

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

汪精海^{1,2}, 李广¹, 余晓雄³, 康燕霞², 银敏华², 齐广平², 马彦麟²

(1.甘肃农业大学林学院,兰州 730070;2.甘肃农业大学水利水电工程学院,
兰州 730070;3.甘肃省水利水电勘测设计研究院有限责任公司,兰州 730070)

摘要:为获得高寒荒漠区兼顾牧草产量和品质的较优灌水调控模式,推动微喷灌和调亏灌溉技术在人工草地生产中的应用,采用大田试验对比分析了 2 种植模式(燕麦单播和燕麦+箭筈豌豆混播)与 7 种水分调控(拔节期轻度亏水 65%~75%,拔节期中度亏水 55%~65%,拔节期重度亏水 45%~55%,开花期轻度亏水 65%~75%,开花期中度亏水 55%~65%,开花期重度亏水 45%~55%,以全生育期充分灌水 75%~85%为对照)对牧草产量、品质(茎叶比、粗蛋白含量与产量、酸性洗涤纤维 ADF 含量和中性洗涤纤维 NDF 含量)和水分利用效率的影响,并采用 AHP 层次分析法和熵权法对牧草多指标赋权,基于 TOPSIS 模型构建评价体系,以筛选较优水分调控模式。结果表明:(1)随水分亏缺程度的加剧,牧草产量呈降低趋势,同一灌水条件下,燕麦+箭筈豌豆混播的干草产量(7 811.1~14 490.1 kg/hm²)高于燕麦单播(7 022.3~12 242.7 kg/hm²)。 (2)同一种植模式下,随灌水亏缺程度的提高,NDF 和 ADF 含量呈先减小后增大的趋势,粗蛋白含量、产量和牧草 WUE、IWUE 呈先增大后减小的趋势。 (3)综合评价得出,燕麦+箭筈豌豆混播在拔节期充分灌水+开花期中度亏水条件下可获得较优的节水增产提质效果(干草产量、粗蛋白含量、WUE 和 IWUE 分别为 14 330.2 kg/hm²,10.66%,31.49 kg/(hm²·mm)和 80.96 kg/(hm²·mm)),是高寒荒漠草原区微喷灌人工草地适宜的生产管理模式。

关键词:调亏灌溉;微喷灌;产量;品质;水分利用效率;高寒荒漠区

中图分类号:S275.6

文献标识码:A

文章编号:1009-2242(2021)04-0200-08

DOI:10.13870/j.cnki.stbcbx.2021.04.028

Effects of Regulated Deficit Micro-sprinkler Irrigation on the Yield, Quality and Water Utilization of Artificial Grassland in Alpine Desert Area

WANG Jinghai^{1,2}, LI Guang¹, YU Xiaoxiong³, KANG Yanxia²,

YIN Minhua², QI Guangping², MA Yanlin²

(1.College of Forestry of Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070; 2.College of Water Conservancy and Hydropower Engineering of Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070; 3.Gansu Water Resources and Hydroelectric Investigation, Design & Research Institute Corporation Limited, Lanzhou 730070)

Abstract: The purpose of this research was to explore an irrigation pattern taking into account the yield and quality of forage in the alpine desert area, and to promote the application of micro-sprinkler irrigation and regulated deficit irrigation in artificial grassland production. A field experiment was conducted to compare and analyze the effect of 2 cropping patterns and 7 irrigation patterns on forage yield, quality (stem-leaf ratio, crude protein content and yield, acid detergent fiber content, and neutral detergent fiber content) and water use efficiency. The 2 cropping patterns were mono-sowing oats and mixed sowing of oats and peas, and the 7 irrigation patterns were mild water deficit at jointing stage (65%~75%), moderate water deficit at jointing stage (55%~65%), severe water deficit at jointing stage (45%~55%), mild water deficit at flowering stage (65%~75%), moderate water deficit at flowering stage (55%~65%), severe water deficit at flowering stage (45%~55%), and full irrigation during the whole growth stages (75%~85%). In addition, the methods of analytic hierarchy process and entropy weight were used to empower the multiple indicators of

收稿日期:2021-01-23

资助项目:国家重点研发计划项目“水资源高效利用专项”(2016YFC0400304);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-2020-07);甘肃省高校创新基金项目(2020B-131,2019A-57)

第一作者:汪精海(1981—),男,博士研究生,主要从事水土保持与荒漠化防治研究。E-mail: wangjh@gsau.edu.cn

通信作者:李广(1971—),男,教授,博士生导师,主要从事水土保持与荒漠化防治研究。E-mail: lig@gsau.edu.cn

forage, and an evaluation system was constructed based on the TOPSIS model to obtain the optimal irrigation pattern. The results showed that: (1) With the increasing of water deficit, the forage yield showed a decreasing trend. Under the same irrigation condition, the forage yields of mixed sowing of oats and peas (7 811.1~14 490.1 kg/hm²) were higher than those of mono-sowing oats (7 022.3~12 242.7 kg/hm²). (2) Under the same cropping pattern, the contents of NDF and ADF decreased first and then increased with the increasing of irrigation deficit. However, the content and yield of crude protein, WUE, and IWUE increased first and then decreased with the increasing of irrigation deficit. (3) The comprehensive evaluation showed that mixed sowing of oats and peas with full irrigation at jointing stage and moderate water deficit at flowering stage could achieve better water-saving, yield-increasing, and quality-improving effects (forage yield, crude protein content, WUE, and IWUE were 14 330.2 kg/hm², 10.66%, 31.49 kg/(hm²·mm), and 80.96 kg/(hm²·mm), respectively). It was a suitable production management pattern of artificial grassland using micro-sprinkler irrigation in alpine desert grassland.

