

DOI:10.11686/cyxb2019364

<http://cyxb.magtech.com.cn>

伏兵哲,周燕飞,李雪,等.宁夏引黄灌区羊草水肥耦合效应研究.草业学报,2020,29(5):98—108.

Fu B Z, Zhou Y F, Li X, et al. Effect of water and fertilizer coupling on *Leymus chinensis* in the Ningxia irrigation area. Acta Prataculturae Sinica, 2020, 29(5): 98—108.

宁夏引黄灌区羊草水肥耦合效应研究

伏兵哲^{1,2},周燕飞¹,李雪¹,倪彪¹,高雪芹^{1,2*}

(1. 宁夏大学农学院,宁夏 银川 750021;2. 宁夏大学西北土地退化与生态恢复国家重点实验室培育基地,宁夏 银川 750021)

摘要:为了研究宁夏引黄灌区水肥耦合对羊草产量、品质及种子产量的影响,以中科2号羊草为研究材料,采用双因素裂区试验设计,主区为水分处理,副区为肥料处理,运用二次多项式逐步回归及归一化方法,寻求满足多目标综合效益最大化的灌水施肥制度。结果表明,灌水对种子和干草的产量、肥料偏生产力(PFP)、灌溉水分利用率(iWUE)和品质均有显著影响($P < 0.05$);施肥对种子和干草的产量、PFP、品质和干草 iWUE 有显著影响($P < 0.05$);水肥交互对千粒重、抽穗率、品质、干草 PFP 和 iWUE 均有显著影响($P < 0.05$)。灌水量为 360 mm、施肥量为 132 kg·hm⁻²时种子产量最高,灌水量为 360 mm、施肥量为 540 kg·hm⁻²时干草产量和相对饲喂价值(RFV)最高。综合分析得出,水肥耦合效应根据羊草生产目的而定。羊草种植以收获干草和饲草品质为目的,可将灌水量定为 288~360 mm、施肥量为 324~540 kg·hm⁻²;羊草种植以收获种子和肥料高效利用为目的,可将灌水量定为 288~360 mm、施肥量为 108~216 kg·hm⁻²。

关键词:羊草;水肥耦合;干草产量;种子产量;营养价值

Effect of water and fertilizer coupling on *Leymus chinensis* in the Ningxia irrigation area

FU Bing-zhe^{1,2}, ZHOU Yan-fei¹, LI Xue¹, NI Biao¹, GAO Xue-qin^{1,2*}

1. Agronomy College, Ningxia University, Yinchuan 750021, China; 2. Breeding Base of State Key Laboratory for Preventing Land Degradation and Ecological Restoration, Ningxia University, Yinchuan 750021, China

Abstract: This research investigated the effects of water and fertilizer and their interaction on the yield, hay quality and seed yield of *Leymus chinensis* in the Ningxia irrigation area. The *L. chinensis* cultivar used was Zhongke No. 2. A two factor split-plot experiment design was adopted, with water as the main plot treatment and fertilizer as the sub-plot treatment. A quadratic polynomial stepwise regression and normalization was used to identify the combination of irrigation and fertilizer that best optimized the multi-factor benefit. It was found that irrigation had significant effects on seed and hay yield, fertilizer partial productivity (PFP), irrigation water use efficiency (iWUE), and hay quality ($P < 0.05$). Fertilization had significant effects on seed and hay yield, PFP, quality, and hay iWUE ($P < 0.05$); significant ($P < 0.05$) water fertilizer interactions were observed for thousand-grain weight, heading rate, hay quality, hay PFP and iWUE. The seed yield was highest with 360 mm irrigation and 132 kg·ha⁻¹ fertilizer application. The hay yield and relative feeding value (RFV) were highest with 360 mm irrigation and 540 kg·ha⁻¹ fertilizer application. Stepwise analysis showed that the

收稿日期:2019-08-26;改回日期:2019-12-02

基金项目:宁夏回族自治区农业育种专项(2014NYYZ04),宁夏青年科技人才托举工程(TJGC2018083)和草学——流学科建设项目(NXYLXK2017A01)资助。

作者简介:伏兵哲(1982-),男,陕西扶风人,副教授,博士。E-mail: fbzhe19@163.com

*通信作者 Corresponding author. E-mail: 306098639@qq.com

interaction effect of water and fertilizer differs depending on the purpose of *L. chinensis* cultivation. When *L. chinensis* is planted for hay production and forage quality is important, the recommendation is to apply 288—360 mm and 324—540 kg · ha⁻¹ of fertilizer; when *L. chinensis* is planted for seed production and when efficient use of fertilizer is important, the recommendation is to apply 288—360 mm irrigation and 108—216 kg · ha⁻¹ of fertilizer.

Key words: *Leymus chinensis*; coupling of water and fertilizer; hay yield; seed yield; nutritional value

羊草(*Leymus chinensis*)又名碱草,为禾本科赖草属多年生草本植物,具有抗寒、抗旱、耐盐碱等优良特性^[1],所含营养物质丰富,在夏秋季节是家畜抓膘牧草,制成干草后粗蛋白含量仍在 10% 左右,亦为秋季收割干草的重要饲草。水肥耦合是影响植物生长的两大环境因素“水”及“肥”之间的有机联系,以肥调水,以水促肥,利用其间的协同效应,进行合理的水肥管理是改善羊草生长和提高羊草产量、品质和水肥利用率的关键。目前在水肥资源合理利用提高羊草饲草和种子产量技术上还存在着一定缺陷,制约着羊草草地的建设。开展羊草水肥耦合技术研究,提出合理高效的羊草水肥管理制度,提高羊草生产性能和品质,对促进草牧业可持续发展具有重要意义。尽管国内外学者对水肥耦合条件下相关植物水肥管理制度的研究取得了较多成果,但大多研究以黄瓜(*Cucumis sativus*)、水稻(*Oryza sativa*)、番茄(*Lycopersicon esculentum*)、红枣(*Zizyphus jujuba*)等作物为主^[2—5],而针对羊草的研究比较少,且集中在不同季节刈割^[6]、不同干燥失水方式^[7]、不同生长期^[8]、不同居群^[9]以及不同钾肥施用量^[10]等方面,水肥耦合对羊草的影响的报道极少。苏富源^[1]对不同时期刈割羊草的产量、品质等通过方差分析找出了适宜的水肥量;并通过施氮肥对人工羊草草地种子产量及产量构成因素的研究认为随着施入氮肥试验年份增加,产量逐渐增加;而水肥耦合对羊草产量、品质、种子产量和水肥利用率的影响尚未研究,只有充分掌握水肥管理对羊草产量、品质及种子产量的影响,才能更好地提出合理高效的水肥管理制度。

1 材料与方法

1.1 试验地自然概况

试验地位于宁夏回族自治区银川市西夏区平吉堡现代农业示范园(N 38°26'26", E 106°2'38", 海拔 1120 m),属银川平原引黄灌区中部,中温带大陆性气候,雨雪稀少,昼夜温差大,年降水量 200 mm,无霜期 185 d,年平均气温 8.5 °C^[11]。土壤类型为淡灰钙土,土壤质地为轻壤土,土壤肥力中等偏下,盐碱程度轻^[12]。试验地土壤养分见表 1。

