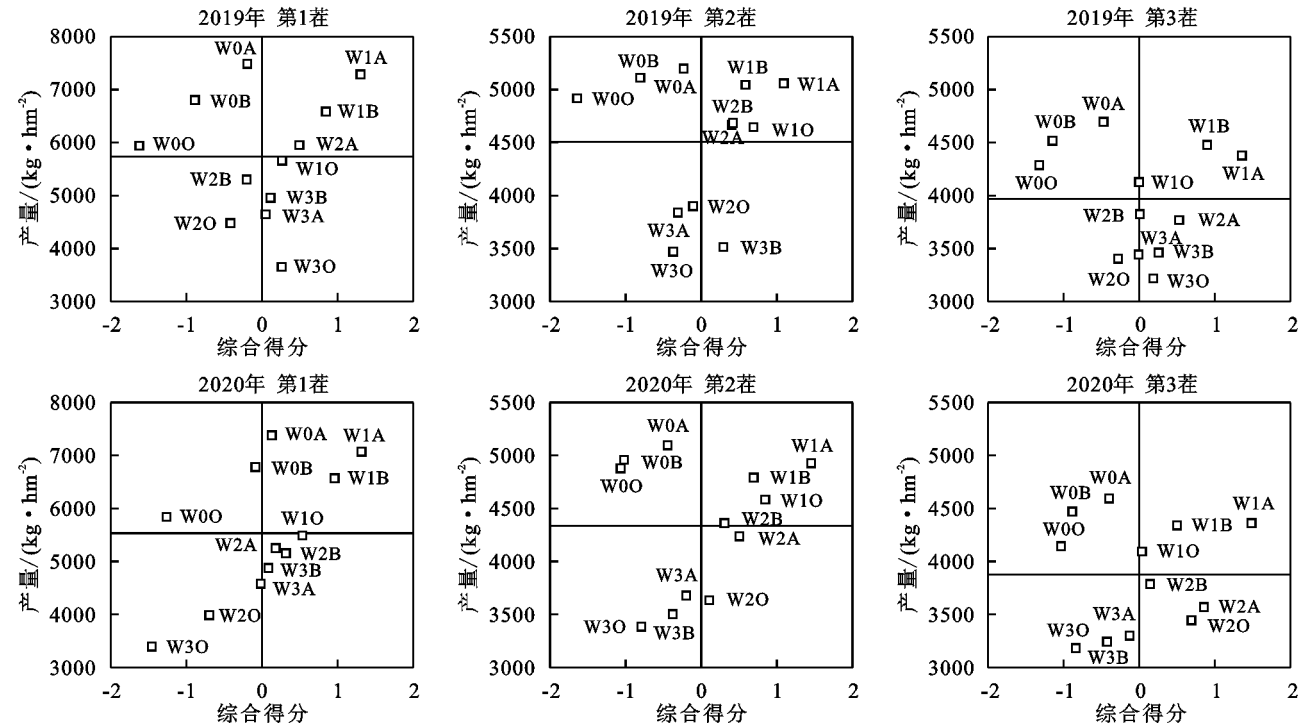
3.1 水分调控与种植模式对人工草地土壤水分的影响 土壤含水量是影响植物生长发育的关键因子,与植株产量品质积累密不可分。土壤水分不足导致土壤养分活性降低,植株产生脱落酸等物质调节气孔开度,影响光合产物积累^[16],同时植株根系吸水速率下降,养分运输速率减缓,同化物在各营养器官间重新分配,以缓解环境胁迫(如植株根冠比的增加即地上