Keywords: regulated deficit irrigation; micro-sprinkler irrigation; yield; quality; water use efficiency; alpine desert area

高寒荒漠草原区主要位于青藏高原,降水稀少,水资源匮乏,天然草地产量低而不稳,且人工草地仍普遍采用传统淹灌的粗放管理模式,草地生产力与水资源利用率低下,严重制约着当地畜牧业和区域可持续发展^[1]。禾本科与豆科牧草混播不仅可以提升牧草产量和品质,而且能提高土壤肥力,并改善土壤环境^[2],现已发展成为高寒区人工草地建设的主要种植模式。青藏高原地区人工草地以抗旱、耐寒、耐碱的燕麦和箭筈豌豆为主,常采用燕麦单播或与箭筈豌豆混播的种植模式^[3]。随着燕麦在高寒区的大面积种植,采用豆+禾混播种植模式发展高效节水灌溉技术,成为挖掘区域牧草生产潜力和促进人工草地绿色高效生产的重要途径。微喷灌是一种新型节水灌溉方式,采用微喷带将灌溉水均匀喷洒在田间,具有设施结构简单、造价便宜、易于安装和拆卸等优点^[4]。调亏灌溉通过对作物某些生育阶段施加一定程度的水分胁迫,利用作物自身的适应性以达到节水增产的目的^[5]。微喷灌结合调亏灌溉可进一步减少农田水分损失,提高水资源生产力。

目前,针对高寒区燕麦单播和燕麦+箭筈豌豆混播的研究主要涉及品种筛选^[6]、混播比例、种植密度^[7]、施肥水平^[8]、生产性能、营养价值^[9]以及光能转化效率^[10]等方面,综合考虑水分、产量、品质并对其进行定量评价的相关研究较少。此外,调亏灌溉技术主要应用于果树、大田作物和经济作物,在人工草地中的研究较为匮乏,尤其是针对高寒荒漠区的相关研究尚未开展。鉴于此,本文以燕麦单播和燕麦+箭筈豌豆混播为研究对象,探究微喷灌条件下不同调亏灌溉模式对人工草地产量、品质、耗水量及水分利用效率的影响,并采用AHP层次分析法和熵权法对各个指标进行综合赋权,利用TOPSIS模型构建综

合评价体系,获得产量与品质耦合、生产与生态(节水)耦合的调亏灌溉模式,以期为实现高寒荒漠区人工草地节水、增产、高效和绿色生产提供理论依据和技术支撑。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验于2019年在青海省乌兰县茶卡镇金泰牧场(99°18'E,36°42'N)进行。该区海拔3 150 m,年平均降水量159.3 mm,年蒸发量2 074.1 mm,年平均气温3.5℃,最高月平均气温14.4℃,最低月平均气温-12.4℃,极端最高气温34.0℃,极端最低气温-27.7℃,属典型高原大陆性气候。试验地土壤类型为沙壤土,土壤容重1.49 g/cm³,田间持水量20.38%。耕层土壤(0—30 cm)基础肥力为:有机质含量19.35 g/kg,铵态氮含量29.32 mg/kg,硝态氮含量64.58 mg/kg,速效磷含量0.83 mg/kg,速效钾含量25.86 g/kg,pH 8.35。

试验区气象监测数据表明,牧草生育期内(2019年5月18日至9月15日)降水量为212.2 mm,主要集中在7、8月(共127.8 mm),占全生育期降水总量的60.2%;牧草生育期最高、最低和平均温度分别为19.6、4.9、13.0℃,最高月均气温出现在8月(15.1℃),最低月均气温出现在5月(9.6℃)(图1)。

1.2 试验设计

供试材料:燕麦“青引3号”和箭筈豌豆“西牧324”草种由青海省农林科学研究院提供。

微喷灌材料:大禹节水集团股份有限公司提供,内径40 mm,微喷带出水孔间距0.1 m,额定工作压力0.15~0.20 MPa。

微喷带铺设与牧草种植:试验小区面积6 m×8 m,每小区铺设3条微喷带(间距1 m)。燕麦单播播种量

150 kg/hm², 燕麦+箭筈豌豆混播播种量为 6:4(参照当地牧民经验), 即燕麦 112.5 kg/hm², 箭筈豌豆 75 kg/hm², 燕麦和箭筈豌豆均于 2019 年 5 月 18 日播种, 人工条播, 播深 3~5 cm, 行距 20 cm。

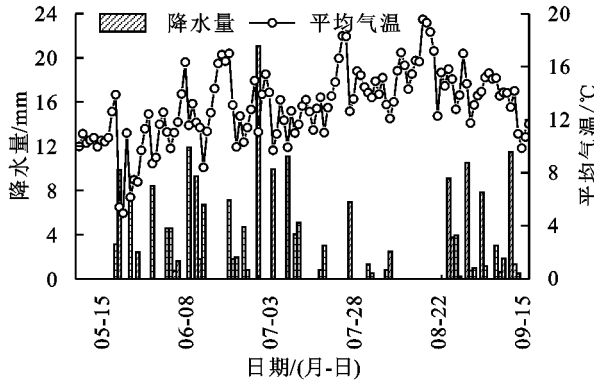


图 1 试验期间日平均气温与降水量

试验设计: 设置种植模式和水分调控 2 个因素, 其中种植模式为燕麦单播(D)和燕麦+箭筈豌豆混播(H); 水分调控(以田间持水量的百分比计土壤水分上下限, 灌溉计划湿润层深度取 60 cm, 表 1), 即在燕麦拔节期和开花期分别设轻度亏水 W1(65%~75%)、中度亏水 W2(55%~65%)和重度亏水 W3(45%~55%), 以全生育期充分灌水 W0(CK, 75%~85%)为对照。试验共 14 个处理, 每个处理设 3 次重复, 合计 42 个小区, 随机区组排列, 各小区之间间隔 1 m, 边缘设有 2 m 深塑料膜以防止水分互渗, 试验地四周布设 2 m 宽同种牧草保护带。肥料(尿素 75 kg/hm², 磷酸二铵 225 kg/hm²)于牧草播种前一次性基施, 除草、病虫害防治等田间管理措施同当地一般人工草地。为了保证在拔节期各小区土壤水分状况达到试验设计水平, 进入拔节期前 1 周开始控水。在牧草播种后至拔节期前 1 周, 各处理均采用充分灌水, 且各处理播种前的初始土壤含水率无显著差异。

表 1 微喷灌条件下调亏灌溉试验灌水上下限

处理	单位: %	
	拔节期	开花期
CK	75~85	75~85
C1	65~75	75~85
C2	55~65	75~85
C3	45~55	75~85
C4	75~85	65~75
C5	75~85	55~65
C6	75~85	45~55

注: 表中“~”前后数字分别表示土壤水分控制下限和上限(土壤质量含水量占田间持水量的百分比); 后文中所提到的“不同生育时期调亏灌溉”均特指在燕麦的“拔节期和开花期”进行调亏灌溉。

1.3 样品采集与指标测定

1.3.1 土壤水分和灌水量 将土壤墒情仪(IST.

