宁夏干旱风沙草原区紫花苜蓿固定喷灌水肥耦合试验

周 乾[1],徐利岗[1],汤 英[1],刘燕茹[2] (1. 宁夏水利科学研究院,宁夏银川 750021;2. 宁夏农业综合开发中心,宁夏银川 750002)

摘要 [目的]研究宁夏干旱风沙草原区紫花苜蓿固定喷灌水肥协同效应和水肥管理制度。[方法]以苜蓿为试验材料,通过大田试验对不同水肥组合下固定喷灌紫花苜蓿株高、土壤水分、产量及水分生产效率等指标进行综合分析。[结果]苜蓿株高随灌水量的增加而增加,现蕾期和分枝期耗水量显著大于其他生育阶段;处理 T_4 和 T_{10} 苜蓿产量和水分利用效率均较高,且均无显著差异($P>0.05$)。[结论]宁夏干旱风沙草原区苜蓿固定喷灌水肥耦合灌溉制度为灌溉定额 3 600 m^3/hm^2,灌水次数为 9 次;施肥量为 N 75 kg/hm^2、P_2O_5 105 kg/hm^2、K_2O 90 kg/hm^2。

关键词 干旱风沙草原区;紫花苜蓿;固定喷灌;灌溉制度;水肥耦合
中图分类号 S275.5 **文献标识码** A
文章编号 0517-6611(2021)17-0195-06
doi:10.3969/j.issn.0517-6611.2021.17.051
开放科学(资源服务)标识码(OSID):

Coupling Experiment of Water and Fertilizer with Fixed Spray Irrigation on Alfalfa in Arid Sand Savanes of Ningxia

ZHOU Qian, XU Li-gang, TANG Ying et al (Ningxia Institute of Water Resources Research, Yinchuan, Ningxia 750021)

Key words [Objective] To study the synergistic effects and management system of water and fertilizer of alfalfa with fixed spray irrigation in arid sand savanes of Ningxia. [Method] Taking alfalfa as test materials, the plant height, soil moisture content, yield, water production efficiency and other indices of alfalfa with fixed spray irrigation under different water and fertilizer combinations were analyzed through field experiment. [Result] The plant height of alfalfa increased with the increase of water irrigation amount. Water consumption in budding stage and branching stage was significantly higher than that in other growth stages. Treatment T_{10} and T_4 had higher yield and water use efficiency, and there was no significant difference between the two treatments. [Conclusion] The water-fertilizer coupling irrigation system of alfalfa with fixed spray irrigation in arid sand savanes of Ningxia was as follows: the irrigation quota was 3 600 m^3/hm^2, irrigation times was 9 times; the fertilization amount of N, P_2O_5 and K_2O were 75, 105 and 90 kg/hm^2 respectively.
Key words Arid sand savanes; Alfalfa; Fixed spray irrigation; Irrigation system; Coupling of water and fertilizer

我国是一个干旱缺水极为严重的国家,淡水资源总量虽然有 2.8 万亿 m^3,占世界水资源总量的 6%,居世界第 4 位,但人均水资源占有量仅为世界平均水平的 25%左右,是全球人均水资源最贫乏的国家之一[1]。我国水资源分布极不均匀,宁夏是我国水资源严重短缺的省区之一,当地水资源量少质差,多年平均降水量 289 mm,70%的降水量集中在汛期,北部引黄灌区不足 200 mm,最小的地区仅几十毫米,多年平均蒸发量为 2 200 mm 左右,全区水资源总量 11.63 亿 m^3,人均占有量 190 m^3,只有全国平均值的 1/12,水资源可利用量少且开发利用难度大。宁夏农业用水量占总用水量的 85%,且农业用水水平和用水效率低于全国平均水平,农业节水将是缓解水资源供需矛盾的主要途径。水肥一体化技术是同时进行灌溉与施肥,适时并适量满足农作物对水分和养分的需求,实现水肥协同管理和高效利用的农业技术[2-3]。大量研究表明,与传统方式相比,水肥一体化技术可以减少肥料的损失,同时提高水肥的综合利用效率。针对宁夏农业用水矛盾突出、水资源利用效率不高等突出问题,大力推广高效节水灌溉与水肥一体化技术尤为重要[4-5]。在宁夏干旱风沙草原区,由于耕地面积集约化程度较高,人力资源和水资源匮乏,喷灌成为苜蓿高效综合生产的必选方式,因此摸清苜蓿喷灌条件下需水、需肥规律和水肥协同效应等问题对于提高苜蓿喷灌综合生产效率、产量、品质和挖掘农业节水潜力极为重要[6-8]。笔者针对宁夏干旱风沙草原区水资源短缺及优化配置不合理等问题,采用固定式喷灌灌水技术,通过大田试验研究了苜蓿固定喷灌条件下水肥交互效应,探讨了苜蓿不同水肥组合对苜蓿生理生长之间的影响机制,提出了宁夏干旱风沙草原区苜蓿喷灌水肥管理制度,对于提高苜蓿效益、促进宁夏草畜产业发展、缓解宁夏水资源供需矛盾、提高水资源利用效率具有重要意义[9-11]。

