

圆形喷灌机条件下变量灌溉对苏丹草 产量与品质的影响

孙宇,李茂娜,王云玲,严海军

(中国农业大学水利与土木工程学院,北京 100083)

摘要:以苏丹草为研究对象,于2019年5—8月在河北涿州中国农业大学教学实验场开展了圆形喷灌机条件下变量灌溉对苏丹草产量与品质的影响研究。依据土壤表观电导率(ECa)差异划分出3个灌溉管理小区(1区、2区、3区),并分别对其进行变量灌溉(VRI)和均匀灌溉(URI)处理。结果表明:全生长季内,URI和VRI处理之间年产量没有显著性差异($P>0.05$),但VRI处理比URI处理节水13.4%,灌溉水分利用效率提高了17.5%,尤其是在第二茬雨季VRI处理的灌溉水分利用效率提升了43.8%($P<0.05$);第一茬,VRI处理与URI处理苏丹草粗蛋白含量与相对饲喂价值没有显著性差异($P>0.05$),但在降雨量较大的第二茬VRI处理可以显著提高苏丹草的粗蛋白含量(提高9.5%, $P<0.05$)和相对饲喂价值(提高3.5%, $P<0.05$)。

关键词:变量灌溉;苏丹草;产量;品质;圆形喷灌机

中图分类号:S275.5 **文献标志码:**A

Effects of variable rate irrigation on sudangrass yield and quality under center-pivot irrigation

SUN Yu, LI Maona, WANG Yunling, YAN Haijun

(College of Water Resources and Civil Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: From May to August 2019, a study on sudangrass with a center-pivot system to assess the effects of variable rate irrigation (VRI) on the yield and quality was conducted at the experimental station of China Agricultural University in Hebei Province. Three management zones (zone 1, zone 2, and zone 3) were delineated according to the difference of soil apparent electrical conductivity (ECa), and treated them with VRI and uniform rate irrigation (URI), respectively. The results showed that there was no significant difference in the annual yield between URI and VRI management ($P>0.05$), but VRI saved 13.4% water and increased the $IWUE$ by 17.5% than URI did. Especially, for the second cutting in rainy season, the $IWUE$ of VRI increased significantly by 43.8% ($P<0.05$). In the first cutting, VRI had no significant effect on the crude protein (CP) contents and relative feeding value (RFV) of sudangrass ($P>0.05$). But, in the second cutting, VRI significantly increased the CP by 9.5% and RFV by 3.5% ($P<0.05$).

Keywords: variable rate irrigation; sudangrass; yield; quality; center-pivot irrigation system

圆形喷灌机是可用于规模化、集约化农业生产中的高效节水灌溉机组,国内常见单机控制面积多在 $10\sim 35\text{ hm}^2$ 之间,较大的控制面积易导致区域内土壤特性存在较大差异。因此,若仍采用传统的均匀灌溉,势必会引起控制面积内的灌水不足或过多,不但会导致作物长势不均,还会降低水分利用

效率。变量灌溉(Variable rate irrigation)技术被认为是解决上述问题的有效方法,该技术通过将田块划分成不同管理区,针对特定的土壤条件或植株生长条件使用不同水量,可以提高灌溉水分利用效率,充分挖掘整个田块作物生产潜力^[1]。变量灌溉技术虽起步较晚,但随着农业物联网技术与农业传

感器及控制技术的不断成熟,近几年内该项技术得到了快速发展。目前,美国大型喷灌机公司如 Valmont、Lindsay、Reinke 等已成功开发出商用变量灌溉系统^[2],并已成功应用于小麦、棉花、大豆等作物^[3]。相比之下,变量灌溉技术的相关研究在国内发展相对缓慢。直至2014年,我国才建成了首套拥有自主知识产权的圆形喷灌机变量灌溉系统,相关的研究也仅涉及系统灌溉均匀性、变量灌溉控制系统、管理分区方法以及灌溉决策方法等。赵伟霞等^[4]通过实测机组田间均匀性发现,与均匀灌溉相比,脉冲式变量灌溉的径向修正赫尔曼-海因均匀系数和分布均匀系数分别降低9%、12%。赵伟霞等^[5]还以土壤可利用水量作为分区依据,利用圆形喷灌机对小麦、玉米进行了变量灌溉管理,评估了冬小麦和夏玉米的变量灌溉效益。马静等^[6]设计了喷灌机变量施肥系统,确保了尾枪在开启和关闭两种状态下的变量灌施肥均匀性。张钊^[7]和程时焕^[8]从变量灌溉控制系统的整体需求出发,对圆形变量灌溉系统的中央控制系统进行分析和方案设计,开发了一套变量灌溉控制系统并实现了互联网智能远程管控。Shi等^[9]利用无人机拍摄近地遥感图像,反演出作物水分胁迫指数和作物指数图,进一步分析得到植株蒸散量图,并结合灌溉经验生成灌溉处方图。