HRG C-16S, 北京东方润泽生态科技股份有限公司)于播种前埋设在试验小区内, 实时监测土壤含水量变化(可通过终端远程查看), 计划湿润层深度为 60 cm(燕麦根系较浅, 此深度可满足试验要求), 分 3 层(0-20, 20-40, 40-60 cm)测定。利用烘干法定定期对土壤水分含量进行校准。灌水前后与降水后适时加测。土壤含水量计算公式为:

$$\beta_i = \frac{(m_{i1} - m_{i2})}{m_{i2}} \times 100\% \quad (1)$$

式中: β_i 为 i 层土壤质量含水率(%); m_{i1} 为 i 层田间自然湿土重(g); m_{i2} 为 i 层烘干土重(g)。

当实测土壤含水量下降至表 1 中水分调控下限时, 立即进行灌水, 当达到水分调控上限时停止灌水。利用干管和支管输水, 配以支管上的水表和阀门严格灌水, 详细记录每次灌水时间和灌水量。灌水量采用公式(2)计算确定:

$$M = 10RH(\beta_j - \beta_i) \quad (2)$$

式中: M 为灌水量(mm); R 为计划湿润层土壤容重(g/cm³); H 为计划湿润层深度(cm); β_i 为灌水前土壤实际含水率(%); β_j 为设计目标土壤含水量上限(%)。

1.3.2 牧草产量 在燕麦乳熟期进行刈割, 采用鲜草产量和干鲜比结合的方法测定干草产量。在每个小区对角线中心处选取 2 m×2 m 大样方, 单播各处理刈割后称取燕麦鲜重 M_1 (kg); 混播各处理将燕麦和箭筈豌豆分离后分别称取鲜重。在大样方旁随机选取 50 cm×50 cm 的小样方, 刈割后称取牧草鲜重 M_2 (g), 然后将小样方鲜草装入信封(混播处理中燕麦和箭筈豌豆分别装袋), 放入烘箱中 105 °C 杀青 30 min, 75 °C 烘干至恒重, 待冷却后称取干质量 M_3 (g), M_3/M_2 即为牧草干鲜比, 干草产量 Y (kg/hm²) 计算公式为:

$$Y = \frac{M_1 \times M_3}{M_2} \times 2500 \quad (3)$$

1.3.3 牧草品质 干重茎叶比: 各小区随机选取 10 株长势相近的牧草(混播处理为燕麦和箭筈豌豆各取 10 株), 茎叶分离后分别装入信封, 放入烘箱中 105 °C 杀青 30 min, 75 °C 烘干至恒重, 待冷却后分别称取茎、叶干质量, 计算茎叶比。

粗蛋白含量(crude protein, CP, %)和粗蛋白产量(crude protein yield, CPY, kg/hm²): 将植株地上部分杀青、烘干、粉碎后, 过 1 mm 筛, 利用凯氏定氮仪(Kjeltec TM 8400)测定粗蛋白含量(混播处理中燕麦和箭筈豌豆分别测定);

粗蛋白产量计算式为:

$$CPY = CP \times Y \quad (4)$$

式中: CPY 为粗蛋白产量(kg/hm²); CP 为粗蛋白含量(%); Y 为干草产量(kg/hm²)。

酸性洗涤纤维(acid detergent fiber, ADF)含量和中性洗涤纤维(neutral detergent fiber, NDF)含量采用 Van Soest 法通过半自动纤维分析仪(F800)测定。

1.3.4 田间耗水量和水分利用效率 田间耗水量(ET)计算公式为:

$$ET = 10 \sum_{i=1}^n \gamma_i H_i (\theta_{i1} - \theta_{i2}) + M + P_0 + K \quad (5)$$

式中: i 为土层编号; n 为总土层数; γ_i 为第 i 层土壤干容重(g/cm^3); H_i 为第 i 层土壤厚度(cm); θ_{i1} 和 θ_{i2} 分别为第 i 层土壤时段初和时段末的含水率(%); M 为时段内灌水量(mm); P_0 为有效降水量(mm); K 为时段内地下水补给量。试验地地下水埋深 >5 m, K 值忽略不计。

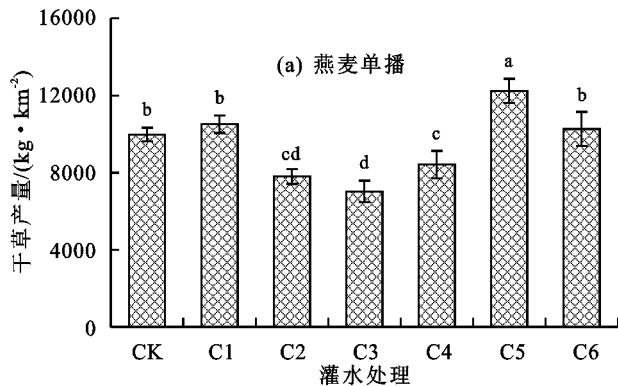
$$\text{水分利用效率: } WUE = Y/ET \quad (6)$$

$$\text{灌溉水利用效率: } IWUE = Y/I \quad (7)$$

式中: Y 为牧草产量(kg/hm^2); ET 为总耗水量(mm); I 为灌水量(mm)。

1.4 数据处理

采用 Microsoft Excel 2010 进行数据整理,利用



注:不同小写字母表示各处理产量差异显著($P < 0.05$)。

图2 调亏灌溉对燕麦单播及燕麦+箭筈豌豆混播干草产量的影响

2.2 调亏灌溉对人工草地牧草品质的影响

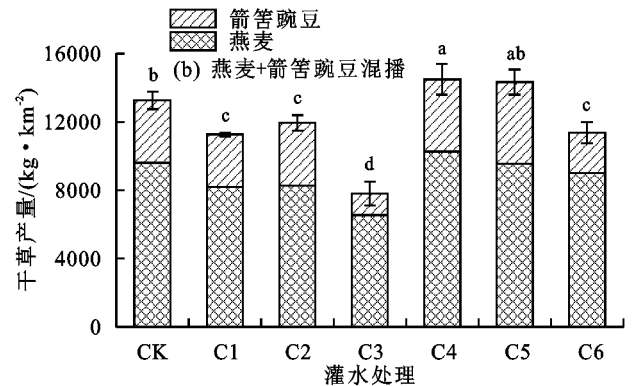
2.2.1 不同生育时期调亏灌溉对牧草粗蛋白含量及产量的影响 不同水分调亏显著影响牧草粗蛋白含量及产量(表2)。单播种植模式下,随着调亏程度的加重,粗蛋白含量及产量呈先增加后减小的趋势,在C5处理下达到最高值(分别为8.90%和1091.8 kg/hm^2),且显著高于其他处理($P < 0.05$),CK处理的粗蛋白含量最低(5.53%),C3处理的粗蛋白产量最低(441.5 kg/hm^2)。混播牧草粗蛋白含量及产量表现为随拔节期水分亏缺程度的加重,燕麦粗蛋白含量呈先增加后减小的趋势,箭筈豌豆的粗蛋白含量逐渐降低,而开花期不同水分调亏条件下燕麦及箭筈豌豆的粗蛋白含量差异均不显著($P > 0.05$)。混播种植模式下牧草粗蛋白总含量在C2处理下最高(11.18%),与C5处理差异不显著;牧草粗蛋白总产