表 1 试验地土壤状况

Table 1 Soil condition on the test site

土层 Soil layer (cm)	速效磷 Available phosphorous (mg · kg ⁻¹)	速效钾 Available K (mg · kg ⁻¹)	碱解氮 Alkali-hydrolyzable nitrogen (mg · kg ⁻¹)	有机质 Soil organic matter (g · kg ⁻¹)	全盐 Total salt (g · kg ⁻¹)	酸碱度 PH
0~20	17.85	135.22	51.20	15.44	3.98	7.40
20~40	8.17	104.24	43.44	11.15	5.20	7.59
40~60	6.39	99.35	24.99	5.03	3.48	7.43

1.2 试验材料

中国科学院植物研究所培育的“中科 2 号”羊草新品种。

1.3 试验设计

试验地羊草为 2015 年 5 月采用人工条播种植,播深 2~3 cm,行距 80 cm,播种量 15 kg · hm⁻²,播种后进行正常田间管理。2018 年开始水肥耦合试验,试验采用双因素裂区试验设计,主区为水分处理,设 4 个梯度(分别

用 S_1 、 S_2 、 S_3 、 S_4 表示);副区为肥料处理,设 4 个梯度(分别用 F_1 、 F_2 、 F_3 、 F_4 表示),共 16 个处理,每个处理的面积为 $4\text{ m} \times 6\text{ m}$,重复 3 次。小区间隔 1 m,不同水分处理小区间用 80 cm 深的塑料布进行隔离。

2018 年分别在羊草返青期和抽穗期分 2 次进行灌水,在返青期随灌水分别对各小区采用撒施的方式进行一次性施肥。各处理的施肥量、灌水量和时间见表 2。

表 2 不同处理灌水量、施肥量和时间

Table 2 Different treatment irrigation amount, fertilization amount, and time

处理 Treatment	施肥量 N-P ₂ O ₅ -K ₂ O Fertilization amount	总施肥量 Total fertilization amount (kg · hm ⁻²)	灌水时期及灌水量 Irrigation time and amount (mm)		总灌水量 Total irrigation amount (mm)
			返青期 Seeding establish period	抽穗期 Heading period	
$S_1 F_1$	60-45-30	135	45	45	90
$S_1 F_2$	120-90-60	270	45	45	90
$S_1 F_3$	180-135-90	405	45	45	90
$S_1 F_4$	240-180-120	540	45	45	90
$S_2 F_1$	60-45-30	135	90	90	180
$S_2 F_2$	120-90-60	270	90	90	180
$S_2 F_3$	180-135-90	405	90	90	180
$S_2 F_4$	240-180-120	540	90	90	180
$S_3 F_1$	60-45-30	135	135	135	270
$S_3 F_2$	120-90-60	270	135	135	270
$S_3 F_3$	180-135-90	405	135	135	270
$S_3 F_4$	240-180-120	540	135	135	270
$S_4 F_1$	60-45-30	135	180	180	360
$S_4 F_2$	120-90-60	270	180	180	360
$S_4 F_3$	180-135-90	405	180	180	360
$S_4 F_4$	240-180-120	540	180	180	360

1.4 试验方法

1.4.1 羊草种子产量及构成因子的测定 羊草成熟期,每个小区随机取 20 株分别测定株高、穗长、穗宽、小穗数、小花数。小区中间选取 2 m × 3 m 用剪刀将所有穗子剪下,装在网袋晾干后,脱粒清选后测种子产量和千粒重。在每个小区测产区域外,随机取 5 个 20 cm × 20 cm 的小样,分别数总分蘖数和生殖枝数,并计算抽穗率,抽穗率=生殖枝数/分蘖数×100%。

1.4.2 羊草干草质量的测定 每个小区中将剪完穗子的羊草(测种子产量的区域)离地面 2 cm 割割,测定羊草鲜草产量,小区内随机取样 500 g 鲜草混匀,放入烘箱中于 105 °C 杀青 10 min,65 °C 烘干至恒重,称干重,计算鲜干比,折算干草产量,并粉碎用于营养成分测定。

1.4.3 羊草营养价值的测定 采用 GBG432-86 半微量凯氏定氮法测定粗蛋白(crude protein)含量;采用 GB6433-94 索氏提取法测定粗脂肪(ether extract, CP)含量;采用 GB6438-92 茂福炉(550~600 °C)直接灰化法测定粗灰分(crude ash, Ash)含量;酸性洗涤纤维(acid detergent fiber, ADF)及中性洗涤纤维(neutral detergent fiber, NDF)含量的测定分别按 Roberston 中性洗涤剂法和 VanSoest 酸性洗涤剂法测定^[13];利用公式计算相对饲喂价值(relative feeding value, RFV),计算方法如下:

$$RFV = \frac{DMI \times DDM}{1.29}$$

其中: DMI(dry matter intake)为粗饲料干物质的随意采食量,单位为%DM; DDM(digestible dry matter) 为可消化的干物质,单位为%DM^[14]。DMI 与 DDM 的预测模型分别为:

$$DMI = \frac{120}{NDF}$$

$$DDM = 88.9 - 0.779 \times ADF$$

1.4.4 灌溉水分利用率和肥料偏生产力 灌溉水分利用效率(irrigation water use efficiency, iWUE):作物利用单位灌水量生产的经济作物产量,单位为 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$,计算公式为:

$$iWUE = \frac{Y}{ET}$$

式中: Y 为产量(kg); ET 为作物全生育期的总灌水量(m^3)。

肥料偏生产力(partial factor productivity, PFP):作物利用单位施肥量生产的经济作物产量,单位为 $\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$,计算公式为:

$$PFP = \frac{Y}{F}$$

式中: Y 为产量(kg); F 为施肥量(kg)。

1.5 数据统计分析

采用 DPS 2005 和 SPSS 21.0 软件进行数据统计分析,用 Origin 2017 软件作图。

2 结果与分析

2.1 不同水肥对羊草种子构成因素及产量的影响

灌水对穗长、穗宽、小花数、生殖枝数、抽穗率、千粒重和种子产量有显著影响($P < 0.05$);施肥对穗长、穗宽、小穗数、小花数、千粒重和种子产量有显著影响($P < 0.05$);水肥互作对穗长、穗宽、小穗数、小花数、千粒重和抽穗率有显著影响($P < 0.05$)(表 3)。

