

圆形喷灌机条件下水肥耦合对紫花苜蓿产量的影响

李茂娜¹ 王晓玉¹ 杨小刚² 田彦军³ 严海军¹

(1. 中国农业大学水利与土木工程学院, 北京 100083; 2. 中国农业机械化科学研究院, 北京 100083;
3. 鄂托克旗草原工作站, 鄂尔多斯 016100)

摘要: 在内蒙古鄂尔多斯市赛乌素地区开展了圆形喷灌机喷灌均匀性试验和苜蓿水肥耦合试验,研究了圆形喷灌机水肥耦合对苜蓿产量的影响。结果表明,建植5a并每年刈割3茬的紫花苜蓿,年需水量为469.4 mm,其各茬产量和水分利用效率(WUE)均逐茬递减,耗水量逐茬增加。适当减少灌水量(80% ET_c)不会造成苜蓿的产量下降,但当灌水量减少至60% ET_c 时,产量会显著下降。苜蓿全年3茬均采用80% ET_c 的灌水处理可获得产量和WUE的最佳组合。第1茬施用90 kg/hm²的磷钾复合肥,第2、3茬施用70 kg/hm²的尿素时苜蓿的肥料偏生产力(PFP)最高,但不同肥力水平对苜蓿产量无显著影响,在全生长季内水肥耦合效应对苜蓿产量影响均不显著。圆形喷灌机尾枪控制面积内的实际灌水量超过其余控制面积的1/3,但产量未相应增加,建议合理配置尾枪以提高苜蓿水分利用效率。

关键词: 紫花苜蓿; 圆形喷灌机; 喷灌均匀性; 水肥耦合; 产量

中图分类号: S275.5; S551+.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2016)01-0133-08

Effects of Water-fertilizer Coupling on Alfalfa Yield
under Center Pivot Irrigation System

Li Maona¹ Wang Xiaoyu¹ Yang Xiaogang² Tian Yanjun³ Yan Haijun¹

(1. College of Water Resources and Civil Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China
2. Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences, Beijing 100083, China
3. Grassland Workstation of Etoke Banner, Erdos 016100, China)

Abstract: A test on water application uniformity of center pivot system and field experiment of water-fertilizer coupling on alfalfa were conducted at Saiwusu, Inner Mongolia, to evaluate the effect of water and fertilizer coupling on hay yield by center pivot system. The results show that annual water requirement is 469.4 mm for alfalfa of fifth years and three harvests every year. Yield and crop water use efficiency decreased by crop, while water consumption increased. No significant differences existed in alfalfa yield between 100% ET_c and 80% ET_c irrigation level, but 60% ET_c level caused an obvious reduction. It can obtain the best combination of yield and crop water use efficiency when using 80% ET_c irrigation level for each harvest. Alfalfa applied with 90 kg/hm² phosphate-potassium compound fertilizer for the first crop and 70 kg/hm² urea fertilizer for the second crop has the highest partial factor productivity (PFP). Neither fertilizer application nor water-fertilizer coupling has no significant effect on alfalfa yield in the whole growing season. The actual irrigation amounts applied by the end gun are one third larger than that in the other circular area of the system, while the hay yield has no corresponding increase. In order to reduce waste of irrigation water, the end gun should be selected properly in center pivot irrigation system.

Key words: alfalfa; center pivot; water application uniformity; water-fertilizer coupling; yield

收稿日期: 2015-07-30 修回日期: 2015-10-13
基金项目: 国家自然科学基金项目(51321001)、国家高技术研究发展计划(863计划)项目(2011AA100506)和土壤植物机器系统技术国家重点实验室开放课题项目(2014-SKL-09)
作者简介: 李茂娜(1991—),女,博士生,主要从事节水灌溉技术研究,E-mail: 13021989415@163.com
通信作者: 严海军(1974—),男,教授,博士生导师,主要从事节水灌溉技术与装备研究,E-mail: yanhj@cau.edu.cn

引言

紫花苜蓿是我国栽培面积最大的一种牧草,截止2011年底,全国种植面积达377.47万 hm^2 ^[1]。内蒙古地区是我国三大紫花苜蓿产区之一,产草量居全国之首^[2],但是干旱缺水已成为制约该地区苜蓿产量和品质的主要因素。圆形喷灌机具有节水增产明显、控制灌溉面积大、自动化程度高、省工省力^[3-4]等优点,已成为苜蓿种植区主要推广的节水灌溉技术。据不完全统计,内蒙古地区用圆形喷灌机的苜蓿灌区总面积已近7万 hm^2 ,其中赤峰阿鲁科尔沁旗推广圆形喷灌机喷灌苜蓿面积达4万 hm^2 。

苜蓿是喜干旱作物,灌水过多容易造成苜蓿生长不良和病虫害频发。研究发现,提高喷灌均匀性可以促进苜蓿生长和产量的提升^[5],适当减少灌水不会造成苜蓿减产,反而有助于提高苜蓿的水分利用效率^[6-7]。为了减少风的影响,圆形喷灌机通常选择倒挂方式安装低压喷头,同时为了扩大灌溉面积,在喷灌机的悬臂末端安装尾枪,但实际应用中低压喷头和尾枪选型配置往往不合理,导致机组的喷灌均匀性较差。