1 材料与方法

1.1 试验区概况 试验区位于宁夏盐池县青山乡,地处陕、甘、宁、蒙四省(区)交界地带,属于典型的温带大陆性季风气候,年日照时数为 2 868 h;年平均气温 8.5 ℃,≥10 ℃积温 2 945 ℃,无霜期 128 d;降雨量 290 mm,多集中在 7—9 月,年蒸发量 2 180 mm。试验区土壤类型为砂壤土,土壤理化性质见表 1。

1.2 试验方案 试验采用灌水量和施肥量两因素多水平随机区组设计,共设置 12 个处理(T_1~T_{12}),供试材料为甘农 3 号苜蓿,灌水方式采用固定式喷灌,喷头间距为 7 m,支管间距为 7 m,喷头流量为 1 m^3/h。目标产量为 15 000 kg/hm^2,所有处理均为灌水 9 次、施肥 4 次,灌水和施肥时间相同(表 2~3)。试验采用随灌水施肥,试验所用肥料为可溶性肥料,包括尿素、磷酸一铵和硫酸钾。

1.3 观测指标

1.3.1 气象指标。自动气象站观测温度、降雨量和风速,数据步长为 1 h。

1.3.2 土壤含水量。使用 PR2 土壤水分监测仪检测 0~10、

基金项目 国家重点研发计划项目(2016YFC0400305);宁夏重点研发计划项目(2019BBF02029);宁夏人才项目(KJT2016005)。
作者简介 周乾(1989—),男,河南延津人,工程师,硕士,从事节水灌溉与水土保持研究。
收稿日期 2020-10-27;**修回日期** 2020-11-27

10~20、20~30、30~40、40~60、60~100 cm 土壤含水量,每 10 d 检测 1 次。

表 1 试验区土壤理化性质

Table 1 The physical and chemical properties of the soil in the experimental area

土层 Soil layer cm	容重 Bulk density g/cm³	饱和含水量 Saturated water content//%	田间持水量 Field moisture capacity//%	pH	全盐含量 Total salt content//g/kg	有机质含量 Organic matter content//g/kg	碱解氮含量 Alkali-hydrolyzed nitrogen content mg/kg	速效磷含量 Available phosphorus content mg/kg
0~20	1.62	22.51	14.21	9.67	0.59	2.51	11.27	7.98
20~40	1.54	21.48	14.45	9.55	0.47	2.24	9.28	40.83
40~60	1.61	22.49	13.46	10.02	0.39	1.98	10.37	7.27

表 2 固定喷灌苜蓿水肥一体化技术研究试验处理

Table 2 The treatments for the research on water and fertilizer integration technology of alfalfa with fixed spray irrigation