羊草种子产量构成因素和种子产量在不同水肥条件下均有显著性差异($P < 0.05$),其中, $S_2 F_4$ 处理的穗长、小花数、生殖枝数、抽穗率、千粒重最大,较最小处理分别增加 1.5、1.8、1.8、2.3 和 1.5 倍; $S_3 F_1$ 处理的穗宽最大,为 0.42 cm,为最小处理 $S_1 F_3$ (0.18 cm) 的 2.33 倍; F_4 施肥水平的穗宽在 $S_1 \sim S_4$ 的灌溉水平下无显著性差异($P < 0.05$)(表 3)。种子产量的最大处理 $S_4 F_2$,为 $565.38 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,是最小处理 $S_1 F_1$ ($213.74 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)的 2.65 倍。

2.2 不同水肥对羊草生长及干草产量的影响

灌水和施肥均对株高和干草产量有极显著影响($P < 0.01$),水肥交互作用对株高和分蘖数有极显著影响($P < 0.01$)(表 4)。株高的最大处理是 $S_3 F_2$,为 118.70 cm,较最小处理 $S_1 F_1$ (90.55 cm)增加 31.09%, F_2 的株高在 $S_1 \sim S_3$ 水平上高于其他 3 个施肥梯度。分蘖数的最大处理是 $S_4 F_2$,为 5155 个 $\cdot \text{m}^{-2}$,是最小处理 $S_3 F_1$ (2545 个 $\cdot \text{m}^{-2}$)的 2.03 倍,可看出分蘖数在 S_3 、 S_4 灌溉水平上随施肥梯度的增加呈先增加再减小的趋势。干草产量的最大处理是 $S_4 F_4$,为 $12320 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,比最小处理 $S_1 F_1$ ($7802 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)增加 57.91%,干草产量随灌水、施肥量的增加呈逐渐增加的趋势。

2.3 不同水肥对羊草营养价值的影响

灌水、施肥及其交互作用对粗蛋白和粗灰分影响均不显著;粗蛋白变化范围为 9.70%~11.06%, $S_4 F_3$ 粗蛋白含量较 $S_1 F_4$ 高 14.02%; F_3 梯度在 $S_1 \sim S_4$ 水平下均高于其他梯度(表 5),可见适量施肥对粗蛋白含量起到了增加作用,但超量施肥反而会导致粗蛋白含量下降。粗灰分变化范围为 8.18%~11.68%, $S_3 F_2$ 的粗灰分含量较 $S_1 F_2$ 高 42.79%。

灌水、施肥对粗脂肪和 ADF 有极显著影响($P < 0.01$);粗脂肪含量在 1.40%~1.78%, $S_4 F_2$ 粗脂肪含量较 $S_1 F_3$ 高 27.14%;ADF 含量在 33.28%~39.84%, $S_2 F_1$ 的 ADF 含量比 $S_4 F_4$ 增加 19.71%。

灌水、施肥及其交互作用对 NDF、RFV 有极显著影响($P < 0.01$);NDF 含量在 56.87%~62.22%, $S_2 F_1$ 的 NDF 含量比 $S_4 F_4$ 增加 9.41%;可看出 NDF、ADF 在 S_1 、 S_2 灌溉水平下含量较高。RFV 含量在 87.71~103.02, $S_4 F_4$ 的 RFV 含量比 $S_2 F_1$ 增加 17.46%。 $S_4 F_4$ 的 RFV 与 $S_4 F_3$ 、 $S_4 F_2$ 差异不显著,可见羊草相对饲喂价值(RFV)随灌水、施肥量的增加呈逐渐增加的趋势。

表 3 不同水肥对羊草种子产量构成因素及产量的影响

Table 3 Effects of different water and fertilizers on yield components and yield of *L. chinensis* seeds

处理 Treatment	穗长 Spike length (cm)	穗宽 Spike width (cm)	小穗数 Spikelet number (spike•plant ⁻¹)	Floret number (No. • spike ⁻¹)	生殖枝数 number (No. • m ⁻²)	抽穗率 Spike rate (%)		千粒重 Thousand-grain weight (g)	种子产量 Seed yield (kg • hm ⁻²)
						Reproductive branch	Spike rate		
S ₁ F ₁	11.51±0.54d	0.26±0.02d	14.65±0.81cde	4.10±0.38g	780±25abcde	21.12±1.59abcde	2.30±0.07ef	213.74±25.23e	
S ₁ F ₂	13.58±0.54cd	0.32±0.02bcd	16.95±0.67a	4.30±0.28fg	755±56abode	17.09±0.89bcde	2.75±0.18ab	292.52±20.69cd	
S ₁ F ₃	12.88±0.54cd	0.18±0.02e	12.40±0.74ef	4.55±0.39fg	715±93abede	26.59±5.54ab	2.58±0.10bcd	240.24±27.74e	
S ₁ F ₄	12.47±0.58cd	0.34±0.01abcd	12.10±0.64f	6.95±0.18ab	600±114bede	23.26±4.26abede	1.98±0.08f	228.30±5.61e	
S ₂ F ₁	13.13±0.49cd	0.29±0.03cd	15.55±0.76abc	4.60±0.31fg	865±48ab	21.58±1.75abede	2.69±0.07abc	286.78±30.66cd	
S ₂ F ₂	14.07±0.58bc	0.39±0.03ab	15.50±0.65abc	6.00±0.27bcd	820±85abed	24.72±2.25abed	2.15±0.07ef	290.28±12.75cd	
S ₂ F ₃	12.43±0.72cd	0.31±0.02bcd	13.40±0.81cdef	5.80±0.25bcd	715±151abcede	22.42±4.55abede	2.59±0.12bcd	263.18±38.70de	
S ₂ F ₄	17.60±1.84a	0.34±0.01abcd	16.50±0.65ab	7.20±0.39a	915±128a	29.40±4.21a	2.94±0.05a	243.22±19.01e	
S ₃ F ₁	12.97±0.36cd	0.42±0.09a	14.75±0.53cde	5.95±0.29bcd	585±118bcde	22.88±4.37abede	2.45±0.08bcde	329.20±36.15bcd	
S ₃ F ₂	16.10±0.46ab	0.39±0.03ab	17.30±0.50a	5.80±0.36cde	540±17cde	20.50±0.59abede	2.37±0.08de	425.50±29.37abcd	
S ₃ F ₃	13.22±0.56cd	0.33±0.01b	13.90±0.65cdef	5.95±0.39bcd	535±119cde	13.62±2.93e	2.93±0.14a	272.54±10.73de	
S ₃ F ₄	12.10±0.70cd	0.35±0.01abcd	12.80±0.72def	6.20±0.42bcd	505±177de	14.32±2.95de	2.39±0.10cde	241.50±14.10e	
S ₄ F ₁	12.03±0.42cd	0.31±0.01bcd	15.45±0.61abc	5.20±0.27def	845±116abc	25.59±3.62abc	2.19±0.06ef	563.20±93.24a	
S ₄ F ₂	12.27±0.46cd	0.38±0.02abc	14.35±0.65cde	5.90±0.35bcd	545±62cde	12.81±2.44e	2.27±0.06ef	565.38±93.24a	
S ₄ F ₃	11.48±0.59d	0.38±0.02abc	15.30±0.56bcd	5.00±0.18efg	515±48de	15.84±1.51cde	2.15±0.13ef	463.62±12.41ab	
S ₄ F ₄	14.30±0.84bc	0.35±0.01abcd	14.35±0.54cde	6.40±0.47abc	495±29e	15.75±0.92cde	2.69±0.05abc	445.68±5.67abc	
<i>F</i> 显著性检验 (<i>F</i> 值) Significance test (<i>F</i> value)									
水 Water	5.63*	8.94**	2.39	7.64**	7.06*	4.78**	6.83**	20.47**	
肥 Fertilizer	6.66**	4.63**	10.53**	20.60**	2.04	1.24	3.11*	2.97*	
水×肥 Water×fertilizer	4.58**	2.24*	4.88**	3.43**	0.84	2.35*	12.30**	0.46	