研究表明,水肥耦合对小麦、玉米、番茄等作物具有明显的增产作用^[8-9],但关于苜蓿水肥耦合效应的研究结果差异却较大^[10],尤其是氮肥方面,部分学者认为氮肥会提高产量^[11],但也有学者指出施用氮肥会降低苜蓿的固氮能力,对苜蓿产量无明显作用^[12]。本文开展圆形喷灌机喷灌苜蓿的水肥耦合试验,研究基于圆形喷灌机喷灌条件下水肥耦合对苜蓿产量的影响,为内蒙古半干旱地区制定紫花苜蓿的喷灌施肥制度以及实现圆形喷灌机喷灌苜蓿的智能化控制提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验地位于内蒙古自治区鄂托克旗赛乌素村草场内,地处北纬 $38^{\circ}56'$,东经 $106^{\circ}49'$,海拔高度约1350 m。年日照时数3000 h左右,年平均气温 $6.5 \sim$

7.5°C ,年降水量200~250 mm,年蒸发量3000 mm左右,降水较为集中,主要分布在7—9月份,属于典型的温带大陆性季风气候。试验地地势平坦,土壤质地为砂壤土,0~30 cm土层土壤干容重为 1.30 g/cm^3 ,田间持水率(FC)为 $0.26 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$,平均pH值为8.50,碱解氮质量比 71.34 mg/kg ,速效磷质量比 25.67 mg/kg ,速效钾质量比 84.09 mg/kg ,有机质质量比 10 g/kg ,灌溉水源为地下水,地下水埋深30 m。

1.2 试验材料

试验地苜蓿供试品种为中苜1号,已生长至第5年(丰产年)。苜蓿种植采用条播方式,行距30 cm,采用美国Valmont公司的圆形喷灌机进行灌溉。机组共有2跨,单跨长54.86 m,悬臂长25.08 m。喷灌机安装美国Nelson公司的R3000型低压喷头,选配0.14 MPa的压力调节器,悬臂末端安装尾枪,采用Komet公司的Twin101型喷头,当喷头工作压力0.2 MPa时,喷头流量 $13.9 \text{ m}^3/\text{h}$,射程27.9 m,机组入机流量 $48 \text{ m}^3/\text{h}$ 。

1.3 试验设计

试验于2014年3—9月进行,包括圆形喷灌机的喷灌均匀性试验与喷灌苜蓿的水肥耦合试验。喷灌均匀性试验参照相关标准^[13]进行,试验条件与试验步骤均满足要求。试验时以喷灌机的中心支轴为圆心,径向布置2排雨量筒,其中最末端有效雨量筒的间距为24 m。雨量筒间距3 m,每排布置51个,2排雨量筒交错布置(图1)。试验期间,每隔15 min分别在中心支轴及末端附近距地面高度2 m的代表点测量风速和主风向。同时,在试验开始前和结束时测量空气干球温度、相对湿度以及喷灌机的入机工作压力。

水肥耦合试验采用双因素完全随机试验设计,设计灌水量和施肥量2个因素,其中灌水量设3个水平($100\% ET_c$ 、 $80\% ET_c$ 、 $60\% ET_c$),施肥量设4个水平(高、中、低、无),共12个处理,其中尾枪控制面积均采用无肥处理,用于比较尾枪控制面积内灌水量超高对苜蓿产量的影响。布置用于苜蓿第1茬撒施磷钾复合肥(P_2O_5 和 K_2O 含量大于等于41%)

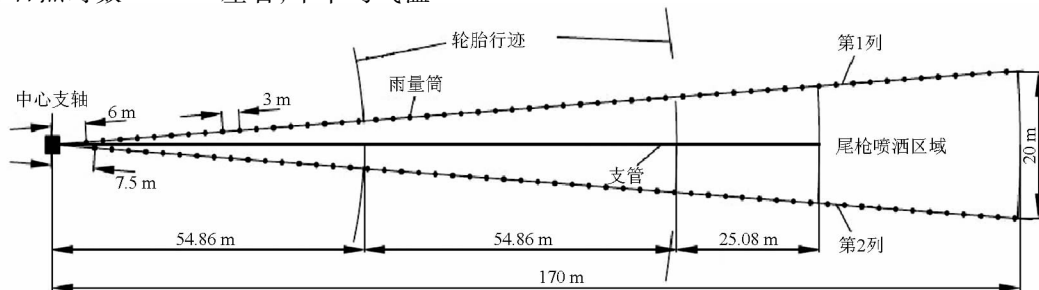


图1 圆形喷灌机喷洒均匀性试验布置图

Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus of water application uniformity of center pivot system

作为基肥,高、中、低、无 4 个施肥水平分别按照 270、180、90、0 kg/hm²施入,在第 2、3 茬撒施尿素(N 含量大于等于 46%),高、中、低、无 4 个施肥水平分别按照 150、105、70、0 kg/hm²施入。每次施肥均采用人工撒施方式,而且在每茬的首次灌水时一次性施入。试验灌水周期根据土壤含水率情况确定,当 100% *ET_c* 水平下的土壤含水率达到灌水下限(60% FC)时开始灌溉,每次灌水量为灌水周期内累积的作物需水量减去累积有效降水量(大于 5 mm 的降水)。试验中为保证苜蓿正常返青,返青期内均采用统一灌水处理。作物需水量的具体计算过程:首先由各气象参数根据 Penman - Monteith 公式^[14]计算出参考作物蒸发蒸腾量(*ET_o*)。

$$ET_o = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273}u_2(e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)}$$

(1)

式中 *R_n*——植被表面净辐射量,MJ/(m²·d)
G——土壤热通量,MJ/(m²·d)
 Δ ——饱和水汽压与温度关系曲线的斜率,kPa/℃
 γ ——湿度计常数,kPa/℃
T——空气平均温度,℃
u₂——在地面以上 2 m 高处 的风速,m/s
e_s——空气饱和水汽压,kPa
e_a——空气实际水汽压,kPa

根据 FAO56 标准确定出苜蓿不同生长期的作物系数(*K_c*),计算出作物蒸发蒸腾量(*ET_c*)作为作物需水量。

$$ET_c = K_c ET_o$$

(2)