处理 Treatment	灌水定额 Irrigation quota//m³/ hm²	施肥量 Fertilizer amount//kg/hm²
T_1	S_1(2 250)	F_4(N 75、P_2O_5 105、K_2O 90)
T_2	S_2(2 700)	F_4(N 75、P_2O_5 105、K_2O 90)
T_3	S_3(3 150)	F_4(N 75、P_2O_5 105、K_2O 90)
T_4	S_4(3 600)	F_4(N 75、P_2O_5 105、K_2O 90)
T_5	S_5(4 050)	F_4(N 75、P_2O_5 105、K_2O 90)
T_6	S_6(4 500)	F_4(N 75、P_2O_5 105、K_2O 90)
T_7	S_4(3 600)	F_1(N 52.5、P_2O_5 73.5、K_2O 63)
T_8	S_4(3 600)	F_2(N 60、P_2O_5 84、K_2O 72)
T_9	S_4(3 600)	F_3(N 67.5、P_2O_5 94.5、K_2O 81)
T_{10}	S_4(3 600)	F_5(N 82.5、P_2O_5 115.5、K_2O 99)
T_{11}	S_4(3 600)	F_6(N 90、P_2O_5 126、K_2O 108)
T_{12}	S_4(3 600)	F_7(不施肥)

1.3.3 生长量。每 10 d 测 1 次株高,每茬次收割前测 1 次。每个处理选取 10 个样株进行测量,去掉 1 个最大值、最小值,取其平均值。

1.3.4 产量。每茬次均测产。5%苜蓿开花时进行测产,每个处理取 1 m² 苜蓿,收割后称量其鲜草重,自然晾晒干后称量干草重。

2 结果与分析

2.1 不同处理对固定喷灌苜蓿株高的影响 2019 年共测量株高 15 次,其中第 1 茬 6 次,第 2 茬 4 次,第 3 茬 5 次,每个处理选取具有代表性的 10 株苜蓿植株作为测量对象,去掉 1 个最大值和 1 个最小值,取平均值。根据苜蓿平均株高,绘制图 1~3。

从图 1~3 可以看出,各处理喷灌苜蓿平均每茬次的株高从大到小依次为 T_{11}、T_{10}、T_6、T_5、T_7、T_4、T_9、T_8、T_3、T_2、T_1、T_{12}。结果表明,苜蓿的株高随灌水量的增加而增加,但当灌水量大于 3 600 m³/hm² 时,株高的增长幅度有所减小;苜蓿的株高随施肥量的增加并不一定增加。

表 3 固定喷灌苜蓿水肥一体化技术研究试验水肥方案

Table 3 Water and fertilizer schemes for the research on water and fertilizer integration technology of alfalfa with fixed spray irrigation

茬次 Stubble number	灌水时间 Irrigation time	灌水次序 Irrigation sequence	灌水定额 Irrigation quota//m³/hm²						施肥量占全年总施肥量的百分比 Percentage of fertilizer application in total annual fertilizer application//%
			S_1	S_2	S_3	S_4	S_5	S_6	
第 1 茬	苗期(返青期)(4 月上旬至中旬)	1	225	270	315	375	420	465	20
The first	分枝期(4 月下旬~5 月中旬)	2	285	345	405	450	510	570	25
stubble	现蕾期~开花期(5 月下旬~6 月中旬)	3	285	345	405	450	510	570	—
第 2 茬	苗期(6 月下旬~7 月上旬)	4	225	270	315	375	420	465	30
The second	分枝期(7 月上旬至中旬)	5	225	270	315	375	420	465	—
stubble	现蕾期(7 月中旬至下旬)	6	225	270	315	375	420	465	—
	开花期(7 月下旬~8 月上旬割前 1 周灌水 1 次)	7	210	240	270	300	330	360	—
第 3 茬 The	苗期~分枝期(8 月上旬至下旬)	8	285	345	405	450	510	570	25
third stubble	现蕾期~开花期(9 月上旬至下旬)	9	285	345	405	450	510	570	—
合计 Total		9	2 250	2 700	3 150	3 600	4 050	4 500	100