注: 同列不同字母表示在 0.05 水平差异显著, 相同字母表示差异不显著, * 和 ** 分别表示在 $P<0.05$ 和 $P<0.01$ 水平差异显著。下同。
Note: Values followed by different small letters in the same column mean significantly different at $P<0.05$; * and ** mean significant differences at the levels of $P<0.05$ and $P<0.01$, respectively. The same below.

表 4 不同水肥对羊草生长及草产量的影响

Table 4 Effects of different water and fertilizer on *L. chinensis* growth and grass yield

处理 Treatment	株高 Plant height (cm)	分蘖数 Tiller number (No. · m ⁻²)	干草产量 Hay yield (kg · hm ⁻²)
S ₁ F ₁	90.55±1.88g	3760±259bcd	7802±731c
S ₁ F ₂	107.40±1.97bcd	4425±258ab	8127±114c
S ₁ F ₃	101.00±4.26def	2955±415cd	9241±156b
S ₁ F ₄	98.20±1.82f	2675±443cd	9251±1111b
S ₂ F ₁	101.25±1.64def	4070±266abc	9305±334b
S ₂ F ₂	107.95±1.79bc	3310±97bcd	9459±289b
S ₂ F ₃	99.50±2.03ef	3165±80bcd	9478±378b
S ₂ F ₄	99.45±1.28ef	3115±50bcd	9359±520b
S ₃ F ₁	110.35±2.48b	2545±66d	9575±114b
S ₃ F ₂	118.70±2.53a	2635±55cd	9613±261b
S ₃ F ₃	102.10±1.81cdef	3985±355abc	9678±259b
S ₃ F ₄	101.20±1.79def	3275±542bcd	9823±322b
S ₄ F ₁	110.35±1.11b	3335±247bcd	10308±248b
S ₄ F ₂	104.35±1.39bcd	5155±1337a	10370±5395b
S ₄ F ₃	106.10±1.52bcd	3255±53bcd	10433±330b
S ₄ F ₄	107.05±2.06bcd	3150±115bcd	12320±370a

F 显著性检验 (*F* 值) Significance test (*F* value)

水 Water	16.01**	1.41	25.51**
肥 Fertilizer	12.99**	2.53	5.62**
水×肥 Water×fertilizer	6.42**	3.20**	1.91

表 5 不同水肥对羊草营养价值的影响

Table 5 Effect of different water and fertilizer on the nutritional value of *L. chinensis*

处理 Treatment	粗蛋白 Crude protein (%)	粗脂肪 Crude fat (%)	粗灰分 Crude ash (%)	中性洗涤纤维 NDF (%)	酸性洗涤纤维 ADF (%)	相对饲喂价值 RFV
S ₁ F ₁	9.74±0.18a	1.54±0.02def	11.24±0.77ab	58.24±0.40de	35.58±0.22b	94.01±0.53def
S ₁ F ₂	9.88±0.20a	1.48±0.02fg	8.18±0.82c	61.75±1.02a	38.52±0.34a	88.83±1.70gh
S ₁ F ₃	10.46±0.16a	1.40±0.03g	9.84±0.97abc	59.87±0.69abcd	38.36±0.31a	91.76±1.28fgh
S ₁ F ₄	9.70±1.12a	1.42±0.02g	9.12±0.73bc	61.55±1.70ab	36.64±0.63b	91.48±2.47fgh
S ₂ F ₁	9.76±0.36a	1.52±0.04ef	8.80±0.36bc	62.22±0.54a	39.84±0.56a	87.71±0.95h
S ₂ F ₂	10.04±0.23a	1.54±0.02def	9.58±0.64abc	61.19±1.39abc	38.62±0.49a	89.62±2.31fgh
S ₂ F ₃	10.64±0.28a	1.42±0.02g	9.76±0.75abc	58.14±1.02de	36.28±0.51b	96.92±2.28bcde
S ₂ F ₄	9.80±0.18a	1.42±0.02g	9.12±1.12bc	57.79±0.73de	35.44±0.38bc	97.51±1.56bcde
S ₃ F ₁	10.50±0.88a	1.62±0.02cd	10.04±0.93abc	59.79±0.58abcd	34.62±0.93cd	94.40±1.34def
S ₃ F ₂	10.48±0.18a	1.66±0.02bc	11.68±0.19a	58.63±0.80bcde	34.46±0.54cd	97.34±1.77bcde
S ₃ F ₃	10.66±0.31a	1.52±0.04ef	9.46±0.55abc	58.43±0.73cde	36.18±0.29b	98.71±2.32abcd
S ₃ F ₄	9.84±0.52a	1.56±0.05def	9.26±0.77abc	58.13±0.42de	33.76±0.28d	99.32±0.89abc
S ₄ F ₁	10.66±0.37a	1.72±0.02ab	10.40±0.57abc	61.01±0.69abc	36.18±0.29b	92.64±1.39efg
S ₄ F ₂	10.86±0.43a	1.78±0.02a	9.98±0.30abc	57.91±0.62de	33.76±0.28d	100.61±1.21abc
S ₄ F ₃	11.06±0.41a	1.68±0.04bc	9.68±0.86abc	57.29±0.66de	33.58±0.19d	101.92±1.19ab
S ₄ F ₄	10.90±0.88a	1.60±0.03cde	9.22±1.14abc	56.87±0.46e	33.28±0.46d	103.02±0.41a

F 显著性检验 (*F* 值) Significance test (*F* value)

水 Water	2.60	57.71**	0.78	5.25**	66.61**	24.22**
肥 Fertilizer	1.21	17.75**	1.08	4.97**	19.12**	12.33**
水×肥 Water×fertilizer	0.16	1.11	1.53	3.86**	1.89	3.95**

2.4 不同水肥对种子产量和干草产量灌溉水分利用率和肥料偏生产力的影响

灌水、施肥及其交互作用对干草的肥料偏生产力和灌溉水分灌水利用效率均有显著影响;灌水、施肥对种子肥料偏生产力有显著影响;灌水对种子灌溉水分利用效率有显著影响(表6)。