表 1 为试验的 12 个处理,每个处理 3 次重复,共 36 个小区,在喷灌机圆周方向每隔 30°的扇形地块设置 1 个灌水小区,每个试验小区面积均为 7 m × 10 m,施肥水平的高、中、低处理分别随机设置在喷灌机的第 1 跨、第 2 跨、悬臂喷灌区内,无肥处理均设置在尾枪喷灌区内,各小区在圆形喷灌机控制面积内的具体布置见图 2。各试验小区株数基本保持一致,故可认为长势一致。试验期间各处理的除草、

表 1 苜蓿水肥耦合试验处理

灌水处理	施肥处理			
	F1	F2	F3	F0
	(高水平)	(中水平)	(低水平)	(无处理)
W1(100% <i>ET_c</i>)	W1F1	W1F2	W1F3	W1F0
W2(80% <i>ET_c</i>)	W2F1	W2F2	W2F3	W2F0
W3(60% <i>ET_c</i>)	W3F1	W3F2	W3F3	W3F0

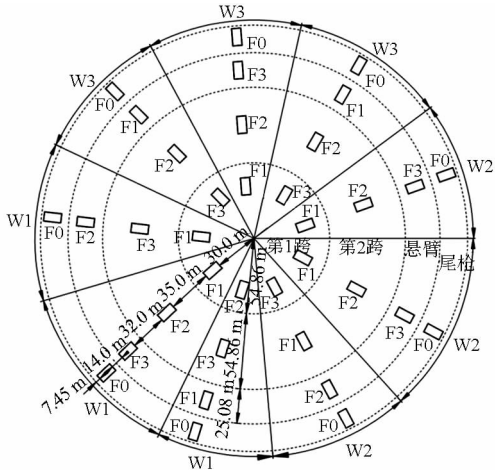


图 2 圆形喷灌机及试验小区布置图
Fig.2 Center pivot system and experimental plot

病虫害防治等田间管理保持一致。

1.4 测定项目及方法

(1)气象数据

在试验区安装自动气象站(HOBO,美国)实时监测气象数据,包括降水量、风速、风向、气温、相对湿度、太阳辐射等。

(2)苜蓿指标

干草产量采用大小样方结合的方法。先测量大样方的鲜草产量(精确到 0.1 g),然后从中随机挑出一部分样品测量鲜草质量记为鲜样质量(精确到 0.01 g),并将称取过鲜样质量的样品放入干燥箱,105℃杀青 30 min 后将温度调到 65℃,恒温下干燥 48 h,冷却后取出称量干草质量记为干样质量(精确到 0.01 g);大样方的干草产量即为其鲜草产量与小样方的干鲜比(干鲜比即为干样质量与鲜样质量的比值)的乘积。其中,大样方的鲜草产量采用对角线刈割法,在每个小区内用对角线法取 3 处样方,每处样方选取 1 m × 1 m 刈割,留茬 5 cm 左右,刈割后除去杂草立即称取全部样方鲜草质量。试验地一年刈割 3 茬,每茬均在苜蓿初花期进行。

(3)土壤水分

试验共安装 6 组负压计,安装深度 25 cm,6 组负压计均安装在圆形喷灌机第 2 跨内的 100% *ET_c* 的 3 个小区内,每个小区安装 2 组,主要监测不同位置的土壤水吸力情况,最终取 6 组数据的平均值,以消除土壤空间变异对灌水时间的影响,确定合适的灌水时间。另外,每次灌水前后的 1 d 使用烘干法土钻取土测量土壤质量含水率,每个小区取 1 个点,取土深度 0 ~ 100 cm,按照 0 ~ 20 cm、20 ~ 40 cm、40 ~ 60 cm、60 ~ 80 cm、80 ~ 100 cm 分层取土。

(4)实际灌水量

每次灌水时沿圆形喷灌机纵向方向,分别在第

1 跨、第 2 跨、悬臂以及尾枪的喷灌控制面积内的中间位置布置 4 个雨量筒,每个雨量筒间距 3 m,用以观测各控制面积内的实际灌水量。

(5)水分利用效率(WUE)

植株生产单位面积产量所消耗的水量,即产量与耗水量的比值,单位为 kg/m^3 。

(6)肥料偏生产力(PFP)

单位投入的肥料所能生产的作物产量,即产量与肥料投入量的比值,单位为 kg/kg 。

1.5 数据分析

采用 Excel 2003 和 SPSS 20.0 软件进行数据分析,利用 Origin 8.0 软件制图。

2 结果与分析

2.1 圆形喷灌机喷灌均匀性

圆形喷灌机喷灌均匀性试验时百分率计时器设定值为 30%,试验期间风速为 0.15 ~ 2.0 m/s,平均温度为 15.5℃,平均湿度为 36%。根据相关标准^[13]计算可知,第 1 跨、第 2 跨、悬臂和尾枪的喷灌控制面积内的平均喷灌均匀系数分别是 82.85%、89.29%、83.86% 和 62.87%。尾枪喷灌控制面积内的均匀性较差,导致包含尾枪喷灌区雨量筒数据的整机综合喷灌均匀系数只有 64.57%。此外试验测得,在第 1 跨、第 2 跨、悬臂喷灌区内的喷灌水深较接近,平均喷灌水深为 5.24 mm,但尾枪控制面积内的平均喷灌水深达 8.81 mm,超出其他喷灌区平均喷灌水深 40.45%。尾枪喷灌区灌水量严重超高的原因是尾枪选型不合理、尾枪流量占入机总流量比重过大。