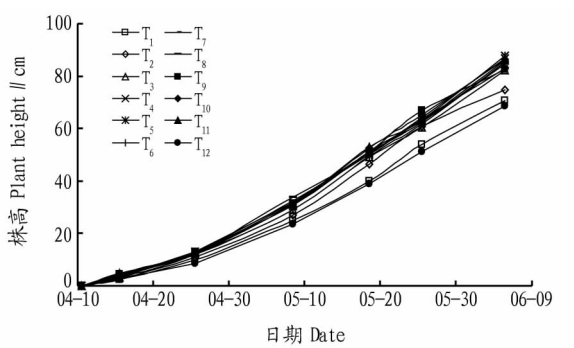

图 1 不同处理对固定喷灌第 1 茬紫花苜蓿株高的影响

Fig. 1 The effects of different treatments on the plant height of the first stubble of alfalfa with fixed spray irrigation

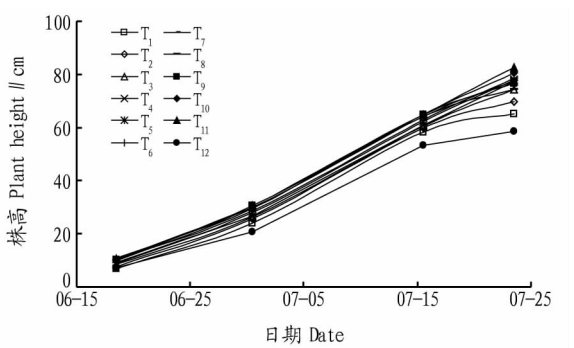

图 2 不同处理对固定喷灌第 2 茬紫花苜蓿株高的影响

Fig. 2 The effects of different treatments on the plant height of the second stubble of alfalfa with fixed spray irrigation

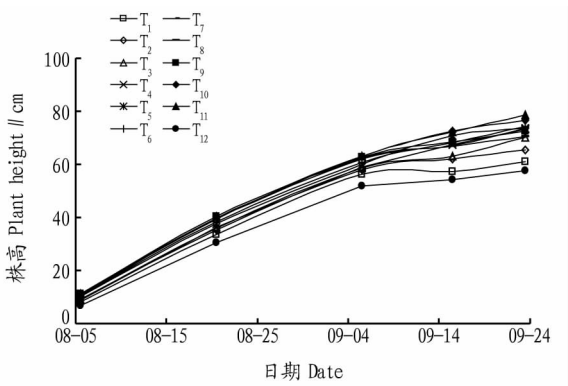

图 3　不同处理对固定喷灌第 3 茬紫花苜蓿株高的影响

Fig. 3　The effects of different treatments on the plant height of the third stubble of alfalfa with fixed spray irrigation

2.2　不同处理对固定喷灌苜蓿耗水量和耗水强度的影响　采用水量平衡法对苜蓿耗水量和耗水强度进行计算。水量平衡采用下式计算：

$$ED=(W_0-W_E)+M+P+K-D-R \quad (1)$$

式中，ED 为耗水量(mm)，W_0、W_E 为生育期某阶段初、末 100 cm 土层的土壤含水量(mm)，M 为某阶段内的灌水量(mm)，P 为某阶段内的降雨量(mm)，K 为某阶段内地下水补给量(mm)，D 为深层渗漏量(mm)，R 为径流量(mm)。

由于试验区地下水位埋藏较深，K 取值 0；在不考虑深层渗漏量的情况下，D 取值 0；生育期内降雨量少、强度低，地表径流量可以忽略，R 取值 0；土壤湿润深度取值 100 cm。

采用公式(1)计算生育期内各处理实际耗水量和耗水强度，计算出苜蓿各茬次耗水量和耗水强度，见表 4~6。

表 4　2019 年紫花苜蓿第 1 茬次耗水量及耗水强度

Table 4　Water consumption and water consumption intensity for the first stubble of alfalfa in 2019