苏丹草是世界上栽培最普遍的一年生禾本科牧草之一,但其相关的研究较少。现有研究表明,苏丹草在拔节期生长速度快,对水分需求量较大^[10]。郭豫霞等^[11]通过研究宁夏干旱地区苏丹草的需水规律,发现苏丹草的需水关键期为分蘖期与拔节期。Mahmoudzadeh等^[12]得出苏丹草的水分利用效率与其蒸发蒸腾量呈线性关系,且水分亏缺对产量的形成影响显著。Schittenhelm等^[13]通过试验发现,与40%~50%土壤有效水含量的轻度水分亏缺相比,15%~25%土壤有效水含量的重度水分亏缺会造成苏丹草减产35%。刘虎等^[14]对比了充分灌溉和亏缺灌溉管理下的苏丹草生长情况,结果发现重旱条件下苏丹草水分利用效率最大,但充分灌溉获得的苏丹草产量仍为最高。

总体而言,我国关于变量灌溉的研究起步较晚,相关的研究报道也十分有限,尤其是变量灌溉系统在作物方面的应用仅局限于小麦与玉米。苏丹草是重要的禾本科牧草,水分管理对其产量与品质具有重要意义,但鲜有相关研究。因此,本文以苏丹草为研究对象,研究圆形喷灌机变量灌溉技术对其产量及品质的影响,以期对变量灌溉在苏丹草

生产中的水分管理提供技术指导。

1 试验材料与试验设计

1.1 试验区概况

试验地位于河北省涿州市东城坊镇中国农业大学教学实验场,北纬39°27',东经115°51',海拔42 m,属暖温带半湿润季风区,多年平均降雨量563.3 mm,年平均温度11.6℃,7月份温度最高,1月份气温最低,年温差31.5℃。无霜期多年平均为178 d,地面温度多年平均为14.2℃,多年平均冻土深度为40 cm,最长连续冻结122 d,地下水埋深50 m。试验地地质构造属太行山山洪冲积扇,地势平坦。整块田地平均pH值为7.9,硝态氮含量为22.15 mg·kg⁻¹,速效钾含量为58.90 mg·kg⁻¹,有效磷39.28 mg·kg⁻¹。

1.2 试验设备与试验材料

土壤表观电导率测定采用美国 Veris 公司制造的 Veris3100 土壤表观电导率仪。该设备由基础桁架、犁刀电极、配重、缓冲装置、GPS 组成。在使用过程中需要拖拉机牵引,所需最小牵引功率为22 kW,在牵引测量过程中最高速度为25 km·h⁻¹。6片犁刀电极可以同时通电测量0~30、0~90 cm处的土壤表观电导率。试验供试材料为苏丹草,2019年5月5日进行试验田翻耕平整,5月6日播种、施底肥,苏丹草播种密度为75 kg·hm⁻²,行距30 cm,播种深度为4~5 cm,底肥为硫酸钾,施用量为225 kg·hm⁻²。试验地采用的圆形喷灌机由三跨加悬臂组成,共140 m,苏丹草种植面积约占喷灌机全圆喷洒区域的1/4。喷灌机入机流量为60 m³·h⁻¹,安装了34个美国 Nelson 公司的 R3000 旋转式喷头,每个喷头均配置电磁阀,可实现单独的占空比控制。灌溉水源为地下井水。经测试,喷灌机行走速度在百分率设定值20%~100%时,径向喷灌均匀系数(CU_{HH})为92%~94%,表明机组水量分布均匀系数较高^[15]。

1.3 试验设计

试验地块的土壤表观电导率(ECa)调查从3月18日开始,由拖拉机牵引 Veris3100,在田块南北方向往返测量,行进速度为2.3 m·s⁻¹,采样速度为每秒一个样点,采样深度为0~90 cm,对采样结果去除空值后,用 Arcgis 软件进行配准分析。图1为测量过程及采样点分布,图2为 ECa 空间分布及试验布置,由图2可知,整块田地内土壤表观电导率存在较大的空间变异性,可分为3个区域。

试验利用马尔文激光粒度仪对田块0~90 cm

土层土壤质地情况进行了测量分析,整块的土壤类型(美国制)以砂土类为主,1~3 区的砂粒含量分别为 70.60%、85.28%、87.13%,土壤类型分别为砂壤土、壤砂土、壤砂土。1~3 区内的 ECa 平均值分别为 4.53、2.44、1.38 $mS \cdot m^{-1}$,不同的 ECa 分区下土壤质地存在差异,而不同土壤质地导致田间持水率也有所不同(见表 1),为此需对试验地进行合理的变量灌溉管理。本研究根据 0~90 cm 土层的 ECa 等级差异将试验地划分为 3 个区域(1、2、3 区),3 个区域的 ECa 等级依次递减,砂粒含量程度依次升高。每一区域按照等面积原则划分为两个控制区,一个区进行变量灌溉(记为 V1、V2、V3),另一个区进行均匀灌溉(记为 U1、U2、U3),在每个控制区内以 7 m×10 m 面积选取 3 个采样小区,并在每个采样小区中心埋设 TRIME 土壤剖面水分探管,试验布置见图 2。在灌溉管理过程中,分别在每个 ECa 区内随机选取 3 个点,按照 0~20、20~40、40~60、60~80 cm 分层测量该层次内的田间持水率,以 3 个点平均值作为该区在某一土层深度下的田间持水率(FC),测量结果见表 2。对于变量灌溉区域,当 V1、