2.2 试验期间的气象条件与灌水量

试验地一年刈割 3 茬,2014 年试验地苜蓿于 4 月 5 日返青,6 月 5 日第 1 茬刈割,7 月 16 日第 2 茬刈割,8 月 30 日第 3 茬刈割。表 2 是试验年间苜蓿各茬生育期时间,3 茬生长时长分别为 61、41、49 d。

表 2 试验期间各茬苜蓿生育期

茬次	生育期			
	返青期	分枝期	现蕾期	初花期
第 1 茬	4 月 5 日	4 月 18 日	5 月 14 日	5 月 31 日
第 2 茬	6 月 8 日	6 月 14 日	7 月 2 日	7 月 11 日
第 3 茬	7 月 18 日	7 月 24 日	8 月 16 日	8 月 27 日

图 3 是试验期间各灌溉周期内的累积 ET_0 以及试验期间的有效降水状况。结果表明试验期间有效降水共 96.21 mm,其中最大单次降水为 12.61 mm。大量研究表明当降水低于 280 mm 时苜蓿会生长不

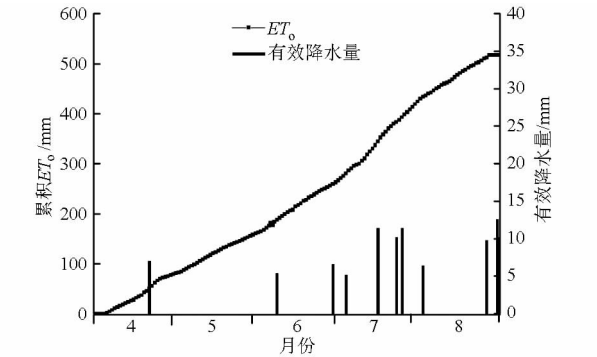


图 3 试验期间各灌溉周期内的累积 ET_0 及有效降水量状况

Fig. 3 Cumulative ET_0 in each irrigation cycle and effective rainfall during experiment

良,因此苜蓿生产需要灌溉^[15]。

表 3 为苜蓿在各茬不同时期内的 K_c 值、 ET_c 值以及不同处理下的设计灌水量与灌溉时间,由表可知,W1、W2、W3 处理下的灌水量分别是 417.6、344.6、271.7 mm。每茬返青期内首次灌溉时采用 100% ET_c 的统一灌水处理,其余生育期均按照试验处理进行灌水。结果发现,内蒙古地区刈割 3 茬的苜蓿全生长季内的年需水量约 469.4 mm,其中第 1 茬虽生育期最长,但需水量最少,其次是第 2 茬,第 3 茬需水量最大。

表 3 试验期间不同灌水处理下苜蓿的灌水量与灌水时间

Tab.3 Irrigation amount and time of alfalfa under different water treatments during experiment							
茬数	灌水顺序	K_c	ET_c/mm	灌水量/mm			灌水时间
				W1	W2	W3	
第 1 茬	1	0.40	24.0	24.0	24.0	24.0	4 月 14 日
	2	0.62	28.8	21.8	16.0	10.3	4 月 26 日
	3	1.05	33.2	33.2	26.5	19.9	5 月 10 日
	4	1.27	38.6	38.6	30.9	23.2	5 月 20 日
	合计		124.6	117.6	97.4	77.3	
第 2 茬	5	0.51	36.3	30.9	30.9	30.9	6 月 13 日
	6	0.80	22.9	22.9	18.3	13.7	6 月 21 日
	7	1.25	38.4	26.6	18.9	11.2	7 月 1 日
	8	1.25	46.3	46.3	37.0	27.8	7 月 10 日
	合计		143.8	126.6	105.1	83.6	
第 3 茬	9	0.55	44.3	32.9	32.9	32.9	7 月 23 日
	10	1.00	44.0	37.6	28.8	20.0	8 月 1 日
	11	1.20	58.8	58.8	47.0	35.3	8 月 15 日
	12	1.23	53.9	44.1	33.3	22.5	8 月 27 日
	合计		201.0	173.4	142.1	110.7	
总计			469.4	417.6	344.6	271.7	

2.3 不同水肥处理对紫花苜蓿干草产量、WUE 与 PFP 的影响

苜蓿产量是指单位面积上通过光合作用生产的

地上部分各种器官生物量的总和,是衡量苜蓿生产性能和经济性能的最重要指标。

图 4 是全生长季内不同水肥处理下各茬苜蓿的干草产量。由图可知,苜蓿全年 3 茬的平均干草产量分别为 5 953. 82、3 915. 39、2 294. 24 kg/hm²。第 1 茬产量最大,占全年产量的 48. 95%,第 2、3 茬的产量分别占全年产量的 32. 19% 和 18. 86%,因此第 1 茬产量对全年总产量贡献最大,第 1 茬产量的高低很大程度上可以决定全年苜蓿是否丰产。

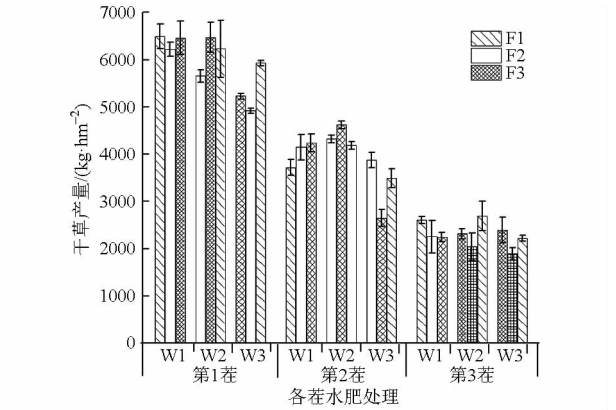


图 4 全生长季内不同处理下苜蓿的干草产量
Fig. 4 Hay yield of alfalfa under different treatments in whole growing season