干草*iWUE*在S₁水平明显高于其他3个灌水梯度(图1a),干草*iWUE*介于2.86~10.28 kg·m⁻³,S₁F₄比S₄F₁增加了2.59倍。干草PFP的4个F₁水平明显高于其他3个施肥梯度,S₁到S₄呈逐渐增加的趋势(图1b);干草PFP介于17.13~76.36 kg·kg⁻¹,S₄F₁较S₁F₄增加了3.46倍(图1)。种子*iWUE*在4个灌水处理下随施肥梯度增加呈升高再降低趋势,最高点均在F₂梯度上(图1c);种子*iWUE*介于0.04~0.16 kg·m⁻³,S₁F₂比S₃F₄增加了3倍。种子PFP在4个灌水处理下随施肥梯度增加均呈下降趋势,最高点均在F₁梯度上(图1d);种子PFP介于0.21~2.09 kg·kg⁻¹,S₄F₁比S₁F₄增加了8.95倍。

表6 不同水肥对灌溉水分利用率和肥料偏生产力的影响

Table 6 Effects of different water and fertilizer on irrigation water use efficiency and partial factor productivity

项目 Item	处理 Treatment	灌溉水分利用率 <i>iWUE</i>		肥料偏生产力 PFP	
		种子 Seed	干草 Hay	种子 Seed	干草 Hay
F 显著性检验 (F 值)	水 Water	58.25 **	517.77 **	7.38 **	16.28 **
Significance test	肥 Fertilizer	5.70	4.54 **	24.32 **	609.05 **
(F value)	水×肥 Water×fertilizer	0.09	2.30 *	1.37	2.86 **

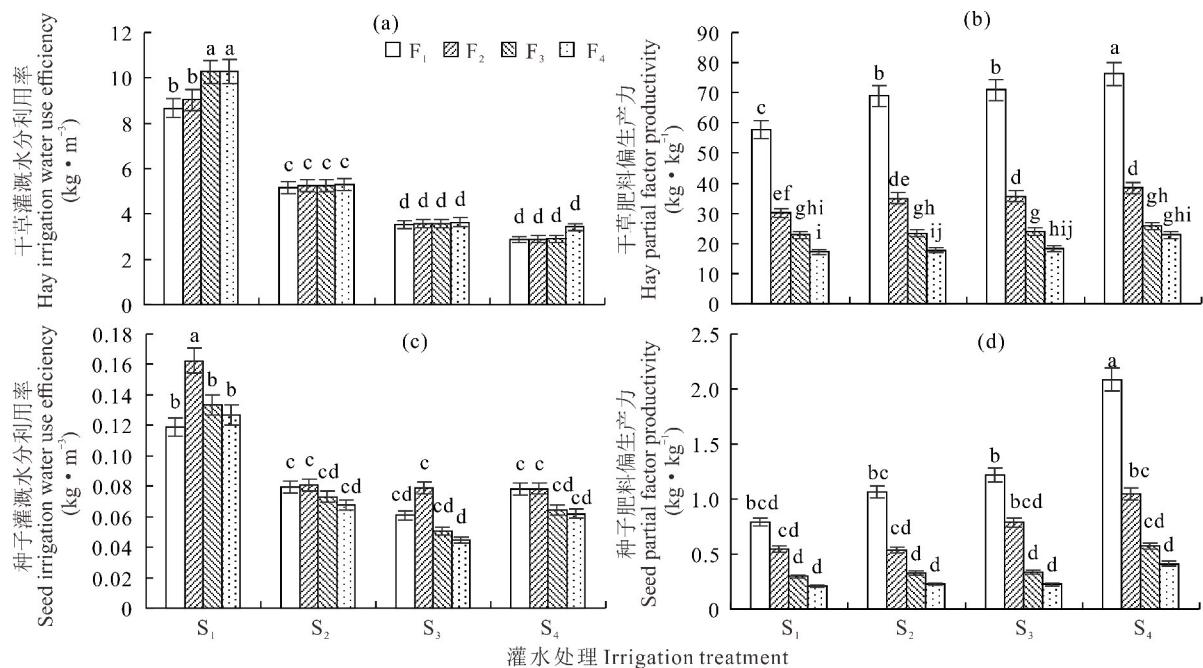


图1 不同水肥对灌溉水分利用率和肥料偏生产力的影响

Fig. 1 Effects of different water and fertilizer treatment on the irrigation water use efficiency and partial factor productivity

不同小写字母表示不同灌水量与施肥梯度下*iWUE*和PFP在0.05水平差异显著。Different lowercase letters indicate that *iWUE* and PFP at different levels of irrigation and fertilization gradient are significantly different at 0.05.

2.5 不同水肥对羊草产量、品质和种子产量的影响

以水肥投入为自变量,以羊草种子产量、种子*iWUE*、种子PFP、干草产量、干草*iWUE*、干草PFP、粗蛋白和RFV为因变量,分别建立了二次多项式回归方程。回归分析表明,水肥耦合对各因变量的影响均达到极显著水平($P<0.01$),决定系数(R^2)均在0.86以上(表7)。

表 7 水肥耦合对干草产量、种子产量、iWUE、PFP 和品质指标的回归模型

Table 7 Regression model of water and fertilizer coupling on hay yield, seed yield, iWUE, PFP and quality indicators

指标 index	回归方程 Regression equation	R ²	P
种子产量 Seed yield	$Y = 214.31 - 0.91S + 0.71F + 5.10 \times 10^{-3}S^2 - 8.96 \times 10^{-4}F^2 - 1.31 \times 10^{-3}SF$	0.92	<0.01
种子灌水水分利用率 Seed iWUE	$Y = 0.20 - 1.18 \times 10^{-3}S + 1.96 \times 10^{-3}F + 2.22 \times 10^{-6}S^2 - 2.85 \times 10^{-7}F^2 - 1.71 \times 10^{-7}SF$	0.92	<0.01
种子肥料偏生产力 Seed PFP	$Y = 0.21 + 6.11 \times 10^{-4}S - 1.06 \times 10^{-3}F + 1.62 \times 10^{-8}S^2 + 2.60 \times 10^{-6}F^2 - 1.34 \times 10^{-6}SF$	0.95	<0.01
干草产量 Hay yield	$Y = 7124.99 + 0.71S + 1.68F + 3.56 \times 10^{-5}S^2 + 2.07 \times 10^{-3}F^2 - 2.14 \times 10^{-4}SF$	0.93	<0.01
干草灌水水分利用率 Hay iWUE	$Y = 14.01 - 0.07S + 0.42F + 1.16 \times 10^{-4}S^2 - 1.09 \times 10^{-4}F^2 - 5.62 \times 10^{-6}SF$	0.99	<0.01
干草肥料偏生产力 Hay PFP	$Y = 15.05 + 0.05S - 0.10F - 6.01 \times 10^{-6}S^2 + 1.35 \times 10^{-4}F^2 - 4.23 \times 10^{-5}SF$	0.99	<0.01
相对饲喂价值 RFV	$Y = 92.39 - 2.42 \times 10^{-3}S - 2.99 \times 10^{-3}F + 5.30 \times 10^{-7}S^2 - 5.18 \times 10^{-6}F^2 + 9.18 \times 10^{-6}SF$	0.88	<0.01
粗蛋白 Crude protein	$Y = 9.92 - 6.29 \times 10^{-4}S + 0.01F + 1.89 \times 10^{-7}S^2 - 7.78 \times 10^{-6}F^2 + 2.81 \times 10^{-7}SF$	0.86	<0.01

注:式中“S”表示不同灌水量,“F”表示不同施肥量。

Note: In the formula, “S” indicates different irrigation amount, and “F” indicates different fertilizer application amount.