量在C5处理下最高(1526.8 kg/hm^2),C3处理下最小(712.2 kg/hm^2)。同一调亏灌溉条件下,与单播相比,混播牧草的粗蛋白含量平均增加2.92%,提升幅度为42.0%;粗蛋白产量平均增加534.7 kg/hm^2 ,提升幅度为80.4%。

2 结果与分析

2.1 调亏灌溉对人工草地干草产量的影响

图2为不同调亏灌溉模式下燕麦单播和燕麦+箭筈豌豆混播人工草地的干草产量。在相同种植模式下,不同生育时期水分调亏对单播燕麦干草产量影响显著,随着水分亏缺程度的加重,干草产量呈递减趋势,其中C5处理的干草产量最高(12242.7 kg/hm^2),显著高于CK处理,C1和C6处理的干草产量高于CK处理,但差异不显著($P > 0.05$)。混播各处理的干草产量表现为C4 $>$ C5 $>$ CK $>$ C2 $>$ C1 $>$ C6 $>$ C3,其中C4处理与C5处理间差异不显著,但显著高于其他处理。与CK处理相比,C5处理的干草产量提高8.1%。同一水分亏缺条件下,混播处理的干草产量高于单播处理,前者为7811.1~14490.1 kg/hm^2 ,后者为7022.3~12242.7 kg/hm^2 。



量在C5处理下最高(1526.8 kg/hm^2),C3处理下最小(712.2 kg/hm^2)。同一调亏灌溉条件下,与单播相比,混播牧草的粗蛋白含量平均增加2.92%,提升幅度为42.0%;粗蛋白产量平均增加534.7 kg/hm^2 ,提升幅度为80.4%。

2.2.2 不同生育时期调亏灌溉对牧草中性洗涤纤维(NDF)及酸性洗涤纤维(ADF)含量的影响 由表3可知,不同水分调亏对燕麦单播NDF含量的影响总体表现为拔节期水分亏缺 $>$ 开花期水分亏缺,且随水分亏缺程度的增加,NDF含量呈先减小后增大的趋势。CK处理NDF含量最高(50.67%),C5处理NDF含量最低(36.98%)。ADF含量在C4处理下最低(22.95%),但与C5处理无差异显著($P > 0.05$)。拔节期3种水分调亏处理的NDF含量无显著差异。

表 2 调亏灌溉条件下牧草粗蛋白含量及产量

处理	燕麦单播		燕麦+箭筈豌豆混播					
	粗蛋白含量/%	粗蛋白产量/(kg·hm ⁻²)	燕麦		箭筈豌豆		粗蛋白总含量/%	粗蛋白总产量/(kg·hm ⁻²)
			粗蛋白含量/%	粗蛋白产量/(kg·hm ⁻²)	粗蛋白含量/%	粗蛋白产量/(kg·hm ⁻²)		
CK	5.53e	551.9cd	7.04c	677.7abc	16.60b	606.5abc	9.68cd	1284.2c
C1	6.10d	641.2c	7.16c	586.9cd	15.58c	479.0cd	9.46cd	1065.9d
C2	8.35c	651.0c	9.30a	769.6a	15.42c	564.8a	11.18 a	1334.4bc
C3	6.28e	441.5e	8.10b	530.3d	14.36d	181.9d	9.12e	712.2e
C4	5.86de	492.0de	6.77c	695.5ab	17.84a	753.7ab	10.00 c	1449.2ab
C5	8.90a	1091.8a	6.82c	652.3bc	18.35a	874.6bc	10.66 a	1526.8a
C6	7.68b	787.7b	6.81c	613.7bcd	17.63a	417.4bcd	9.06 c	1031.1c

注:同列不同小写字母表示各处理差异显著($P<0.05$)。下同。

混播种植模式下,NDF 和 ADF 总含量在 C4、C5、C6 处理间差异不显著。燕麦 NDF 含量在 C6 处理最大(44.27%),在 C3 处理最小(37.61%);ADF

含量表现为开花期水分亏缺>拔节期水分亏缺,且不同水分调亏程度间差异不显著。不同水分条件下箭筈豌豆的 NDF 和 ADF 含量差异不显著。

表 3 调亏灌溉条件下牧草中、酸性洗涤纤维含量

单位:%

处理	燕麦单播		燕麦+箭筈豌豆混播					
	中性洗涤纤维 NDF	酸性洗涤纤维 ADF	燕麦中性	燕麦酸性	箭筈豌豆	箭筈豌豆	中性洗涤	酸性洗涤
			洗涤纤维 NDF	洗涤纤维 ADF	中性洗涤纤维 NDF	酸性洗涤纤维 ADF	纤维总含量 NDF	纤维总含量 ADF
CK	50.67a	34.63a	42.17ab	33.74b	47.52ab	32.59a	43.64ab	33.42b
C1	49.26ab	31.94a	40.49abc	32.28b	45.01b	32.51a	41.72b	32.34b
C2	47.58bc	30.77a	39.70bc	33.49b	47.99ab	32.96a	42.24b	33.33b
C3	46.37c	30.73a	37.61c	31.36b	44.77b	33.04a	38.77c	31.63c
C4	39.88d	22.95b	44.40a	39.44a	47.31ab	32.21a	45.25a	37.33a
C5	36.98e	24.62b	42.89ab	38.51a	48.46a	33.22a	44.74a	36.75a
C6	46.90bc	32.59a	44.27a	38.31a	47.49ab	32.46a	44.94a	37.09a

2.3 调亏灌溉对人工草地耗水量及水分利用效率的影响

调亏灌溉显著影响不同种植模式人工草地的耗水量(表 4)。单播和混播各处理的平均灌水量分别为 161,176 mm;与单播相比,混播处理的平均耗水量、平均水分利用效率和平均灌溉水利用效率分别提高 5.5%,20.5%和 12.1%。