V2、V3 任一区的平均体积含水率达到 60%FC(田间持水量)时,所有变量灌溉管理区开始灌水,各区灌水定额为该区当前平均体积含水率与该区田间持水率 90%的差值。对于均匀灌溉区域,采取统一灌水处理,当 U1、U2、U3 测得的平均体积含水率达到平均田间持水率的 60%时开始灌水,3 个区的灌水定额相同,即为 3 个区平均田间持水率的 60%与 90%的差值。

1.4 测量指标

(1)气象数据。试验区安装一台便携气象站(HOBO, U30, 美国),实时监测气象数据,包括降雨量、风速、风向、气温、相对湿度、太阳辐射等气象数据,每 1 h 记录一次。

(2)土壤水分。试验依据土壤水分变化确定灌溉时间。在每个采样小区中心埋设了土壤水分传感器 TRIME (TRIME-T3 TDR, 德国),测量土壤水分情况,以某一处理 3 个采样小区测量的平均值来代表该处理下的土壤含水率,每隔 3 d 测量一次,测量总深度为 0~60 cm,分别按 0~20、20~40、40~60 cm 进行测量,并在降雨、灌溉后补测。



图 1 土壤表观电导率 (ECa) 样点分布及测量过程

Fig.1 ECa sample location and measurement procedure

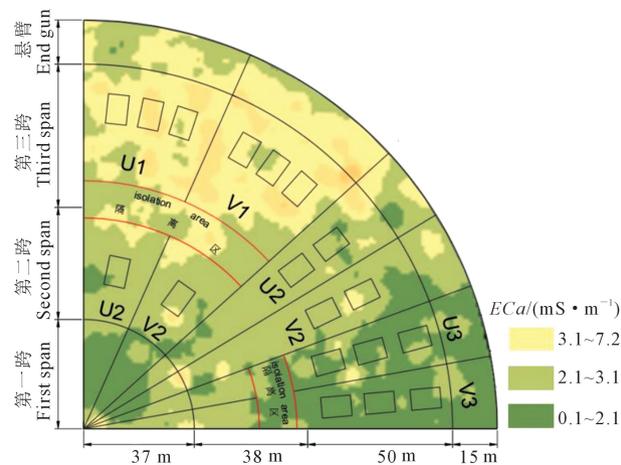


图 2 苏丹草灌溉试验布置

Fig.2 Layout of sudangrass irrigation treatments

(3)苏丹草产量和品质指标。苏丹草所需测定的指标包括样方鲜草产量、干鲜比、样方干草产量以及品质。样方鲜草产量采用刈割法测量,在每个小区内沿对角线取 3 个 1 m×1 m 的样方,将样方内苏丹草全部刈割并留茬 10 cm,刈割后立即称取样方鲜草质量。在所取的样方鲜草中随机抽取部分样品去除杂草后称重,并放入档案袋中保存。随后将所取样品烘干称重,即可计算干鲜比,样方干草重即为样方鲜草重与干鲜比的乘积。将烘干后的苏丹草样品研碎,过 1 mm 尼龙筛后,使用 Foss 近红外分析仪测定其品质,包括粗蛋白(CP)、酸性洗涤纤维(ADF)、中性洗涤纤维(NDF),并最终按照公式(1)~(3)计算出相对饲喂价值(RFV)。

表 1 各试验小区的土壤饱和含水率(SAT)和田间持水率(FC)/%

Table 1 Field capacity (FC) and saturated water content (SAT) of each irrigation management zone in experiment

小区 Zone	0~20 cm		20~40 cm		40~60 cm		60~80 cm		平均 Mean	
	SAT	FC	SAT	FC	SAT	FC	SAT	FC	SAT	FC
1	37.17	25.53	37.27	22.10	38.76	25.48	42.45	23.91	38.91	24.26
2	40.02	23.67	41.17	21.19	41.13	18.34	40.46	15.09	40.69	19.58
3	37.35	23.60	40.36	14.89	41.13	16.69	40.19	13.59	39.76	17.19