以 S_1 、 F_1 为灌水施肥下限, S_4 、 F_4 为灌水施肥上限, 分别求出各方程的最大值, 以及对应的灌水量和施肥量, 分别求出各方程的最大值(表 7), 并得到获得最大值时的灌水量和施肥量。当灌水量为 360 mm, 施肥量为 540 kg · hm⁻² 时, 干草产量(11249 kg · hm⁻²)和 RFV(105)最大; 当灌水量为 360 mm, 施肥量为 135 kg · hm⁻² 时, 种子 PFP(1.89 kg · kg⁻¹)和干草 PFP(74.69 kg · kg⁻¹)最大; 当灌水量为 360 mm, 施肥量为 357 kg · hm⁻² 时, 粗蛋白(11.08 %)最大; 当灌水量为 360 mm, 施肥量为 135 kg · hm⁻² 时, 种子产量(565.38 kg · hm⁻²)最大; 当灌水量为 90 mm, 施肥量为 317 kg · hm⁻² 时, 种子 iWUE(0.14 kg · m⁻³)最大; 当灌水量为 90 mm, 施肥量为 540 kg · hm⁻² 时, 干草 iWUE(10.10 kg · m⁻³)最大; 可见几个指标不能同时达到最大(表 8)。

表 8 最大干草产量、种子产量、灌溉水分利用率、肥料偏生产力及品质的灌水量和施肥量

Table 8 Maximum hay yield, seed yield, iWUE, PEP and quality required for irrigation and fertilization

因变量 Response variable (Y)	因变量最大值 Maximum of response variable	灌水量 Irrigation amount (mm)	施肥量 Fertilization amount (kg · hm ⁻²)
种子产量 Seed yield (kg · hm ⁻²)	565.38	360	132
种子灌溉水分利用率 Seed iWUE (kg · m ⁻³)	0.14	90	317
种子肥料偏生产力 Seed PFP (kg · kg ⁻¹)	1.89	360	135
干草产量 Hay yield (kg · hm ⁻²)	11249	360	540
干草灌溉水分利用率 Hay iWUE (kg · m ⁻³)	10.10	90	540
干草肥料偏生产力 Hay PFP (kg · kg ⁻¹)	74.69	360	135
相对饲喂价值 RFV	105	360	540
粗蛋白 CP (%)	11.08	360	357

由于种子产量、干草产量、RFV 和粗蛋白难以同时达到最大,且各指标具有不同的量纲,不能直接比较,因此对种子产量、干草产量、RFV 和粗蛋白分别除以其最大值进行归一化处理,即可以得到水肥耦合与种子产量、干草产量、RFV 和粗蛋白的关系(图 2)。对种子产量、干草产量、RFV 和粗蛋白进行综合评价,可以看出相对 RFV、相对粗蛋白和相对干草产量在 0.9 可接受区有重合区域,均随灌水、施肥量增加呈上升趋势,而相对种子产量、相对种子肥料偏生产力和相对干草肥料偏生产力在 0.8 可接受区有重合区域。

根据空间分析方法,对 RFV、粗蛋白、干草产量、种子产量、种子肥料偏生产力和干草肥料偏生产力各指标 95%、90%、85% 和 80% 的可接受区域进行了评价。综合分析可知,水肥耦合效应根据羊草生产目的而定,羊草种植以收获干草和饲草品质为目的,可将灌水量定为 288~360 mm、施肥量为 324~540 kg · hm⁻²;羊草种植以收获种子和肥料高效利用为目的,可将灌水量定为 288~360 mm、施肥量为 108~216 kg · hm⁻²。