部分生长被抑制,叶片减小),造成自身为营养体的牧草产量品质严重下降。此外,土壤水分过多,土壤通气性改变,土壤养分随水分下渗产生淋溶,不利于作物根系吸收利用^[17],进而影响植株产量品质形成。本研究表明,各水分调控处理 0—40 cm 土壤含水量随生育期推进呈先减小后增大的趋势,这一趋势在中度(W2)与重度(W3)水分亏缺中更为明显,这与陈图峥等^[18]的研究结论相似。这可能是由于 4 月初气温较低,土壤蒸发小且经冬春灌,表层土壤含水量较高,然后随着气温升高,土壤蒸发强烈以及牧草生长对土壤水分的消耗,土壤含水量开始降低,之后随着气温逐渐下降,土壤蒸发减少加之降水补给,土壤含水量又开始有所回升。而 W2 与 W3 水分处理这一趋势更明显则可能是过度亏水抑制了牧草生长发育,导致地表植被覆盖度降低,地表土壤蒸发较强引起。在本研究中,充分灌水(W0)和轻度水分亏缺(W1)下,红豆草单播(O)较 2 种混播种植模式(A 和 B)表层土壤含水量随月份变化更明显,而这一差异在 W2 与 W3 水分亏缺下逐渐减弱,这可能与适当水分条件下混播种植模式加大地表冠层覆盖,改善地表气流风

速,减少土壤水分无效蒸发同时禾草易在地表形成匍匐茎网状结构,保水与贮蓄水效果较好有关,这也间接表明混播中土壤水分无效蒸发减小,从而土壤水分状况、养分活性较单播改善,更多土壤水分、养分将被植株吸收利用,使得混播牧草高产优质。而 W2 与 W3 水分亏缺下单混播种植模式中差异逐渐减弱,可能是严重水分亏缺影响到 3 种植植模式下牧草茎叶生长,地表裸露一直较大,表层土壤含水量均处于较

低状态导致。

本研究还发现,随着牧草生长季推移,40—100 cm 土层土壤含水量呈逐渐减小的变化趋势,这与 Wang 等^[19]研究发现种植苜蓿等高耗水作物会大量消耗土壤储水量,导致深层土壤干燥化的结果相似,同时本研究中牧草整个生长季产量表现出第 1 茬>第 2 茬>第 3 茬,这可能与牧草主根区土壤含水量被逐渐消耗呈减少趋势有关。



注:综合得分为基于主成分分析计算的各处理品质指标的总得分值,其值越大,处理品质越优;图中水平线为各处理产量的平均值线;纵线为各处理综合得分的平均值线。

图 5 2019—2020 年各茬次处理下牧草产量与品质综合得分散点分布

关于土壤水分空间垂直分布,图娜拉等^[20]研究发现,人工苜蓿草地 0—100 cm 土层土壤含水率呈先增大后减小的“S”形变化,这与本研究发现的 0—120 cm 土层各处理土壤水分变化呈先增加后减小之后趋于稳定的变化规律一致;但马涛等^[21]研究发现,紫花苜蓿地土壤水分随土层深度呈先减小后基本稳定的变化趋势,这与本研究结果不同,其原因可能为:(1)本研究进行灌溉,表层土壤有灌水补给,而前人研究为旱作条件且降水较少,对表层土壤补给量不大;(2)与作物类型和年限、土壤质地和温度、地下水等因素不同有关。在紫花苜蓿的研究^[21]中发现,土壤水分变异程度属于中等变异,这与本研究 3 种植植模式下土壤水分均属于中等变异结果相似,且变异系数较大值出现在表层与 60—100 cm 土层土壤,说明该层土壤水分变化活跃。这可能与表层土壤蒸发强烈且受灌水降水补给,波动较大,60—100 cm 土层为红豆草主根分布层,根系吸水较强有关。

3.2 水分调控与种植模式对人工草地产量与水分利用效率的影响

牧草产量是评价人工草地效益最直观的指标之一,牧草产量高低与土壤水分状况息息相关。调亏灌溉是在牧草生育期进行一定程度的水分胁迫,进而作用于牧草茎叶生长发育,使植株叶片气孔导度降低,光合作用受到抑制,影响牧草生物量积累。本研究表明,单混播牧草随着水分亏缺的加剧,产量均呈现逐渐减小的变化趋势,但轻度水分亏缺与充分灌水间产量差异不显著($p>0.05$),水分利用效率则表现为先增大后减小的变化规律,在轻度水分亏缺下水分利用效率较高,这与时学双等^[22]研究结果基本一致,即适宜范围内水分亏缺,并不显著降低作物产量,并且有利于提升植株的水分利用效率。这是由于适宜水分胁迫下,植株活性氧积累量较少,并未破坏作物光合器官功能,反而会激励植株的抗氧化防御机制,使其具备抗逆性,以及脯氨酸等物质的渗透调节作用,使