表 2 2019 年苏丹草各茬生育期

Table 2 Growing schedule of sudangrass in different growth stages in 2019

茬次 Cutting	生育时期 Growth stage (m-d)						总计/d Total
	苗期/再生长 Seedling/regrowth stage	分蘖期 Tillering stage	拔节期 Jointing stage	孕穗期 Booting stage	抽穗期 Heading stage		
第一茬 First cutting	05-13	05-28	06-14	06-23	06-29	47	
第二茬 Second cutting	07-04	07-14	07-20	07-27	08-03	30	

$$RFV = \frac{DDM(\%DM) \times DMI(\%BW)}{1.29} \quad (1)$$

$$DMI(\%BW) = \frac{120}{NDF(\%DM)} \quad (2)$$

$$DDM(\%DM) = 88.9 - 0.779 \times ADF(\%DM) \quad (3)$$

式中,DDM 是指饲草可消化的干物质,其单位为占饲草干物质的百分比,即%DM;DMI 是指饲草干物质的随意采食量,其单位为占牲畜体重的百分比,即%BW。通过上述模型,DMI 和 DDM 可分别由 NDF 与 ADF 计算得到。

(4) 灌溉水分利用效率。灌溉水分利用效率(IWUE)指消耗单位灌溉水量植株所获得的干物质产量,计算过程如公式(4)所示。

$$IWUE = 0.1 \times Y/I \quad (4)$$

式中,IWUE 为灌溉水分利用效率(kg·m⁻³);Y 为产量(kg·hm⁻²);I 为灌溉水量(mm)。

1.5 数据分析

数据分析采用 Excel 2016 以及 SPSS 20.0 软件进行。

2 结果与分析

2.1 苏丹草各生育期灌溉制度的确定

试验区苏丹草自 2019 年 5 月 13 日出苗至 8 月 3 日第二茬抽穗,全生长季共 77 d,两茬生育期分别为 47 d 和 30 d。全生长季内苏丹草共刈割 2 次,每茬苏丹草均在抽穗期刈割,时间分别为 7 月 1 日、8 月 6 日。表 2 为苏丹草各茬生育期时间。

试验地受季风气候影响,具有典型的雨热同期的特点。当地温度从 5 月份开始一直呈现上升趋势,7 月份温度最高;日均风速最高是 5 月上旬,为 0.61 m·s⁻¹,最低是 7 月中下旬(0.01 m·s⁻¹);太阳辐射最低是 5 月中旬,为 127.51 W·m⁻²,太阳辐射最高是 6 月下旬,为 222.62 W·m⁻²。由于降雨主

要集中在 7 月份,有效降雨量多达 129.2 mm,因此 7 月份平均相对湿度最大,为 76.4%。苏丹草全生长季内有效降雨累计量为 167.9 mm,其中第一茬降雨 38.7 mm,第二茬降雨 129.2 mm。温度和日照辐射是影响作物生长的重要因素,7 月份的雨热同期使得第二茬苏丹草生长迅速,是第二茬产量升高的主要因素之一。苏丹草的全生长季内不同灌溉管理区的灌溉制度如图 3 所示。苏丹草在整个生育期内均匀灌溉处理区的总灌水量为 149 mm,其中第一茬 71 mm,第二茬 78 mm。变量灌溉管理区 V1、V2、V3 累计灌水量分别为 147、123、118 mm,其中第一茬分别是 75、62、70 mm,第二茬分别 72、61、48 mm。所有管理区到达灌水下限的时间一致,但是由于土壤持水能力不同,不同管理区内灌水量出现差异。7 月 4 日为刈割后第一次灌水,灌水都在 50 mm 左右,因此分为 2 次灌水,7 月 4 日灌水 30 mm,而 7 月 5 日出现了降雨,雨后又补测了含水率,发现 V3 区的含水率已经达到 90%FC,因此 7 月 7 日 V3 区不再灌水。由图可知,在第一茬时,累计灌水量最高的区域为 V1 处理,比均匀灌溉处理下灌水量多 4 mm,第一茬变量灌溉处理下平均累计灌水量约为 69 mm,比均匀灌溉处理少 2 mm。在第二茬时,均匀灌溉的累计灌水量为 78 mm,比 V3 区高 30 mm,而变量灌溉区域平均累计灌水量约为 60 mm,低于均匀灌溉处理约 18 mm。苏丹草的整个生育期内变量灌溉处理的所有管理区平均累计灌水量约为 129 mm,比均匀灌溉处理节水约 20 mm,节水 13.4%,且第二茬内变量灌溉处理比均匀灌溉处理节水 23.1%。

2.2 变量灌溉对苏丹草产量的影响

表 3 给出了不同处理下各茬及全年的苏丹草产量及差异显著性分析结果。由表 3 知,在第一茬中,无论是变量灌溉处理还是均匀灌溉处理,均为 2 区产量最高,其次是 1 区,最低是 3 区,其中 1、2 区之