随水分调亏程度的加重,单播各处理的耗水量不断减少,CK 处理的耗水量和灌水量均最大,分别为 481.14,214.50 mm,C3 处理耗水量和灌水量均最小,分别为 359.96,87.50 mm。C5 处理 WUE 最大(27.68 kg/

(hm²·mm)),较 CK 处理显著提高 33.4%($P<0.05$);IWUE 在 C3 处理下最高(80.26 kg/(hm²·mm)),与 C5、C6 处理差异不显著,较 CK 处理显著提高 72.5%。

从表 4 还可看出,与单播类似,混播种植模式下 CK 处理的耗水量和灌水量均最大,分别为 502.64,223.00 mm,且显著高于其他处理,C3 处理的耗水量和灌水量均最小,分别为 359.96,87.50 mm。C4 处理的 WUE 最大(31.81 kg/(hm²·mm)),与 C5 处理无显著差异,较 CK 处理提高 20.6%($P<0.05$)。C5 处理下 IWUE 最高(80.96 kg/(hm²·mm)),较 CK 处理显著提高 36.2%。

表 4 调亏灌溉条件下草地水分利用状况

处理	耗水量/mm		灌水量/mm		水分利用效率/(kg·hm ⁻² ·mm ⁻¹)		灌水利用效率/(kg·hm ⁻² ·mm ⁻¹)	
	单播	混播	单播	混播	单播	混播	单播	混播
CK	481.14a	502.64a	214.50	223.00	20.75c	26.37b	46.53c	59.45c
C1	450.08c	480.82b	180.50	193.50	23.36b	23.43c	58.23b	58.22c
C2	409.27e	442.84d	154.50	159.50	19.07c	26.97b	50.52c	74.88ab
C3	359.96f	386.12e	87.50	126.50	19.50c	20.23d	80.26a	61.75c
C4	461.53b	455.52c	187.00	190.00	18.25c	31.81a	45.02c	76.26a
C5	442.27d	455.04c	165.00	177.00	27.68a	31.49a	74.20a	80.96a
C6	408.36e	455.05c	139.50	166.00	25.13ab	25.01bc	73.56a	68.56b

2.4 调亏灌溉对牧草生长影响的综合评价

为了克服以单一性状(指标)来衡量牧草生长状况的

短板,本研究采用组合赋权法将 AHP 层次分析法和熵权法计算的权重进行融合,得到更加科学合理的指标权重,

在满足主观赋权法反映决策者意愿的同时,又可为客观赋权法提供理论依据。在此基础上应用 TOPSIS 法构建评价体系,综合评价调亏灌溉对牧草生长的影响^[11]。

2.4.1 综合评价体系指标层次模型 牧草综合评价的层次模型(图 3)中,设置产量指标(B1,包括干草产量 M1、粗蛋白产量 M2)、品质指标(B2,包括粗蛋白含量 M3、NDF 含量 M4、ADF 含量 M5)和水分利用效率指标(B3,包括干物质水分利用效率 M6 和灌水

利用效率 M7)。对于燕麦与箭筈豌豆混播处理,M1 为燕麦产量与箭筈豌豆产量之和,M2 为燕麦粗蛋白产量与箭筈豌豆粗蛋白产量之和(即燕麦粗蛋白含量×燕麦干草产量+箭筈豌豆粗蛋白含量×箭筈豌豆干草产量);M3 为 M2/M1;M4 为(燕麦的 NDF 总量+箭筈豌豆的 NDF 总量)/M1;M5 为(燕麦的 ADF 总量+箭筈豌豆的 ADF 总量)/M1;M6 为 M1/混播牧草的田间耗水量;M7 为 M1/混播牧草的灌水量。

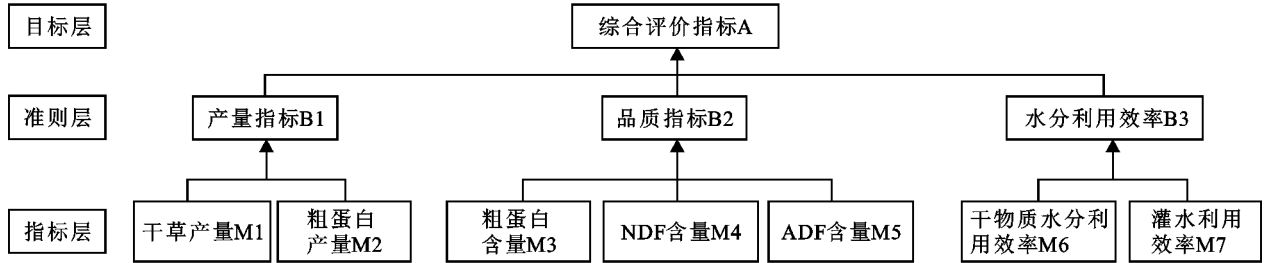


图 3 牧草综合评价体系指标层次模型

2.4.2 评价指标权重的确定

(1)基于层次分析法(AHP)确定权重。层次模型建立后构造判断矩阵(1~9 标度法),并采用 Yaahp 软件对判断矩阵的一致性进行检验,判断矩阵分别为:

$$A = \begin{matrix} & B_1 & B_2 & B_3 \\ B_1 & \begin{pmatrix} 1 & 3/2 & 9/5 \\ 2/3 & 1 & 3/2 \\ 5/9 & 2/3 & 1 \end{pmatrix} \\ B_2 & & \begin{pmatrix} 1 & 5/2 \\ 2/5 & 1 \end{pmatrix} \\ B_3 & & & \begin{pmatrix} 1 & 3 & 3 \\ 1/3 & 1 & 4/5 \\ 1/3 & 5/4 & 1 \\ 1 & & & \end{pmatrix} \\ & M_1 & M_2 & M_3 & M_4 & M_5 \\ B_1 = & \begin{pmatrix} 1 & 5/2 \\ 2/5 & 1 \end{pmatrix} \\ & M_3 & M_4 & M_5 \\ B_2 = & \begin{pmatrix} 1 & 3 & 3 \\ 1/3 & 1 & 4/5 \\ 1/3 & 5/4 & 1 \\ 1 & & & \end{pmatrix} \\ & M_6 & M_7 \\ B_3 = & \begin{pmatrix} 1 & 3/2 \\ 2/3 & 1 \end{pmatrix} \end{matrix}$$

通过计算分析得出,综合评价指标、产量指标、品质指标、水分利用效率的一致性检验系数 M_R 均小于 0.10,符合 AHP 法逻辑规则,判断矩阵具有良好的合理性和可靠性。由表 5 可知,牧草各项指标的权重由大到小依次为干草产量、粗蛋白含量、干物质水分利用效率、粗蛋白产量、灌溉水利用效率、ADF 含量和 NDF 含量。