得细胞结构稳定,气孔开放,保证作物正常光合干物质积累,同时植株根系吸水并未受阻,从而表现出较高的产量与水分利用效率。此外,本研究表明,混播牧草的产量、水分利用效率较单播红豆草均有显著提升,且 3 种植模式下产量、水分利用效率均表现为 $A>B>O$,究其原因可能为:(1)混播牧草中豆科植物根瘤具有固氮能力,而禾本科对氮素的需求更敏感,吸收利用了豆科植物固定的氮素,促使豆科牧草固定更多氮素满足自身需求,两者形成竞争互进关系,使得混播草地增产;(2)混播种植模式中,豆禾牧草占据不同生态位,形成更合理的冠层结构,光热资源被充分利用,地表无效蒸发被抑制,水分不易散失,加之豆禾牧草深浅根系搭配,有效水资源得以充分吸收,使得混播草地水分利用效率增加,这与汪精海等^[23]研究结果相似。

3.3 水分调控与种植模式对人工草地品质的影响

牧草营养品质是植株对具体生态与栽培条件的最终表现,同时受遗传与环境共同作用。牧草营养品质的综合价值由其营养成分的种类和数量决定,其中粗蛋白与纤维含量是 2 项重要指标,粗蛋白含量反映牧草满足牲畜蛋白质需求的能力,纤维含量影响牧草的采食量与瘤胃降解率,其含量越高,牧草适口性越差。此外,牧草粗灰分含量大部分为钙、磷、钾等元素的氧化物,其值与土壤、气候条件密切相关,反映植株含矿物质的量^[24],粗脂肪是畜禽热能的重要来源,需量少但不可或缺。本研究表明,随着水分亏缺的加剧,单混播种植模式下,牧草粗蛋白、粗灰分、粗脂肪含量和相对饲喂价值基本表现出先增加后减小的变化趋势,而酸性和中性洗涤纤维含量呈现先逐渐减小后增大的变化规律,这与汪精海等^[23]研究调亏灌溉下燕麦与箭筈豌豆混播品质结论相似,而与寇丹等^[25]发现滴灌下紫花苜蓿粗蛋白含量随水分亏缺加剧逐渐增大的结论不一致,可能原因为:(1)与牧草本身的生物学特性有关,对环境胁迫的适应性不同;(2)试验地点的气候、土壤类型存在差异;(3)试验地初始的土壤水分、养分状况不同且控水处理存在差异,但都表明适度的水分胁迫有利于牧草品质的积累。此外,本研究得出,相同水分处理下,牧草粗蛋白含量表现出红豆草单播大于混播种植模式,具体为 $O>A>B$,但在 W_0 与 W_1 水分处理下 O 与 A 种植模式粗蛋白含量差异不显著($p>0.05$),这与前人^[26]研究发现豆禾混播较鸭茅单播提升牧草粗蛋白含量结果有所不同,这可能是由于对照不同,前人研究以禾本科鸭茅为对照,本试验以豆科植物红豆草为对照,而豆科

牧草的粗蛋白含量通常高于禾本科牧草,导致豆禾混播后粗蛋白含量较单播有所差异。本研究中,3 种植模式下酸性和中性洗涤纤维含量表现为 $A<B<O$,粗灰分含量、粗脂肪含量和相对饲喂价值表现为 $A>B>O$,即混播显著提升了牧草的品质,这与混播种植模式中豆禾牧草品质互补,相互促进有着密切联系。主成分分析载荷图(图 4)也进一步验证了牧草各品质指标间的相互关系,其中酸性和中性洗涤纤维含量与其余品质指标间均表现为负相关,酸性与中性洗涤纤维为负向指标,其余品质指标为正向指标,且各茬次间品质指标变化基本稳定,这与 Zhang 等^[27]研究结果相似。本研究得出,轻度水分亏缺下($65\%\sim 75\% \theta_{FC}$)红豆草与无芒雀麦混播(A)可充分发挥人工草地高产优质节水综合效益。但由于成本以及前期投资的限制,当前关于精准灌溉的实施主要应用于经济作物^[28],而将其应用于牧草较少,近年来随着人们对于高品质肉类的大量需求,推动畜牧业大力发展,使得精准灌溉应用于牧草成为可能,即利用田间布设传感器监测土壤及植物相关参数,进一步传输到计算机控制系统实施灌溉决策,实现适时适量精准灌溉,并且从长期节水效益及生态保护方面考虑,精准灌溉实施意义重大。