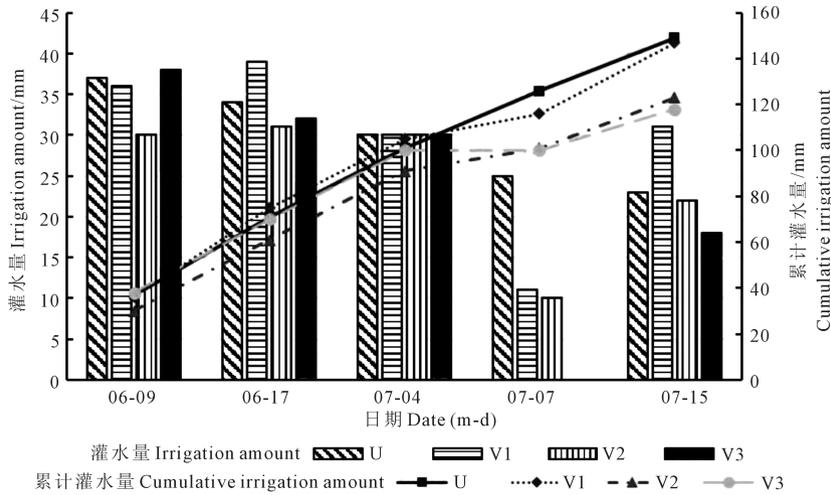


图 3 全生长季苏丹草灌溉制度

Fig.3 Irrigation scheduling of sudangrass during the whole growing stages

间无显著性差异,但是它们都显著高于 3 区 ($P < 0.05$);第二茬无论是变量灌溉还是均匀灌溉,均是 3 区产量最高,其次是 2 区,最低是 1 区,且 3 个区之间存在显著性差异 ($P < 0.05$),这与第一茬的结果不同,主要可能是因为苏丹草第二茬时根系发育较为完全,拔节期后由于大量降雨,土壤含水率处于较高的水平,甚至接近饱和含水率,使苏丹草根系有时处于淹渍状态,出现根系缺氧,不利于植株生长,而 3 区具有较高的砂粒含量,呈现较强的砂性,其排水通气能力高于 1 区和 2 区,因此在拔节至刈割期间仍能保持较高的生长速度,获得最高的产量。在全年产量中,相同灌溉处理下各区产量差异显著 ($P < 0.05$),且产量按照 1、2、3 区的顺序依次升高,表明 *Eca* 对苏丹草的产量有显著影响,而 *Eca* 反映了土壤质地的情况,即表明土壤质地对苏丹草产量有显著影响。这与 Kravchenko 等^[16]、Jiang 等^[17]开展的土壤物理特性对作物产量变异性的结果基本一致。在本研究中,3 区中苏丹草产量显著高于 1 区、2 区,主要是由于 3 区内砂粒含量最高,具有良好的排水通气能力,在雨热同期的夏季,能够给苏丹草根系提供一个较好的生长发育环境,从而保证苏丹草能保持较快的生长速度,最终获得较高的产量。

由表 3 中两种灌溉方式的产量可知,无论是各茬还是全年产量,均匀灌溉与变量灌溉苏丹草的产量均无显著差异 ($P > 0.05$),表明变量灌溉对苏丹草产量无显著性影响,结合前文的灌溉制度可知,全生育期内变量灌溉处理下的灌溉水分利用效率为 $9.46 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$,显著高于均匀灌溉 $8.05 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ($P < 0.05$),提高了 17.5% 左右。由表 4 可知,在降雨量较大的第二茬中,变量灌溉处理下的灌溉水分利用

表 3 不同处理下苏丹草干草产量/($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)

Table 3 The hay yield of sudangrass under different treatments

茬次 Cutting	分区 Zone	灌溉处理 Irrigation treatment	
		URI	VRI
第一茬 First cutting	1	5428.39Aa±240.22	5391.92Aa±405.96
	2	5608.86Aa±320.28	5639.11Aa±331.89
	3	5040.24Ab±396.38	4933.22Ab±300.98
第二茬 Second cutting	1	5385.10Ac±602.45	5285.48Ac±388.77
	2	5837.05Bb±575.9	6715.83Ab±411.46
	3	8692.73Aa±973.59	8724.20Aa±244.98
全年 Annual	1	10813.49Ac±660.42	10677.40Ac±741.68
	2	11445.91Bb±334.42	12354.94Ab±739.58
	3	13732.97Aa±843.31	13657.42Aa±181.05

注:同列不同小写字母代表不同分区间在 $P < 0.05$ 水平上差异显著,同行中不同大写字母代表不同灌溉处理间在 $P < 0.05$ 水平上差异显著;URI 为均匀灌溉,VRI 为变量灌溉。下同。

Note: Different lowercase letters within the same column mean significant difference on yield between different zones at $P < 0.05$ level, while different uppercase letters within the same row mean significant difference on yield between different irrigation treatments at $P < 0.05$ level. URI=uniform rate irrigation, VRI=variable rate irrigation. The same below.