(2)基于熵权法确定权重。建立基于熵值权重的多目标综合评价模型,通过对评价指标归一化处理(表 6)和信息熵、权重计算(表 7),得出牧草各项指标权重由大到小依次为粗蛋白产量、干草产量、粗蛋白

含量、灌溉水利用效率、干物质水分利用效率、ADF 含量和 NDF 含量。

表 5 AHP 层次分析法计算牧草指标权重结果

项目	局部权重	最终权重	一致性检验参数
目标层 A	0.4477	0.4477	$MR = 0.0053 < 0.1$ $\lambda_{max} = 3.0055$
	0.3215	0.3215	
	0.2309	0.2309	
准则层 B1	0.7143	0.3198	$MR = 0 < 0.1$ $\lambda_{max} = 2.0000$
	0.2857	0.1279	
准则层 B2	0.5993	0.1927	$MR = 0.0053 < 0.1$ $\lambda_{max} = 3.0055$
	0.1855	0.0596	
准则层 B3	0.2152	0.0692	$MR = 0 < 0.1$ $\lambda_{max} = 2.0000$
	0.6000	0.1385	
	0.4000	0.0923	

表 6 数值归一化处理

处理	M ₁	M ₂	M ₃	M ₄	M ₅	M ₆	M ₇
DCK	0.01077	0.00565	0.00773	0.00307	0.01036	0.01020	0.00899
DC1	0.01134	0.00657	0.00853	0.00299	0.01124	0.01148	0.01125
DC2	0.00842	0.00667	0.01167	0.00288	0.01166	0.00938	0.00976
DC3	0.00758	0.00452	0.00878	0.00281	0.01168	0.00959	0.01550
DC4	0.00909	0.00504	0.00819	0.00242	0.01564	0.00897	0.00870
DC5	0.01321	0.01118	0.01245	0.00224	0.01458	0.01361	0.01433
DC6	0.01107	0.00807	0.01075	0.00284	0.01101	0.01235	0.01421
HCK	0.01431	0.01315	0.01353	0.00265	0.01074	0.01296	0.01148
HC1	0.01216	0.01092	0.01323	0.00253	0.01110	0.01152	0.01124
HC2	0.01289	0.01367	0.01564	0.00256	0.01077	0.01326	0.01446
HC3	0.00843	0.00729	0.01275	0.00235	0.01134	0.00994	0.01193
HC4	0.01564	0.01484	0.01399	0.00274	0.00961	0.01563	0.01473
HC5	0.01546	0.01564	0.01491	0.00271	0.00977	0.01548	0.01564
HC6	0.01228	0.01056	0.01267	0.00272	0.00968	0.01229	0.01324

注: M₁ 为干草产量; M₂ 为粗蛋白产量; M₃ 为粗蛋白含量; M₄ 为中性洗涤纤维含量; M₅ 为酸性洗涤纤维含量; M₆ 为干物质水分利用效率; M₇ 为灌水利用效率。

表 7 熵权法计算牧草指标权重结果

指标	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7
权重	0.1410	0.4419	0.1392	0.0224	0.0614	0.0908	0.1028

(3)基于 AHP 法和熵权法的组合赋权。依据层次分析法及熵权法耦合原理可得耦合后的综合权重值 T_j 为:

$$T_j = \frac{U_j \cdot W_j}{\sum_{j=1}^n (U_j \cdot W_j)}$$

式中: T_j 为综合权重值; U_j 为 AHP 法得到的权重值; W_j 为熵权法得到的权重值; 各指标综合权重值

表 9 基于 TOPSIS 模型的牧草综合评价及其排序

处理	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	S+	S-	贴合度 C_i	综合排序
DCK	0.0682	0.0522	0.0289	0.0019	0.0090	0.0177	0.0112	0.1022	0.0227	0.1819	12
DC1	0.0719	0.0606	0.0319	0.0020	0.0097	0.0200	0.0140	0.0923	0.0309	0.2506	10
DC2	0.0534	0.0615	0.0437	0.0021	0.0101	0.0163	0.0121	0.0964	0.0252	0.2070	11
DC3	0.0480	0.0417	0.0329	0.0021	0.0101	0.0167	0.0193	0.1177	0.0094	0.0741	14
DC4	0.0576	0.0465	0.0307	0.0025	0.0135	0.0156	0.0108	0.1105	0.0121	0.0985	13
DC5	0.0837	0.1032	0.0466	0.0027	0.0126	0.0237	0.0178	0.0454	0.0739	0.6193	5
DC6	0.0702	0.0745	0.0402	0.0021	0.0095	0.0215	0.0177	0.0779	0.0418	0.3493	8
HCK	0.0907	0.1214	0.0507	0.0022	0.0093	0.0225	0.0143	0.0267	0.0930	0.7768	4
HC1	0.0770	0.1008	0.0495	0.0024	0.0096	0.0200	0.0140	0.0503	0.0689	0.5778	6
HC2	0.0817	0.1262	0.0586	0.0023	0.0093	0.0230	0.0180	0.0257	0.0959	0.7889	3
HC3	0.0534	0.0673	0.0477	0.0025	0.0098	0.0173	0.0148	0.0906	0.0323	0.2627	9
HC4	0.0991	0.1370	0.0524	0.0022	0.0083	0.0272	0.0183	0.0112	0.1112	0.9083	2
HC5	0.0980	0.1443	0.0558	0.0022	0.0085	0.0269	0.0195	0.0065	0.1178	0.9474	1
HC6	0.0778	0.0975	0.0474	0.0022	0.0084	0.0214	0.0165	0.0531	0.0661	0.5545	7
Z+	0.0991	0.1443	0.0586	0.0027	0.0135	0.0272	0.0195				
Z-	0.0480	0.0417	0.0289	0.0019	0.0083	0.0156	0.0108				