4 结论

(1)0—40 cm 土层土壤含水量随生育期推进呈先减小后增大的趋势,且 W_2 、 W_3 水分处理下该趋势更明显,40—100 cm 土层土壤含水量则呈逐渐减小趋势,100—120 cm 土层土壤含水量波动较小。土壤含水量随土层深度呈先增加后减小最后趋于稳定的趋势。变异系数分析发现,3 种植模式下,土壤含水量均属于中等变异,其中 0—40,60—100 cm 土层土壤含水量变化活跃。

(2)牧草产量表现为第 1 茬>第 2 茬>第 3 茬,且 O 、 A 和 B 种植模式的第 1 茬产量分别占年总产量的 37.65%,41.92%和 40.85%。相同种植模式下,随着水分亏缺程度的加剧,产量逐渐减小,但 W_0 与 W_1 水分处理,产量差异不显著, WUE 呈先增大后减小变化趋势,且在 W_1 下最高。 A 和 B 较 O 种植模式的平均年产量分别提高 16.01%和 12.74%,平均 WUE 分别提升 18.64%和 11.19%。

(3)混播模式较单播提升牧草品质,适度水分亏缺可改善牧草品质。相同种植模式下,随水分亏缺的加剧,牧草 CP、Ash、EE 和 RFV 基本表现为先增大后减小趋势,ADF 与 NDF 含量呈先减小后增大的趋势。 A 和 B 种植模式较 O 种植模式 2 年平均 ADF 分别降低 4.40%和 2.73%,NDF 分别降低 2.82%和

2.02%, CP 分别降低 3.53% 和 7.24%, 但 W0 与 W1 水分处理, O 与 A 种植模式 CP 差异不显著。A 和 B 种植模式较 O 种植模式 2 年平均 Ash 分别提升 18.50% 和 16.58%, EE 分别提升 23.19% 和 20.37%, RFV 分别提升 4.87% 和 3.20%。

结合主成分分析综合评价得出, 轻度水分亏缺下红豆草与无芒雀麦混播(W1A)可同时实现高产、优质、高效, 为河西走廊地区较为合理的水分调控与种植模式。

参考文献:

- [1] 宋十妹. 河北坝上天然草地牧草青贮调制技术研究[D]. 河北 保定: 河北农业大学, 2019.
- [2] 王小燕, 张彩军, 蒲强胜, 等. 人工草地建植对甘南高寒草甸草地生产力及土壤理化特征的影响[J]. 草地学报, 2022, 30(2): 288-296.
- [3] 张辉辉, 师尚礼, 武蓓, 等. 苜蓿与 3 种多年生禾草混播效应研究[J]. 草业学报, 2022, 31(2): 159-170.
- [4] 苏贝贝, 张英, 道日娜. 4 种豆科植物根际土壤真菌群落特征与土壤理化因子间相关性分析[J]. 草地学报, 2021, 29(12): 2670-2677.
- [5] 李京蓉. 青海省六种禾本科牧草抗逆性研究及综合评价[D]. 西宁: 青海师范大学, 2018.
- [6] Cupina B, Vujic S, Krstic D, et al. Performance of legume-grass mixtures in the West Balkan region[J]. Acta Agriculturae Scandinavica, Section B-Soil and Plant Science, 2017, 67(1): 1-11.
- [7] 汪精海, 李广, 银敏华, 等. 调亏灌溉对高寒荒漠区人工混播草地土壤环境与牧草生长的影响[J]. 草业学报, 2022, 31(1): 95-106.
- [8] 王宇祥, 刘廷玺, 段利民, 等. 科尔沁不同类型沙丘土壤水分时空变化特征及其环境影响因子[J]. 水土保持学报, 2020, 34(6): 125-134, 142.
- [9] 邹慧, 高光耀, 傅伯杰. 干旱半干旱草地生态系统与土壤水分关系研究进展[J]. 生态学报, 2016, 36(11): 3127-3136.
- [10] 刘小飞, 费良军, 段爱旺, 等. 调亏灌溉对冬小麦产量和品质及其关系的调控效应[J]. 水土保持学报, 2019, 33(3): 276-282, 291.
- [11] 安昊云, 王皓, 贾倩民, 等. 禾豆混播与调亏灌溉对河西地区饲草产量、品质和水分利用的影响[J]. 草业科学, 2021, 38(1): 122-135.
- [12] 王海青, 田育红, 黄薇霖, 等. 不同灌溉量对内蒙古人工草地主要牧草产量和水分利用效率的影响[J]. 生态学报, 2015, 35(10): 3225-3232.
- [13] 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.
- [14] 李玉忠. 河西走廊草原生态置换条件和潜力及对策研究[J]. 农业现代化研究, 2011, 32(3): 332-335.
- [15] 杨超. 河西走廊农业发展的现状与转型困境分析[J]. 中国集体经济, 2020(4): 26-27.
- [16] 邹慧, 高光耀, 傅伯杰. 干旱半干旱草地生态系统与土壤水分关系研究进展[J]. 生态学报, 2016, 36(11): 3127-3136.
- [17] 黄萍, 纪拓, 岳松青, 等. 垂直孔施有机物对土壤硝酸盐代谢及苹果叶片光合作用的影响[J]. 土壤学报, 2018, 55(5): 1276-1285.
- [18] 陈图峥, 李艳红, 李发东, 等. 玛纳斯河流域不同绿洲生态系统棉田土壤水分—盐分—养分空间变异特征[J/OL]. 农业资源与环境学报: 1-13[2022-04-09]. DOI: 10.13254/j.jare.2021.0591.
- [19] Wang L L, Xie J H, Luo Z Z, et al. Forage yield, water use efficiency, and soil fertility response to alfalfa [J]. Agricultural Water Management, 2021, 243: e106415.
- [20] 图娜拉, 巴音青克乐, 莫日根, 等. 毛乌素沙地不同植被类型土壤水分特征研究[J]. 人民黄河, 2020, 42(增刊 1): 63-64, 72.
- [21] 马涛, 吕文强, 李泽霞, 等. 黄土高原丘陵沟壑区轮作休耕模式下 5 种土地利用方式土壤剖面水分分布特征[J]. 草业学报, 2020, 29(7): 30-39.
- [22] 时学双, 李法虎, 闫宝莹, 等. 不同生育期水分亏缺对春青稞水分利用和产量的影响[J]. 农业机械学报, 2015, 46(10): 144-151, 265.
- [23] 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.
- [24] 马静, 柴沙驼, 孙璐, 等. 青海地区不同海拔高度天然牧草与牦牛乳常规营养指标的相关性分析[J]. 动物营养学报, 2021, 33(8): 4502-4510.
- [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] Kyriazopoulos A P, Abraham E M, Parissi Z M, et al. Forage production and nutritive value of *Dactylis glomerata* and *Trifolium subterraneum* mixtures under different shading treatments[J]. Grass and Forage Science, 2013, 68(1): 72-82.
- [27] Zhang J, Iwaasa A D, Han G D, et al. Utilizing a multi-index decision analysis method to overall assess forage yield and quality of C3 grasses in the western Canadian prairies[J]. Field Crops Research, 2018, 222: 12-25.
- [28] 海涛, 陆猛, 周文杰, 等. 基于 LPWAN 物联网与专家系统的果园精准灌溉研究[J]. 中国农村水利水电, 2021(9): 128-133.