表 4 不同处理下苏丹草干草灌溉水分利用效率/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)

Table 4 The IWUE of sudangrass under different treatments

茬次 Cutting	分区 Zone	灌溉处理 Irrigation treatment	
		URI	VRI
第一茬 First cutting	1	7.52Aa±0.34	7.09Ab±0.32
	2	7.77Ba±0.45	9.40Aa±0.48
	3	6.99Ab±0.55	6.95Ab±0.43
第二茬 Second cutting	1	6.90Ab±0.77	7.34Ac±0.54
	2	7.48Bb±0.74	11.19Ab±0.68
	3	11.14Ba±1.25	18.18Aa±0.53
全年 Annual	1	7.28Ac±0.46	7.26Ac±0.52
	2	7.68Bb±0.23	10.04Ab±0.60
	3	9.22Ba±0.56	11.57Aa±0.15

效率 ($12.24 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$) 显著高于均匀灌溉 ($8.51 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$) ($P < 0.05$),提高了 43.8% 左右,表明变量灌溉可以显著提高灌溉水分利用效率,且在雨季提升效果较强。总体而言,相比于均匀灌溉,变量灌溉并未对苏丹草产量有显著提升,但可显著提升其

灌溉水分利用效率。这一结果与 Sui 等^[18]在美国密西西比州开展的玉米变量灌溉试验和李秀梅^[19]在华北地区开展的冬小麦-夏玉米变量灌溉试验结论类似。主要原因是苏丹草的主要生长季在降雨充沛的夏季,变量灌溉可根据土壤持水能力采用不同灌溉处理,在雨季降雨量比较大的情况下,变量灌溉可有效减少由灌溉引起的土壤水分深层渗漏,故而其灌溉水分利用效率较均匀灌溉有了很大提升。因此,半湿润气候条件下变量灌溉管理应该充分利用降雨,以有效提升灌溉水分利用效率。

2.3 变量灌溉对苏丹草品质的影响

粗蛋白含量与相对饲喂价值是评价苏丹草饲喂价值的指标。一般认为粗蛋白含量与相对饲喂价值越高,则苏丹草的品质越好^[20]。

表 5 给出了不同处理下各茬苏丹草粗蛋白含量显著性分析结果,由表可知苏丹草第一茬粗蛋白平均含量为 11.84%,第二茬为 12.20%。第一茬同一灌溉处理下 3 区苏丹草的粗蛋白含量无显著性差异 ($P>0.05$)。第二茬均匀灌溉处理下 1 区粗蛋白含量显著高于 2、3 区 ($P<0.05$),变量灌溉处理中 1 区的粗蛋白含量也高于 2、3 区,但是只与 2 区有显著性差异,与 3 区无显著性差异;同一分区下,第二茬变量灌溉处理下的粗蛋白含量均显著高于均匀灌溉 ($P<0.05$)。综上所述,变量灌溉对第一茬苏丹草的粗蛋白含量无显著性影响,但是在降雨量较大的第二茬,变量灌溉处理可以提高粗蛋白含量。

表 6 为苏丹草全生长季内不同处理下苏丹草的相对饲喂价值。由表可知,苏丹草第一茬的相对饲喂价值高于第二茬,两茬相对饲喂价值均值分别为 87.03 与 81.29,这与该地区苜蓿的品质规律类似^[21]。第一茬两种灌溉方式下 3 区的相对饲喂价值要略高于另外两个区;第二茬均匀灌溉处理下 3 区相对饲喂价值要高于 1、2 区,但是只与 2 区有显著性差异 ($P<0.05$),与 1 区无显著性差异,变量灌溉处理中 3 区的相对饲喂价值含量也高于 1、2 区并且差异显著 ($P<0.05$)。第一茬内变量灌溉处理下苏

丹草的相对饲喂价值与均匀灌溉无显著性差异 ($P>0.05$);第二茬,除了 1 区,其余各区内变量灌溉处理下的相对饲喂价值均显著高于均匀灌溉处理 ($P<0.05$)。综上所述,变量灌溉对第一茬苏丹草的相对饲喂价值无显著性影响,但是在降雨量较大的第二茬,变量灌溉可以显著提高 2、3 区内苏丹草的相对饲喂价值。同时结果也表明不同土壤质地会影响到苏丹草的相对饲喂价值,在砂粒含量较高的 3 区,相对饲喂价值也较高。

总体而言,在降雨量较大的第二茬,相比于均匀灌溉,变量灌溉对苏丹草的品质有显著提升,与 Cupina 等^[22]研究结果一致。这可能是由于整块试验地土质砂质含量较高,在降雨频繁的雨季中,灌水量较大的均匀灌溉易将土壤中的养分淋洗至深层土壤,而土壤养分状况对苏丹草品质影响较大^[23],此时变量灌溉依据土壤实际缺水状况采用较少灌水量,避免有效根系土层内的养分流失,使得苏丹草可以有效吸收土壤中的养分,因而品质得到显著提高。