由表 4 可知,肥力水平对全年产量无显著影响,而灌水量对全年产量影响显著,且全生长季内水肥耦合效应不明显,由此可认为灌水量是影响苜蓿产量的主导因素。当只考虑灌水量对产量的影响时,第 1 茬产量随着灌水量的减少而减少,尤其当灌水量减少至 W3 水平时,产量显著下降;第 2 茬灌水量的适当减少(W2 水平)有助于产量的小幅增加(相比于 W1 水平增幅为 7. 77%),但当灌水量减少至 W3 水平时,产量显著下降;第 3 茬灌水量对产量无显著影响,但 W3 处理仍低于其余 2 种处理,W1、

表 4 全生长季内不同水、肥处理下苜蓿的平均干草产量
Tab. 4 Average hay yield of alfalfa under different water and fertilize treatments in whole growing season

kg/hm ²					
处理	第 1 茬	第 2 茬	第 3 茬	全年	
灌水	W1	6 387. 47 ^a	4 034. 00 ^a	2 366. 03 ^a	12 787. 51 ^a
	W2	6 116. 76 ^{ab}	4 373. 82 ^a	2 349. 44 ^a	12 840. 03 ^a
	W3	5 337. 23 ^b	3 338. 34 ^b	2 167. 25 ^a	10 862. 81 ^b
施肥	F1	5 788. 20 ^a	3 971. 88 ^a	2 438. 07 ^a	12 198. 14 ^a
	F2	5 869. 19 ^a	3 805. 82 ^a	2 060. 45 ^a	11 735. 46 ^a
	F3	6 204. 08 ^a	3 968. 47 ^a	2 384. 20 ^a	12 556. 75 ^a
显著性检验 (Sig. 值)					
灌水 × 施肥	0. 652	0. 652	0. 1	0. 282	

注:根据 Duncan 多重比较,同列数值后字母不同表示在 P < 0. 05 水平差异显著。

W2 处理的总产量基本一致,但当灌水量减少至 W3 时产量下降。如果只考虑肥力对产量的影响,全生长季内肥力对产量均无显著影响,第 1 茬内,F3 处理的产量最高,F1、F2 处理间产量差异不大;第 2、3 茬内,F1、F3 处理间的产量差异不大,F2 处理下的产量最低;总产量方面,F1、F3 处理间差异不大,F2 处理的总产量最低。试验结果表明在苜蓿对水分更为敏感的第 2、3 茬内,适当减少灌水量(W2 水平)并不会造成产量明显下降,但灌水量过少(W3 水平)时会造成产量显著下降,施肥量对产量并无显著影响,这与蔡国军等的研究结论一致^[16]。

根据实测的土壤含水率与根区土壤实际可利用水分含量的校核,在每次灌水和降水后的土壤含水率并未超过根区土壤可利用范围,可认为未发生深层渗漏;试验地地下水埋深 30 m,故忽略了地下水对土壤的水分补给;此外,R3000 型低压喷头喷灌区内未产生地表积水。因此通过水量平衡计算可知,第 1 茬内不同灌水处理下苜蓿的耗水量分别是 124. 6、104. 5、84. 3 mm;第 2 茬内不同灌水处理下苜蓿的耗水量分别是 149. 8、128. 3、106. 8 mm;第 3 茬内不同灌水处理下苜蓿的耗水量分别是 211. 8、180. 5、149. 1 mm。全生长季内,有效降水量 96. 21 mm,但其中 27. 61 mm 的降水是发生在小区测产后与整块试验地刈割之间,此降水可视为未被试验小区内的苜蓿利用,故计算 WUE 时剔除了此部分降水。表 5 为不同水肥处理下的 WUE 和 PFP,第 1 茬 W1、W2、W3 各灌水处理下的 WUE 均值分别是 5. 13、5. 86、6. 35 kg/m³,第 2 茬 W1、W2、W3 各灌水处理下的 WUE 均值分别是 2. 69、3. 41、3. 13 kg/m³,第 3 茬 W1、W2、W3 各灌水处理下的 WUE 均值分别是 1. 12、1. 30、1. 45 kg/m³。比较发现,第 1、3 茬内由大到小变化规律为 W3、W2、W1,第 2 茬内由大到小变化规律为 W2、W3、W1。以上结果表明,苜蓿产量和 WUE 均逐茬递减,同一茬内,苜蓿 WUE 较大程度上是由灌水量决定的,WUE 随着灌水量的减少而增加。通过比较表 5 中各茬内不同肥力水平下的 PFP 可知,随着肥力水平的降低,PFP 基本呈逐渐升高的趋势,并且 F3 水平下的 PFP 远高于 F1 与 F2 水平,这主要是由于施肥对产量无显著影响,因此低肥水平下的 PFP 更高。

2. 4 尾枪喷灌区对紫花苜蓿干草产量和 WUE 的影响

圆形喷灌机安装尾枪可有效增加控制面积,但尾枪喷灌区喷灌强度过大易造成地面积水或径流,不易被苜蓿利用。因此,尾枪不合理的配置不但浪费水资源,降低苜蓿的 WUE,甚至会危害苜蓿正常生长。

表 5 全生长季内不同水肥处理下的 WUE 与 PFP

Tab.5 WUE and PFP of alfalfa under different water and fertilize treatments in whole growing season							
灌溉水平	施肥水平	第 1 茬		第 2 茬		第 3 茬	
		WUE/(kg·m ⁻³)	PFP/(kg·kg ⁻¹)	WUE/(kg·m ⁻³)	PFP/(kg·kg ⁻¹)	WUE/(kg·m ⁻³)	PFP/(kg·kg ⁻¹)
W1	F1	5.21	24.04	2.48	24.80	1.23	17.37
	F2	4.99	34.52	2.77	39.51	1.06	21.45
	F3	5.18	71.74	2.83	60.49	1.06	32.01
W2	F1	5.41	20.92	3.37	28.80	1.28	15.44
	F2	6.20	35.96	3.60	44.00	1.13	19.43
	F3	5.96	69.20	3.26	59.74	1.49	38.46
W3	F1	6.19	19.35	3.63	25.84	1.60	15.95
	F2	5.83	27.34	2.48	25.23	1.27	17.99
	F3	7.03	65.85	3.27	49.85	1.49	31.72