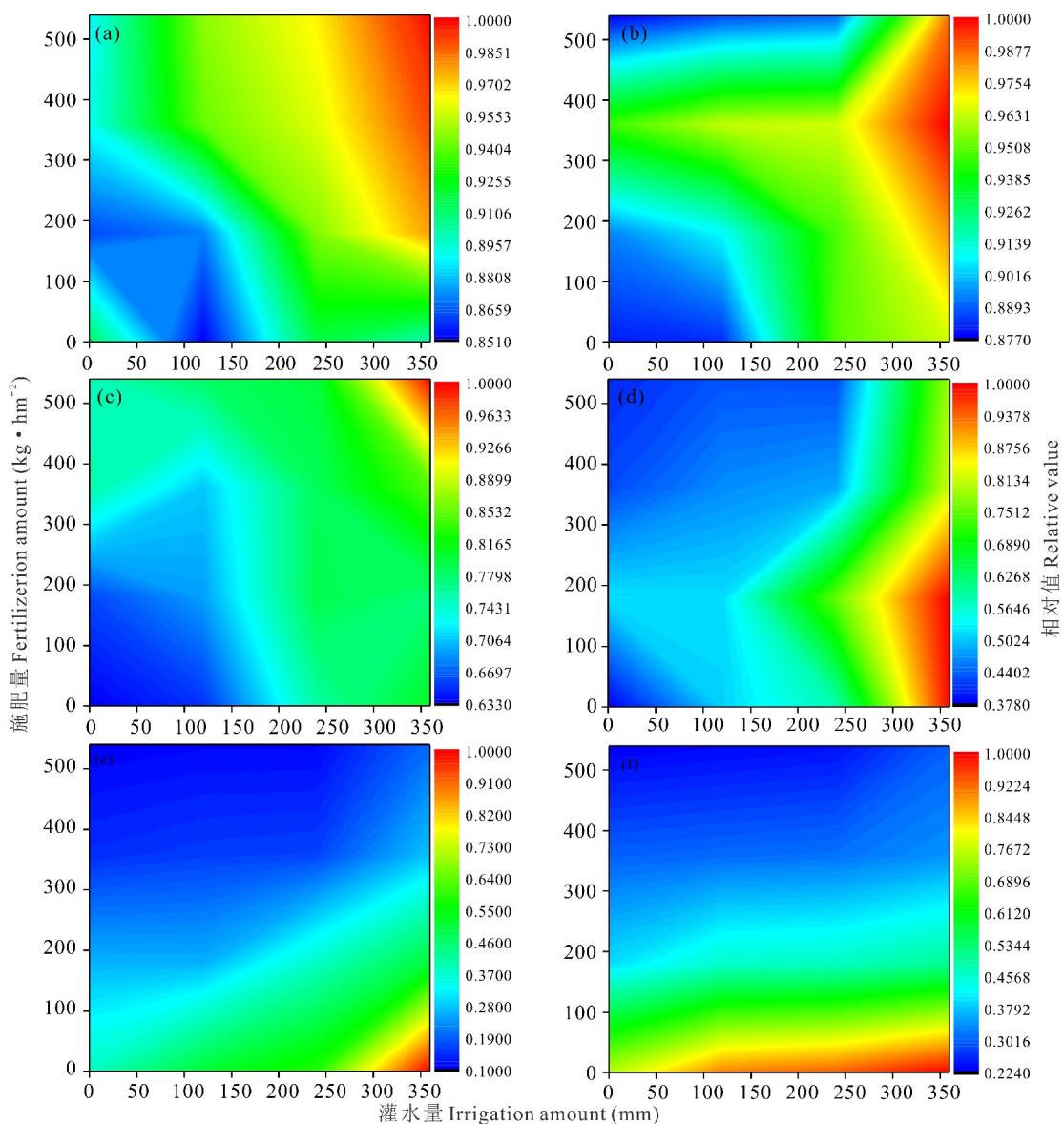


图 2 水肥投入与相对种子产量、相对干草产量、相对饲喂价值的关系

Fig. 2 The relation between water and fertilizer input and relative seed yield, relative hay yield and RFV

a: 相对饲喂价值 RFV; b: 相对粗蛋白 Relative crude protein; c: 相对干草产量 Relative hay yield; d: 相对种子产量 Relative seed yield; e: 相对种子肥料偏生产力 Relative seed PFP; f: 相对干草肥料偏生产力 Relative hay PFP.

3 讨论

水肥调控对羊草种子构成因素及产量有极大的影响^[15]。苏富源等^[16]认为随着生长年限的增加,羊草种子高产所需施氮量增大,抽穗数不受当年施用氮肥的影响,抽穗数增加导致的穗长、千粒重和每穗小花数减少,可以通过添加氮素来给予补偿;鄂春阳^[17]认为在农业生产中秋季7月下旬施氮水平为135 kg·hm⁻²时羊草种子产量最大;本试验获得种子产量的最优灌水、施肥量分别是360 mm、132 kg·hm⁻²,因试验与上述研究所施肥料不同,施肥时间和地区不同,所得具体的最优灌水施肥量略有差别。与前人研究相同的是合理的水肥调控能显著增加羊草的生殖枝数,促进生殖枝数的形成,为种子产量的形成和提高奠定基础^[15]。

水肥条件是调控羊草产草量的重要措施。大量研究表明,灌水、施肥在一定范围内有明显的正效应和耦合效应,但灌水、施肥量并不是无限制的,超过一定范围会呈下降趋势^[18]。尤英豪^[19]通过对羊草草地施肥效果探究认为施肥可以提高羊草产量。赵雪^[20]通过不同土壤水分含量对羊草生长的研究认为土壤水分促进羊草叶、茎等器官的生长,提高羊草生物量。戚秋慧等^[21]研究表明灌水和施肥处理后羊草群落内植物生长旺盛,叶色浓绿,植

株较大且多,尤以施肥和灌水配合条件下更为明显。郭慧慧^[22]认为氮、磷、钾肥显著影响羊草产草量,其中氮、磷、钾配施增产较对照增加了 2.25 倍。本试验中干草产量最优水肥处理 S₄F₄ 所对应的灌水、施肥量分别是 360 mm、540 kg·hm⁻²,比最小处理 S₁F₁ 增加了 1.58 倍。试验中干草产量随灌水、施肥量的增加呈逐渐上升趋势,与前人研究^[18-22]的结果基本相同,而增加倍数有所不同,是由于各地区由于土壤类型、土壤质地不同,不同灌水、施肥量对各地区草地生物量变化影响则不同。

羊草作为家畜重要的饲草来源,营养价值的评价占据着至关重要的作用。本试验中灌水、施肥及其交互作用对粗蛋白含量影响不显著,可能是受刈割时期的影响,因为有研究^[22]认为从返青至成熟期,营养价值随着生育期的进程不断下降,开花结实后粗蛋白含量急剧下降。本试验粗蛋白含量在 S₁~S₄ 灌水梯度上,随着施肥量的增加均呈先上升再下降趋势,最高值均出现在 F₃ 水平;相对饲喂价值随灌水、施肥量的增加呈逐渐上升趋势,在 S₄ 梯度,F₂、F₃、F₄ 水平的 RFV 值大于 100.00 以上,参考美国的草地质量标准,说明饲草质量较高^[23]。粗蛋白和 RFV 作为评价饲草品质的 2 个重要指标,RFV 可以较好地反映羊草干草的饲用价值,但在对羊草干草做分级时也应考虑到粗蛋白含量对品质的影响^[24],因此综合得出 S₄F₃ 处理(灌水量 360 mm、施肥量 405 kg·hm⁻²)的粗蛋白和 RFV 同时优于其他处理组合,可以为今后该地区羊草生产提供一定的参考。

4 结论

S₄F₁ 处理(灌水量为 360 mm、施肥量为 132 kg·hm⁻²)的羊草种子产量最高,S₄F₄ 处理(灌水量为 360 mm、施肥量为 540 kg·hm⁻²)的干草产量和 RFV 最高。水肥耦合效应根据羊草生产目的而定,羊草种植以收获干草和饲草品质为目的,可将灌水量定为 288~360 mm、施肥量为 324~540 kg·hm⁻²;羊草种植以收获种子和肥料高效利用为目的,可将灌水量定为 288~360 mm、施肥量为 108~216 kg·hm⁻²。

参考文献 References:

- [1] Su F Y. Effects of water and fertilizer in artificial *Leymus chinensis* grassland. Yangling: Northwest A&F University, 2016. 苏富源. 人工羊草地水肥效应研究. 杨凌: 西北农林科技大学, 2016.
- [2] Jiang J J, Qu F, Su C J, et al. Effects of different water and fertilizer coupling on yield and quality of cucumber and partial factor productivity of fertilizer. *Scientia Agricultura Sinica*, 2019, 52(1): 86—97. 蒋静静, 屈锋, 苏春杰, 等. 不同肥水耦合对黄瓜产量品质及肥料偏生产力的影响. 中国农业科学, 2019, 52(1): 86—97.
- [3] Pan J, Liu Y, Zhong X. Grain yield, water productivity and nitrogen use efficiency of rice under different water management and fertilizer-N inputs in South China. *Agricultural Water Management*, 2017, 184: 91—200.
- [4] Li Y, Sun Y, Liao S. Effects of two slow-release nitrogen fertilizers and irrigation on yield, quality, and water-fertilizer productivity of greenhouse tomato. *Agricultural Water Management*, 2017, 186: 139—146.
- [5] Bian Q Y, Wang Z H, Hu J S, et al. Effects of water and fertilizer coupling on photosynthetic characteristics, growth and yield of red jujube under drip irrigation condition. *Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica*, 2018, 27(5): 707—715. 扁青永, 王振华, 胡家帅, 等. 水肥耦合对南疆沙区滴灌红枣光合特性及产量的影响. 西北农业学报, 2018, 27(5): 707—715.
- [6] Sun H X, Chang S Y, Chen X L, et al. Effects of *Leymus chinensis* harvested in different seasons on intake and digestibility of sheep. *Acta Agrestia Sinica*, 2016, 24(6): 1369—1373. 孙海霞, 常思颖, 陈孝龙, 等. 不同季节刈割羊草对绵羊采食量和养分消化率的影响. 草地学报, 2016, 24(6): 1369—1373.
- [7] Luo D L T. Study on the effect of different drying and water loss methods on the nutritional quality of pasture. *Contemporary Animal Husbandry*, 2017, (11): 126—127. 罗斗拉太. 不同干燥失水方式对牧草营养品质影响的研究. 当代畜牧, 2017, (11): 126—127.
- [8] Ji Q W, Han R D, Dong K H, et al. Nutrient contents and rumen degradability characteristics of *Bothriochloa ischaemum* at different growth stages. *Acta Agrestia Sinica*, 2015, 23(6): 1295—1302. 姬奇武, 韩汝旦, 董宽虎, 等. 不同生长期白羊草的营养成分及绵羊瘤胃降解特性. 草地学报, 2015, 23(6): 1295—1302.
- [9] Han S J, Ji Q W, Han R D, et al. Evaluation of the nutritive value of different *Bothriochloa ischaemum* populations in Shanxi by grey relational grade analysis. *Chinese Journal of Grassland*, 2016, 38(1): 47—53. 韩世洁, 姬奇武, 韩汝旦, 等. 山西不同居群白羊草营养价值灰色关联度分析. 中国草地学报, 2016, 38(1): 47—53.
- [10] Dong X B, Hao M D, Xiao Q H, et al. Effect of potassium fertilization on the yield, quality and nutrients uptake of *Leymus*

- chinensis*. Grassland and Turf, 2015, 35(1): 20—26.
- 董晓兵, 郝明德, 肖庆红, 等. 不同钾肥施用量对羊草产量、品质及养分吸收的影响. 草原与草坪, 2015, 35(1): 20—26.
- [11] Wang Y. Phenotype character identification and drought resistance evaluation of alfalfa germplasm resources. Yinchuan: Ningxia University, 2018: 60.
- 王焱. 紫花苜蓿种质资源表型性状鉴定及抗旱性评价. 银川: 宁夏大学, 2018: 60.
- [12] Yang F, Ma W L, Chen Y W. The effects of uniform sowing and drip irrigation on the spike differentiation and yield of spring wheat. Crops, 2018, (4): 84—88.
- 杨飞, 马文礼, 陈永伟. 匀播、滴灌对春小麦幼穗分化进程及产量的影响. 作物杂志, 2018, (4): 84—88.
- [13] Cui F J, Tian F D, Wang Z G, et al. Comparison and evaluation of quality traits between forage sorghum varieties. Acta Agrestia Sinica, 2012, 20(6): 1112—1116.
- 崔凤娟, 田福东, 王振国, 等. 饲用高粱品种品质性状的比较及评价. 草地学报, 2012, 20(6): 1112—1116.
- [14] Dai X, Mu Q Y L, Ao D, et al. Effect of algae active cell biological fertilizer on yield and quality of alfalfa. Heilongjiang Animal Science and Veterinary Medicine, 2018, (22): 164—167.
- 代小, 木其叶乐, 敖敦, 等. 藻类活性细胞生物肥对苜蓿草产量及品质的影响. 黑龙江畜牧兽医, 2018, (22): 164—167.
- [15] Yu H. Studies on the effects of optimal nitrogen application and irrigation time on seed yield and yield components of *Leymus chinensis*. Changchun: Northeast Normal University, 2010.
- 于辉. 羊草种子产量构成因子与产量最适调控时间的研究. 长春: 东北师范大学, 2010.
- [16] Su F Y, Hao M D, Niu Y H, et al. Effects of nitrogen fertilizer on seed yield and yield components in artificial *Leymus chinensis* grassland. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2016, 22(5): 1393—1401.
- 苏富源, 郝明德, 牛育华, 等. 适宜氮肥可提高人工羊草的抽穗数和种子产量. 植物营养与肥料学报, 2016, 22(5): 1393—1401.
- [17] E C Y. Effects of nitrogen time and rate on forage and seed yield of *Leymus chinensis*. Changchun: Northeast Normal University, 2017.
- 鄂春阳. 施氮时间和水平对羊草饲草和种子产量的影响. 长春: 东北师范大学, 2017.
- [18] Zhang J H, Liu H B, Bai Y G, et al. Coupling effect of water and fertilizer on grape under drip irrigation in extremely arid regions. Acta Pedologica Sinica, 2018, 55(4): 804—814.
- 张江辉, 刘洪波, 白云岗, 等. 极端干旱区滴灌葡萄水肥耦合效应研究. 土壤学报, 2018, 55(4): 804—814.
- [19] You Y H. Study on the effects of fertilizer application in grassland of *Aneurolepidium chinense*. Journal of Jilin Forestry Science and Technology, 2005, (1): 38—40, 44.
- 尤英豪. 羊草草地施肥效果探究. 吉林林业科技, 2005, (1): 38—40, 44.
- [20] Zhao X. Effects of different soil moisture content on the growth of *Leymus chinensis*. Changchun: Jilin University, 2012.
- 赵雪. 不同土壤水分含量对羊草生长的影响. 长春: 吉林大学, 2012.
- [21] Qi Q H, Sheng X H, Jiang S. The effects on community photosynthetic rate of *Aneurolepidium chinense* after irrigation and fertilization treatments. Bulletin of Botanical Research, 1990, (3): 99—105.
- 戚秋慧, 盛修武, 姜恕. 灌水施肥对羊草(*Aneurolepidium chinense*)草原群落光合速率的影响. 植物研究, 1990, (3): 99—105.
- [22] Guo H H. Effect of different fertilizers on the productivity and nutrient accumulation of artificial *Leymus chinensis* meadow. Yangling: Northwest A & F University, 2016.
- 郭慧慧. 不同施肥对人工羊草地生产力及养分吸收影响的研究. 杨凌: 西北农林科技大学, 2016.
- [23] Peng A Q, Li X M, Wang H, et al. Production performance and relative feed value of eight annual forage crops. Prataculturaal Science, 2019, 36(2): 510—521.
- 彭安琪, 李小梅, 王红, 等. 8种一年生饲料作物生产性能及相对饲用价值. 草业科学, 2019, 36(2): 510—521.
- [24] Xiong Y, Xu Q F, Yu Z, et al. Evaluation of nutritional components and feeding value of different alfalfa hay. Acta Agrestia Sinica, 2018, 26(5): 1262—1266.
- 熊乙, 许庆方, 玉柱, 等. 不同苜蓿干草营养成分及饲用价值评价. 草地学报, 2018, 26(5): 1262—1266.