3 结 论

1) 2019 年苏丹草全生长季内变量灌溉灌水 129 mm,比均匀灌溉处理节水 13.4%,且第二茬变量灌溉处理比均匀灌溉处理节水 23.1%,在华北地区种植苏丹草采用变量灌溉能够实现一定的节水效益,且节水效果主要集中在雨季。

2) 变量灌溉对苏丹草的产量无显著性影响,土壤质地对苏丹草产量有显著性影响。全年产量随着土壤砂粒程度的增加显著升高,砂性土地可以获得更高的产量。与均匀灌溉相比,全年变量灌溉下灌溉水分利用效率提高了 17.5%,且在第二茬雨季提升效果显著,提高了 43.8%。

3) 变量灌溉处理对第一茬苏丹草的粗蛋白、相对饲喂价值没有显著性影响,但是在降雨量较大的第二茬,变量灌溉显著提高苏丹草的粗蛋白含量,提高经济效益。

表 5 不同处理下苏丹草粗蛋白含量/%

Table 5 The crude protein content of sudangrass under different treatments

茬次 Cutting	分区 Zone	灌溉处理 Irrigation treatment	
		URI	VRI
第一茬 First cutting	1	12.12Aa±0.45	12.15Aa±2.35
	2	11.72Aa±0.27	11.66Aa±2.29
	3	11.96Aa±2.59	11.45Aa±2.44
第二茬 Second cutting	1	12.32Ba±0.69	13.08Aa±0.38
	2	11.31Bb±0.17	12.55Ab±1.22
	3	11.31Bb±0.28	12.64Aab±0.55

表 6 不同处理下苏丹草相对饲喂价值

Table 6 The relative feed value of sudangrass under different treatments

茬次 Cutting	分区 Zone	灌溉处理 Irrigation treatment	
		URI	VRI
第一茬 First cutting	1	86.69Aa±5.73	87.99Aa±5.56
	2	85.05Aa±6.16	85.23Aa±6.15
	3	88.71Aa±1.59	88.50Aa±4.98
第二茬 Second cutting	1	80.89Aa±5.73	80.42Ab±5.91
	2	76.40Bb±2.11	81.70Ab±3.01
	3	82.27Ba±4.07	86.10Aa±1.83

参考文献:

- [1] Sui R, Yan H. Field study of variable rate irrigation management in humid climates[J]. *Irrigation and Drainage*, 2017, 6(3):327-339.
- [2] Evans R G, King B A. Site-specific sprinkler irrigation in a water-limited future[J]. *Transactions of the ASABE*, 2012, 55(2):493-504.
- [3] O'Shaughnessy S A, Evett S R, Andrade M A. Site-specific variable-rate irrigation as a means to enhance water use efficiency[J]. *Transactions of the ASABE*, 2016, 59(1):239-249.
- [4] 赵伟霞,李久生,杨汝苗.田间试验评估圆形喷灌机变量灌溉系统水量分布特性[J]. *农业工程学报*, 2014, 30(22):53-62.
- [5] 赵伟霞,李久生,杨汝苗,等.基于土壤水分空间变异的变量灌溉作物产量及节水效果[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(2):1-7.
- [6] 马静,严海军,王春晖.尾枪开闭对圆形喷灌机变量灌溉施肥均匀性的影响与改进[J]. *水利学报*, 2016, 47(12):1577-1584.
- [7] 张钊.中心支轴式变量灌溉系统中央控制系统的设计与实现[D].杨凌:西北农林科技大学, 2019.
- [8] 程时焕.中心支轴式变量灌溉系统电磁阀控制系统的设计与实现[D].杨凌:西北农林科技大学, 2019.
- [9] Shi X, Han W T, Zhao T, et al. Decision support system for variable rate irrigation based on UAV multispectral remote sensing[J]. *Sensors (Switzerland)*, 2019, 19(13):2880.
- [10] 徐玉鹏,武之新,赵忠祥.苏丹草的适应性及在我国农牧业生产中的发展前景[J]. *草业科学*, 2003, 20(7):23-25.
- [11] 郭豫霞,董永祥,黄峰.宁夏干旱、半干旱地区苏丹草需水规律及其水分供应状况的分析[J]. *干旱区资源与环境*, 1992, (2):85-91.
- [12] Mahmoudzadeh V M, Oad R. Sorghum-sudangrass water productivity under subsurface drip irrigation[J]. *Irrigation and Drainage*, 2018, 67(5):702-712.
- [13] Schittenhelm S, Schroetter S. Comparison of drought tolerance of maize, sweet sorghum and sorghum-sudangrass hybrids[J]. *Journal of Agronomy & Crop Science*, 2014, 200(1):46-53.
- [14] 刘虎,魏永富,郭克贞,等.分胁迫对北疆地区人工牧草产量的影响[J]. *中国水土保持*, 2015, (3):54-57, 69.
- [15] 杨汝苗.变量灌溉系统水力性能及其对作物生长影响的评估[D].北京:中国农业大学, 2015.
- [16] Kravchenko, Alexandra N, Bullock, et al. Correlation of corn and soybean grain yield with topography and soil properties[J]. *Agronomy Journal*, 2000, 92(1):75-83.
- [17] Jiang P, Thelen K D. Effect of soil and topographic properties on crop yield in a north-central corn-soybean cropping system[J]. *Agronomy Journal*, 2004, 96(1):252-258.
- [18] Sui R, Daniel K F, Krishna N R. Yield response to variable rate irrigation in corn[J]. *Journal of Agricultural Science*, 2015, 7(11):11-18.
- [19] 李秀梅.华北地区冬小麦-夏玉米变量灌溉水分管理方法[D].北京:中国水利水电科学研究院, 2019.
- [20] 逯晓萍,云锦凤,肖宇红.高丹草(高粱×苏丹草)产量及其构成因素的 QTL 定位与分析[J]. *华北农学报*, 2007, 22(4):80-85.
- [21] 孟洋洋.灌水下限对紫花苜蓿生长、产量和品质的影响[D].北京:中国农业大学, 2019.
- [22] Cupina B, Manojlovic M, Krstic D, et al. Effect of winter cover crops on the dynamics of soil mineral nitrogen and yield and quality of Sudan grass (*Sorghum bicolor* (L.) Moench)[J]. *Australian Journal of Crop Science*, 2011, 5(7):839-845.
- [23] Ji H C, Lee S H, Yoon S H, et al. Growth, Forage production and quality of sorghum, sorghum × sudangrass and sudangrass hybrids at paddy field in middle region of Korea[J]. *Journal of the Korean Society of Grassland & Forage Science*, 2010, 30(2):109-114.
- [8] 沈云亭,王超平,张春光.滴灌技术的优势及推广应用前景分析[J]. *河南农业*, 2010, (19):55.
- [9] Jensen M E. Design and Operation Of Farm Irrigation Systems[M]. St. Joseph, MI, USA: American Society of Agricultural Engineers, 1980.
- [10] 姚振宪,张薇薇,张志强,等.我国滴灌发展历程回顾及建议[C]//中国农业工程学会,中国农业机械学会,中国园艺学会,等.多学科在现代农业建设中交叉运用技术研讨会论文集汇编.北京, 2011:65-71.
- [11] 王振华.典型绿洲区长期膜下滴灌棉田土壤盐分运移规律与灌溉调控研究[D].北京:中国农业大学, 2014.
- [12] 吴玉芹,杨鹏,刘思若.关于我国微灌技术发展的几点思考[J]. *灌溉排水学报*, 2015, 34(12):1-4.
- [13] 顾烈烽.新疆生产建设兵团棉花膜下滴灌技术的形成与发展[J]. *节水灌溉*, 2003, (1):27-29.
- [14] 新疆生产建设兵团统计年鉴(2019)[M],北京:中国统计出版社, 2019.
- [15] 马英杰,何继武,洪明,等.新疆膜下滴灌技术发展过程及趋势分析[J]. *节水灌溉*, 2010, (12):87-89.
- [16] 新疆生产建设兵团.关于大力发展节水灌溉的决定;新兵发[1999]1号[EB/OL]. (1998-12-24) [2020-05-31]. <https://www.chinacourt.org/law/detail/1998/12/id/76985.shtml>
- [17] 闫海燕.不妨在全国推广“兵团节水灌溉模式”[N/OL]. *中国经济导报*. (2012-08-18) [2020-05-31]. http://www.ceh.com.cn/ceh/llpd/2012/8/18/129148_2.shtml.
- [18] 新疆生产建设兵团水利局.兵团贯彻《国家农业节水纲要(2012-2020年)》的实施意见;兵水发[2013]140号[EB/OL]. (2013-05-17) [2020-05-31]. <http://www.jsgg.com.cn/Index/Display.asp?NewsID=17270>.
- [19] 国家发展和改革委员会,水利部.关于印发《国家节水行动方案》的通知;发改环资规[2019]695号[EB/OL]. (2019-04-15) [2020-05-31]. http://www.gov.cn/gongbao/content/2019/content_5419221.htm
- [20] 国务院办公厅.关于印发国家农业节水纲要(2012-2020年)的通知;国办发[2012]55号[EB/OL]. (2012-11-26) [2020-05-31]. http://www.gov.cn/zwqk/2012-12/15/content_2291002.htm

(上接第 9 页)