注: Z+ 为正理想解; Z- 为逆理想解; S+ 为各处理与正理想解的距离; S- 为各处理与逆理想解的距离。

3 讨论

产量是评价牧草生产与管理措施的一项重要指标^[12]。牧草干草产量主要由收获时地上部分的茎和叶构成,依赖于植株营养器官的光合作用。调亏灌溉使牧草生育期的土壤水分处于不同程度的亏缺状态,进而干扰牧草正常的光合作用,最终导致产量下降^[5]。箭筈豌豆属豆科,其固氮作用可为土壤提供一定的肥力,促进植株生长;同时,混播可增加地表覆盖度,减少土壤水分无效蒸发,从而促进牧草生长,提高水分利用效率。本研究表明,不同水分亏缺条件下,燕麦+箭筈豌豆混播的干草产量均高于燕麦单播,这与李春喜等^[9]和李信恺等^[13]的研究结果相似。此外,本研究得出,在拔节期水分亏缺条件下,单混播干草产量随水分亏缺程度的增加而减小,而在开花期水分亏缺条件下未表现出此规律。这可能是因为拔节期水分亏缺导致土壤含水率降低,牧草开始出现干旱胁迫,光合作用减弱,光合产物减少,为了吸收深层土壤水分,使得植株分配给根系的光合同化产物增多,

见表 8。

表 8 各指标综合权重

指标	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7
权重	0.2817	0.3532	0.1676	0.0084	0.0266	0.0786	0.0593

通过对评价指标无量纲化,建立加权决策矩阵,确定理想解和贴合度,得出基于组合赋权 TOPSIS 综合模型评价结果及排序(表 9),HC5(混播开花期中亏)处理的牧草综合指标最优,HC4(混播开花期轻亏)处理和 HC2(混播拔节期中亏)处理次之,DC3(单播拔节期重亏)处理的综合表现最差。

而分配给营养器官的同化产物减少;在开花期进行水分调控,由于降雨增多且牧草进入生殖生长期,植株对灌水的的需求降低,从而使开花期水分亏缺处理间的产量差异不显著。

光合同化产物在不同物质形态间转化可产生不同的品质效应。提高粗蛋白含量、降低纤维素含量是提高牧草营养品质的关键^[14]。本研究表明,同一水分亏缺条件下,燕麦+箭筈豌豆混播的牧草粗蛋白含量及产量均显著高于燕麦单播。这可能是因为混播条件下禾本科牧草对氮素的需求加速豆科牧草的生物固氮作用;同时,豆科牧草固定的氮素有一部分转移到禾本科牧草中,养分利用率得到提升^[15],这与刘敏等^[16]的研究结果一致。文霞等^[17]在灌水量对紫花苜蓿生产能力的研究中得出,随着灌水量的增加,粗蛋白含量逐渐减少,灌水量和粗蛋白含量呈负相关。灌水量的增加,促进了植株茎的生长,茎叶比增大,从而导致粗蛋白产量减少,这与本研究得出在拔节期和开花期随着亏水程度的加重,单/混播粗蛋白含量及产量均呈先增大后减小的趋势相似,过度干旱

或灌水量较多均不利于粗蛋白产量的形成。单播及混播在拔节期进行水分调亏,其茎叶比均小于开花期水分调亏,这说明拔节期水分调亏较开花期水分调亏更有利于改善牧草品质。中性洗涤纤维(NDF)和酸性洗涤纤维(ADF)含量影响家畜对牧草的消化率,是评价牧草质量的重要指标^[18]。陈萍等^[19]研究得出,粗纤维和酸性洗涤纤维含量与灌水量呈极显著负相关,适度提高灌水量有利于降低牧草酸性洗涤纤维和中性洗涤纤维含量^[20]。本研究表明,随水分调亏程度的增大,NDF和ADF含量呈先减小后增大的趋势,开花期水分调亏有利于降低燕麦单播的NDF和ADF含量,单/混播在开花期中度水分调亏下NDF和ADF含量均较低。充分灌溉条件下,水分调亏对茎生长的抑制作用得到释放,茎叶比增大,导致牧草NDF和ADF含量增大,不利于提高牧草品质。

提高作物水分利用效率是节水农业的核心问题^[21],适宜的灌溉量或水分调亏可降低作物耗水量,提高水分利用效率^[22-23]。本研究表明,随着亏水程度的增加,牧草生育期灌水量和耗水量均减小,WUE和IWUE表现为开花期水分调亏>拔节期水分调亏,单播和混播的WUE和IWUE均在开花期中度水分调亏下达到最大值。这可能是由于拔节期草地覆盖度小,土壤蒸发剧烈,而在开花期,牧草生长旺盛,地表覆盖度增加,无效蒸发减小。王自奎等^[24]在小麦/玉米套作的研究中也表明,土壤水分的无效蒸发是降低草群水分利用效率的影响因子之一。

为了定量分析调亏灌溉对人工草地产量、品质及水分利用效率的影响,本研究以高产、优质、节水为目标,运用AHP主观层次分析赋权法和熵权客观赋权法,对牧草各项指标进行综合赋权,基于TOPSIS综合评价模型得出,燕麦+箭筈豌豆混播模式下拔节期充分灌溉+开花期中度调亏的综合评分最优,这与各单项指标的研究结果一致。

4 结论

(1)同一调亏灌溉条件下,混播可显著提高牧草产量。单播种植模式下,拔节期随着水分调亏程度的加重,牧草产量呈下降趋势;开花期随着水分调亏程度的加重,牧草产量呈先增加后降低趋势,开花期中度水分调亏(C5处理)的产量最高(12 242.7 kg/hm²);混播种植模式下,随着亏水程度的增加,产量呈先增加后降低趋势,开花期轻度水分调亏(C4处理)的产量最高(14 490.1 kg/hm²)。

(2)同一种植模式下,随灌水调亏程度的增加,粗蛋白含量及产量呈先增大后减小趋势,开花期中度水分调亏(C5)条件下,单/混播的粗蛋白含量与产量均最高;NDF和ADF含量随灌水调亏程度的增加呈先减小后增

大趋势。同一调亏灌溉条件下,与单播相比,混播牧草的粗蛋白含量和产量分别提高42.0%和80.4%。

(3)同一灌水条件下,混播处理的平均耗水量、WUE和IWUE分别较单播提高5.5%,20.5%和12.1%。相同种植模式下,随水分调亏程度的增加,牧草WUE和IWUE呈先增大后减小趋势,单播和混播均在开花期中度水分调亏条件下具有较高的WUE(27.68,31.49 kg/(hm²·mm))和IWUE(74.20,80.96 kg/(hm²·mm))。