表 6 给出了水肥耦合试验期间尾枪控制面积内的实际耗水量。尾枪流量较大且喷灌强度高,会产生地表积水。但根据土壤水分状况可知,即使在最大灌水和降水发生后,尾枪控制面积内的土壤含水量仍未超过田间持水量,故可认为尾枪控制面积内未发生深层渗漏,而高喷灌强度所产生的积水可视 为短暂性的,仍可被苜蓿有效利用。通过比较表 3 与表 6,发现 3 种灌水处理下的实际总耗水量较试验设置分别高出 32.71%、33.65%、34.83%,而对应的平均年干草产量却分别仅高出 9.48%、16.00%、23.06%。由此可见尾枪内增加的灌水并未获得同样多产量的增加,尤其是灌溉水平较高的 W1 处理。比较尾枪控制面积与其余控制面积内 WUE 的变化发现,除第 3 茬的 W2、W3 处理下 WUE

略有增加外,其余均比其他喷灌控制面积的 WUE 小。这主要是由于尾枪控制面积内的增产率明显小于灌水量的增加量。

比较尾枪控制面积内苜蓿各茬不同处理的产量和 WUE,发现产量和 WUE 均逐茬递减;各茬不同处理下的产量和 WUE 表现为:第 1、3 茬内 W2 处理下的产量最大,第 2 茬内 W2 处理下的产量最小,但 W2 处理下的年产量最大,这也说明全年苜蓿是否丰产很大程度上是由第 1 茬产量决定的,全年 3 茬的 WUE 均以 W3 处理最大,其次是 W2,W1 最小。以上结果表明,尾枪控制面积内,苜蓿产量和 WUE 是逐茬递减,并且同一茬内,苜蓿的 WUE 随着灌水量的减少而增加。

表 6 尾枪控制面积内不同灌水处理对苜蓿干草产量和 WUE 的影响

Tab.6 Hay yield and WUE of alfalfa under different water treatments in end gun circular area					
处理	指标	第 1 茬	第 2 茬	第 3 茬	总计
W1F0	耗水量/mm	155.1	172.4	226.7	554.2
	产量/(kg·hm ⁻²)	6 872.60	4 444.79	2 682.06	13 999.46
	WUE/(kg·m ⁻³)	4.24	2.34	1.05	
W2F0	耗水量/mm	131.5	145.5	183.6	460.6
	产量/(kg·hm ⁻²)	8 024.93	3 928.59	2 941.23	14 894.75
	WUE/(kg·m ⁻³)	5.79	2.41	1.39	
W3F0	耗水量/mm	104.2	113.3	148.8	366.3
	产量/(kg·hm ⁻²)	6 554.16	3 967.22	2 846.68	13 368.06
	WUE/(kg·m ⁻³)	5.89	3.04	1.61	

3 讨论

试验地圆形喷灌机组采用 R3000 型旋转低压喷头和 0.14 MPa 压力调节器,该组合下喷头的水滴直径小,射程远,喷头间喷洒叠加面积大,喷灌控制面积内的水量分布较为均匀,并且较小的水滴直径对土壤打击程度较低,不易产生大量积水,有利于土壤和苜蓿对水分的吸收^[17]。圆形喷灌机悬臂末端

安装的尾枪流量过大,导致尾枪喷灌区的实际喷灌水深大于其余喷灌区近 1/3,而增产范围只有 9.48%~23.06%,对于 W2 和 W3 的亏水处理,尾枪控制面积内多余的灌水可适当补给该处理造成的水分亏缺,因此相较于 W1 处理,W2 和 W3 处理的增产幅度更大。尾枪喷灌区与其余喷灌区相比,各处理下的 WUE 基本均有下降,由此可见尾枪控制面积内所增加的灌水量主要用于植株蒸腾和棵间蒸

发,而对苜蓿产量贡献较小。因此,建议合理配置尾枪以提高尾枪控制面积内的苜蓿水分利用效率。

全生长季内紫花苜蓿年需水量约 469.37 mm,这与郑和祥等^[18]在内蒙古鄂托克前旗的试验结论较为一致。紫花苜蓿全年刈割 3 茬,产量逐茬递减,其中第 1 茬的产量最大,并且第 1 茬产量很大程度上可以决定全年苜蓿是否丰产,这与万素梅等^[19]的研究结果一致。第 1 茬内较长的生长时间可使苜蓿有更多的时间积累生物量,返青期内较低的气温有效地抑制了杂草的生长,从而减少了苜蓿与杂草间的营养竞争,并且分枝后期至现蕾期内适宜的温湿度使得苜蓿快速生长,因此第 1 茬内的产量最大。第 2、3 茬生长时长基本一致,但相较于第 3 茬,第 2 茬的温湿度更有利于苜蓿生长,因此第 2 茬的产量高于第 3 茬。第 1 茬生长时间虽然最长,但由于 4—5 月份气温持续较低,苜蓿生长缓慢,苜蓿蒸腾作用较弱,耗水量少,因此较大的产量下获得较高的 WUE。第 3 茬产量较第 2 茬低,且第 3 茬内作物耗水总量比第 2 茬多 58.94 mm,因此第 3 茬的 WUE 较低。W1 与 W2 处理对苜蓿产量无显著差异,但 W3 处理却会使苜蓿产量有明显下降,W2 与 W3 同为亏水处理,W2 的水分亏缺处理虽会造成苜蓿和田间土壤出现短期的缺水,迫使苜蓿进入缺水休眠状态,但苜蓿可依靠前期自身储存的有机质在下次水分得到补偿时安全度过此段“休眠期”,故而 W2 与 W1 处理下的产量无显著差异,而 W3 处理下的灌水量仅为苜蓿正常耗水量的 60%,灌水量过少,延长了苜蓿供水不足的时间,使得苜蓿无法依靠自身储存的有机质度过“休眠期”,最终导致苜蓿停止营养生长,提早进入生殖生长阶段。