(4)基于TOPSIS模型综合评价调亏灌溉对牧草生长的影响得出,燕麦+箭筈豌豆混播采用拔节期充分灌水+开花期中度调亏的灌溉模式,可实现节水、增产、优质和高效的有机统一,是高寒荒漠草原区微喷灌条件下较为合理的牧草生产管理模式。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 刘文辉,张英俊,师尚礼,等.高寒地区燕麦(*Avena sativa* L.)人工草地生物量分配对施肥和混播措施的响应[J].植物营养与肥料学报,2017,23(2):398-407.
- [3] 周青平.燕麦+箭筈豌豆混播草地的草层结构与产量[J].草原与草坪,2002(3):43-45.
- [4] 张晶,党建友,张定一,等.节水灌溉方式与磷钾肥减施对小麦产量、品质及水肥利用效率的影响[J].水土保持学报,2020,34(6):166-171.
- [5] 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.
- [6] 王桃.高寒牧区36种燕麦营养生态特性及其生产效能评价[D].兰州:兰州大学,2010.
- [7] 田福平,时永杰,周玉雷,等.燕麦与箭筈豌豆不同混播比例对生物量的影响研究[J].中国农学通报,2012,28(20):29-32.
- [8] 杨丽娜,赵桂琴,侯建杰.播期、肥料种类及其配比对燕麦生长及产量的影响[J].中国草地学报,2013,35(4):47-51,60.
- [9] 李春喜,叶润蓉,周玉碧,等.高寒牧区燕麦与箭筈豌豆混播生产性能及营养价值评价[J].草原与草坪,2016,36(5):40-45.
- [10] 陈功,张自和,胡自治.高寒地区一年生人工草地地上生物量动态及光能转化效率[J].草业学报,2003,12(1):69-73.
- [11] 吴雪,王坤元,牛晓丽,等.番茄综合营养品质指标构建及其对水肥供应的响应[J].农业工程学报,2014,30(7):119-127.
- [12] 向洁,王富强,郭宝光,等.西藏河谷区燕麦与箭筈豌豆混间作对产量和营养品质的影响[J].浙江大学学报(农业与生命科学版),2018,44(5):555-564.

- [10] 毛威,杨金忠,朱焱,等.河套灌区井渠结合膜下滴灌土壤盐分演化规律[J].农业工程学报,2018,34(1):93-101.
- [11] 王璐瑶,彭培艺,郝培静,等.基于采补平衡的河套灌区井渠结合模式及节水潜力[J].中国农村水利水电,2016(8):18-24.
- [12] 于健,杨金忠,徐冰,等.内蒙古河套灌区三种水源形式滴灌发展潜力[J].中国水利,2015(19):50-53.
- [13] 陈艳梅,王少丽,高占义,等.基于 SALTMOD 模型的灌溉水矿化度对土壤盐分的影响[J].灌溉排水学报,2012,31(3):11-16.
- [14] 杨军,孙兆军,王旭.龟裂碱地下水埋深、矿化度和盐分离子年内时空变化特征研究[J].节水灌溉,2016(3):45-48,51.
- [15] 吴亚坤,刘广明,杨劲松,等.基于反距离权重插值的土壤盐分三维分布解析方法[J].农业工程学报,2013,29(3):100-106,296.
- [16] 张恒,黄莺,刘明宏,等.基于空间插值法的遵义烟区植烟土壤养分时空变化[J].中国烟草科学,2020,41(3):36-43.
- [17] Bahareh A, Ahmad J, Hossein K, et al. Sub-basin scale spatial variability of soil properties in Central Iran [J].Arabian Journal of Geosciences,2017,10(6):2-8.
- [18] 李会亚,冯起,陈丽娟,等.民勤绿洲灌区表层土壤盐分空间变异性研究[J].干旱区资源与环境,2017,31(4):136-141.
- [19] 柴晨好,王玉刚,周宏飞,等.干旱区典型绿洲水库库周土壤盐分空间分异及盐岛效应[J].生态学杂志,2018,37(8):2445-2452.
- [20] Xiao G X, Hu Y L, Li N, et al. Spatial autocorrelation analysis of monitoring data of heavy metals in rice in China[J].Food Control,2018,89:32-37.
- [21] 罗金明,王永洁,邓伟,等.浅地下水埋深微域尺度苏打盐渍土的积盐机理探讨[J].土壤学报,2010,47(2):238-245.
- [22] 史海滨,吴迪,闫建文,等.盐渍化灌区节水改造后土壤盐分时空变化规律研究[J].农业机械学报,2020,51(2):318-331.
- [23] 管孝艳,王少丽,高占义,等.盐渍化灌区土壤盐分的时空变异特征及其与地下水埋深的关系[J].生态学报,2012,32(4):198-206.
- (上接第 207 页)
- [13] 李佶恺,孙涛,旺扎,等.西藏地区燕麦与箭筈豌豆不同混播比例对牧草产量和质量的影响[J].草地学报,2011,19(5):830-833.
- [14] 郑凯,顾洪如,沈益新,等.牧草品质评价体系及品质育种的研究进展[J].草业科学,2006,23(5):57-61.
- [15] Li C J, Li Y Y, Yu C B, et al. Crop nitrogen use and soil mineral nitrogen accumulation under different crop combinations and patterns of strip intercropping in northwest China[J]. Plant and Soil, 2011, 342(1/2): 221-231.
- [16] 刘敏,龚吉蕊,王忆慧,等.豆禾混播建植人工草地对牧草产量和草质的影响[J].干旱区研究,2016,33(1):179-185.
- [17] 文霞,侯向阳,穆怀彬.灌水量对京南地区紫花苜蓿生产能力的影 响[J].草业科学,2010,27(4):73-77.
- [18] 王旭,曾昭海,朱波,等.箭筈豌豆与燕麦不同间作混播模式对产量和品质的影响[J].作物学报,2007,33(11):1892-1895.
- [19] 陈萍,咎林森,陈林.不同灌溉量对紫花苜蓿生长和品质的影响[J].家畜生态学报,2011,32(5):44-47.
- [20] 汪精海,齐广平,康燕霞,等.干旱半干旱地区紫花苜蓿营养品质对水分胁迫的响应[J].草业科学,2017,34(1):112-118.
- [21] 山仑,徐萌.节水农业及其生理生态基础[J].应用生态学报,1991,2(1):70-76.
- [22] Sun H Y, Liu C M, Zhang X Y, et al. Effects of irrigation on water balance, yield and WUE of winter wheat in the North China Plain[J].Agricultural Water Management,2006,85(1/2):211-218.
- [23] Li F M, Liu X L, Li S Q. Effects of early soil water distribution on the dry matter partition between roots and shoots of winter wheat [J]. Agricultural Water Management,2001,49(3):163-171.
- [24] 王自奎,吴普特,赵西宁,等.小麦/玉米套作田棵间土壤蒸发的数学模拟[J].农业工程学报,2013,29(21):72-81.