苜蓿的多次刈割不断消耗土壤中的矿物质元素,氮是刈割时带走量较多的营养元素,而它通过残茬和根的形式留在土壤的数量却不多,因此往往需要以施用肥料的方式补充这些养分。本文中第 1 茬撒施磷钾复合肥作为基肥,在第 2、3 茬撒施尿素以补充前一茬刈割造成的土壤氮含量下降。虽然试验

结果表明,不同肥料水平下苜蓿肥料偏生产力差别较大,尤其是低肥水平下的偏生产力远高于其余肥处理,这主要是由于不同肥力下的苜蓿产量无显著差异($P < 0.05$ 水平下)。很多研究表明,苜蓿对尿素并不敏感,尤其是针对种植 2 年及 2 年以上的苜蓿^[20],这主要是因为苜蓿自身已具有较强的共生固氮能力。本文研究结果也表明,对于建植至第 5 年的苜蓿,低肥水平下苜蓿的肥料偏生产力较高,但全生长季内肥力对产量均无显著影响。

试验中的苜蓿水肥耦合试验是基于 2014 年内蒙古半干旱地区的气象参数确定,而不同年限苜蓿的水分需求规律有所不同。因此将进一步研究该地区不同生长年份苜蓿的水肥耦合效应,以完善内蒙古半干旱地区紫花苜蓿的喷灌施肥制度。

4 结论

(1)圆形喷灌机组第 1 跨、第 2 跨、悬臂控制面积内的喷灌均匀性较高且喷灌水深较为一致;尾枪流量过大,其控制面积内的喷灌均匀性较差,实际灌水量超出设计灌水量约 1/3,但过量灌水对苜蓿的增产效果不明显。建议正确选配圆形喷灌机尾枪,以提高尾枪喷灌控制区内苜蓿的 WUE。

(2)对于内蒙古半干旱地区每年刈割 3 茬的紫花苜蓿,其全生长季内的年需水量约 469.37 mm,且需水量逐茬增加。各茬产量和 WUE 均逐茬递减,其中第 1 茬产量和 WUE 最大,且第 1 茬的产量在很大程度上决定全年苜蓿是否丰产。适当的减少灌水量($80\% ET_c$)不会造成苜蓿产量的下降,但当灌水量减少至 $60\% ET_c$ 时,产量会显著下降。为获得苜蓿产量和 WUE 的最佳组合,建议在苜蓿全年 3 茬生长期间,均采用 $80\% ET_c$ 的灌水处理。

(3)在苜蓿全生长季内,低肥水平下的苜蓿肥料偏生产力较高,但施肥对增加苜蓿产量作用不明显,水肥耦合效应对苜蓿产量的影响亦不显著。因此,建议在实际生产过程中采用低水平施肥处理。

参 考 文 献

- 1 卢欣石. 中国苜蓿产业发展问题[J]. 中国草地学报,2013,35(5):1-5.
Lu Xinshi. Problems with the development of alfalfa industry in China[J]. Chinese Journal of Grassland, 2013,35(5): 1-5. (in Chinese)
- 2 卢欣石. 我国苜蓿商品草产业发展现状与思考[J]. 中国奶牛,2013(15):3-6.
- 3 金宏智,严海军,王永辉. 喷灌技术与设备在我国的适应性分析[J]. 农业工程, 2011,1(4): 42-45.
Jin Hongzhi, Yan Haijun, Wang Yonghui. Adaptability analysis of sprinkler irrigation technology and equipments in China[J]. Agricultural Engineering, 2011,1(4): 42-45. (in Chinese)
- 4 严海军,朱勇,白更,等. 对内蒙古推广使用大型喷灌机的思考[J]. 节水灌溉, 2009(1): 18-21.
Yan Haijun, Zhu Yong, Bai Geng, et al. Discussion on application of large sized sprinkler irrigation machines in Inner Mongolia Autonomous Region[J]. Water Saving Irrigation, 2009(1): 18-21. (in Chinese)

- 5 Montazar A, Sadeghi M. Effects of applied water and sprinkler irrigation uniformity on alfalfa growth and hay yield[J]. *Agricultural Water Management*, 2008, 95(11): 1279 – 1287.
- 6 Al-Gaadi K A, Patil V C, Madugundu R, et al. Response of alfalfa to precision fertigation in Saudi Arabia[C]//9th European Conference on Precision Agriculture, The Netherlands; Wageningen Academic Publishers, 2013; 737 – 743.
- 7 Lamm F R, Harmoney K R, Aboukheira H A, et al. Alfalfa production with subsurface drip irrigation in the central great plains[J]. *Transactions of the ASABE*, 2012, 55(4): 1203 – 1212.
- 8 于亚军, 李军, 贾志宽, 等. 旱作农田水肥耦合研究进展[J]. *干旱地区农业研究*, 2005, 22(3): 220 – 224.
Yu Yajun, Li Jun, Jia Zhikuan, et al. Research progress of water and fertilizer coupling on dry land[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2005, 22(3): 220 – 224. (in Chinese)
- 9 肖自添, 蒋卫杰, 余宏军. 作物水肥耦合效应研究进展[J]. *作物杂志*, 2007(6): 18 – 22.
- 10 曾庆飞, 贾志宽, 韩清芳, 等. 施肥对苜蓿生产性能及品质影响的研究综述[J]. *草业科学*, 2005, 22(7): 8 – 15.
Zeng Qingfei, Jia Zhikuan, Han Qingfang, et al. Review on the effect of fertilization on the production and quality[J]. *Pratacultural Science*, 2005, 22(7): 8 – 15. (in Chinese)
- 11 谢勇, 孙洪仁, 张新全, 等. 坝上地区紫花苜蓿氮、磷、钾肥料效应与推荐施肥量[J]. *中国草地学报*, 2012, 34(2): 52 – 57.
Xie Yong, Sun Hongren, Zhang Xinquan, et al. Effects of N, P and K fertilizer on alfalfa and recommend fertilizer rate in Bashang Area[J]. *Chinese Journal of Grassland*, 2012, 34(2): 52 – 57. (in Chinese)
- 12 de Oliveira W S, Oliveira P P A, Corsi M, et al. Alfalfa yield and quality as function of nitrogen fertilization and symbiosis with *Sinorhizobium meliloti*[J]. *Scientia Agricola*, 2004, 61(4): 433 – 438.
- 13 GB/T 19797—2012 农业灌溉设备 中心支轴式和平移式喷灌机水量分布均匀度的测定[S]. 2012.
- 14 Allen R G, Pereira L S, Raes D, et al. Crop evapotranspiration guidelines for computing crop water requirements—FAO irrigation and drainage paper 56[C]//FAO, 1998.
- 15 孙启忠, 玉柱, 赵淑芬. 紫花苜蓿栽培关键技术[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2008: 2 – 33.
- 16 蔡国军, 张仁陟, 柴春山. 半干旱黄土丘陵区施肥对退耕地紫花苜蓿生物量的影响[J]. *草业学报*, 2012, 21(5): 204 – 212.
Cai Guojun, Zhang Rendou, Chai Chunshan. Effect of fertilization on biomass of alfalfa in returned farmland in semiarid loess hilly area[J]. *Acta Prataculture Sinica*, 2012, 21(5): 204 – 212. (in Chinese)
- 17 Silva L L. The effect of spray head sprinklers with different deflector plates on irrigation uniformity, runoff and sediment yield in a Mediterranean soil[J]. *Agricultural Water Management*, 2006, 85(3): 243 – 252.
- 18 郑和祥, 李和平, 白巴特尔, 等. 紫花苜蓿中心支轴式喷灌综合节水技术集成模式[J]. *内蒙古水利*, 2014(3): 11 – 12.
- 19 万素梅, 胡守林, 张波, 等. 不同紫花苜蓿品种产草量及营养成分研究[J]. *西北农业学报*, 2004, 13(1): 14 – 17.
Wan Sumei, Hu Shoulin, Zhang Bo, et al. The study on hay yield and nutrition of alfalfa cultivars[J]. *Acta Agricultural Boreali-occidentails Sinica*, 2004, 13(1): 14 – 17. (in Chinese)
- 20 郑子英, 卢利坤, 玛丽亚. 苜蓿施肥试验[J]. *新疆畜牧业*, 1994(1): 16 – 19.

(上接第 181 页)

- 12 Jęczmionek L, Porzycka-Semczuk K. Hydrodeoxygenation, decarboxylation and decarbonylation reactions while co-processing vegetable oils over NiMo hydrotreatment catalyst. Part II: thermal effects—experimental results[J]. *Fuel*, 2014, 128: 296 – 301.
- 13 Kimura T, Imai H, Li Xiaohong, et al. Hydroconversion of triglycerides to hydrocarbons over Mo-Ni/ γ -Al₂O₃ catalyst under low hydrogen pressure[J]. *Catalysis Letters*, 2013, 143(11): 1175 – 1181.
- 14 Sharma B K, Moser B R, Vermillion K E, et al. Production, characterization and fuel properties of alternative diesel fuel from pyrolysis of waste plastic grocery bags[J]. *Fuel Processing Technology*, 2014, 122: 79 – 90.
- 15 Bagri R, Williams P T. Catalytic pyrolysis of polyethylene[J]. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2002, 63(1): 29 – 41.
- 16 Zhang Xuesong, Lei Hanwu, Yadavalli G, et al. Gasoline-range hydrocarbons produced from microwave-induced pyrolysis of low-density polyethylene over ZSM-5[J]. *Fuel*, 2015, 144: 33 – 42.
- 17 Abbas-Abadi M S, Haghighi M N, Yeganeh H. Evaluation of pyrolysis product of virgin high density polyethylene degradation using different process parameters in a stirred reactor[J]. *Fuel Processing Technology*, 2013, 109: 90 – 95.
- 18 Liu Mi, Zhuo Jiankun, Xiong Sijian, et al. Catalytic degradation of high-density polyethylene over a clay catalyst compared with other catalysts[J]. *Energy & Fuels*, 2014, 28(9): 6038 – 6045.
- 19 王允圃, 刘玉环, 刘仕涛, 等. 一种用于生产生物柴油的氧化钴催化剂及制备方法和应用: 中国, CN201410002106.5[P]. 2014 – 4 – 30.
- 20 Sergeev G B. *Nanochemistry*[M]. Amsterdam: Elsevier Science Ltd., 2006.
- 21 Herskowitz Mordechay. Reaction system for production of diesel fuel from vegetable and animals oils; USA, US 2008/0066374 A1[P]. 2008 – 04 – 20.