处理 Treatment	生育期 Growth stages	起止日期 Beginning and ending dates	天数 Number of days//d	土壤蓄水量减少值 Reduction value of soil water storage//mm	降雨量 Rainfall mm	灌水量 Irrigation amount mm	耗水量 Water consumption amount//mm	耗水强度 Water consumption intensity//mm/d
T_1	返青期	04-10—04-23	13	4.0	0.4	15	19.4	1.49
	分枝期	04-23—05-10	17	1.5	46.0	19	66.5	3.91
	现蕾期	05-10—05-29	19	8.5	1.0	19	28.5	1.50
	初花期	05-29—06-05	7	10.5	0.0	0	10.5	1.50
T_2	返青期	04-10—04-23	13	-8.0	0.4	18	10.4	0.80
	分枝期	04-23—05-10	17	0.5	46.0	23	69.5	4.09
	现蕾期	05-10—05-29	19	5.5	1.0	23	29.5	1.55
	初花期	05-29—06-05	7	14.5	0.0	0	14.5	2.07
T_3	返青期	04-10—04-23	13	-1.0	0.4	21	20.4	1.57
	分枝期	04-23—05-10	17	0.5	46.0	27	73.5	4.32
	现蕾期	05-10—05-29	19	6.5	1.0	27	34.5	1.82
	初花期	05-29—06-05	7	18.5	0.0	0	18.5	2.64
T_4	返青期	04-10—04-23	13	-13.0	0.4	25	12.4	0.95
	分枝期	04-23—05-10	17	-1.5	46.0	30	74.5	4.38
	现蕾期	05-10—05-29	19	3.5	1.0	30	34.5	1.82
	初花期	05-29—06-05	7	20.5	0.0	0	20.5	2.93
T_5	返青期	04-10—04-23	13	-10.0	0.4	28	18.4	1.42
	分枝期	04-23—05-10	17	-3.5	46.0	34	76.5	4.50
	现蕾期	05-10—05-29	19	2.5	1.0	34	37.5	1.97
	初花期	05-29—06-05	7	24.5	0.0	0	24.5	3.50
T_6	返青期	04-10—04-23	13	-7.0	0.4	31	24.4	1.88
	分枝期	04-23—05-10	17	-2.5	46.0	38	81.5	4.79
	现蕾期	05-10—05-29	19	5.5	1.0	38	44.5	2.34
	初花期	05-29—06-05	7	28.5	0.0	0	28.5	4.07
T_7	返青期	04-10—04-23	13	-9.0	0.4	25	16.4	1.26
	分枝期	04-23—05-10	17	1.5	46.0	30	77.5	4.56
	现蕾期	05-10—05-29	19	4.5	1.0	30	35.5	1.87
	初花期	05-29—06-05	7	19.5	0.0	0	19.5	2.79
T_8	返青期	04-10—04-23	13	5.0	0.4	25	30.4	2.34
	分枝期	04-23—05-10	17	3.5	46.0	30	79.5	4.68
	现蕾期	05-10—05-29	19	5.5	1.0	30	36.5	1.92
	初花期	05-29—06-05	7	17.5	0.0	0	17.5	2.50
T_9	返青期	04-10—04-23	13	-7.0	0.4	25	18.4	1.42
	分枝期	04-23—05-10	17	1.5	46.0	30	77.5	4.56
	现蕾期	05-10—05-29	19	5.5	1.0	30	36.5	1.92
	初花期	05-29—06-05	7	20.5	0.0	0	20.5	2.93
T_{10}	返青期	04-10—04-23	13	-3.0	0.4	25	22.4	1.72
	分枝期	04-23—05-10	17	3.5	46.0	30	79.5	4.68
	现蕾期	05-10—05-29	19	6.5	1.0	30	37.5	1.97
	初花期	05-29—06-05	7	17.5	0.0	0	17.5	2.50

接下表

续表 4

处理 Treatment	生育期 Growth stages	起止日期 Beginning and ending dates	天数 Number of days//d	土壤蓄水量减少值 Reduction value of soil water storage//mm	降雨量 Rainfall mm	灌水量 Irrigation amount mm	耗水量 Water consumption amount//mm	耗水强度 Water consumption intensity//mm/d
T_{11}	返青期	04-10—04-23	13	-9.0	0.4	25	16.4	1.26
	分枝期	04-23—05-10	17	2.5	46.0	30	78.5	4.62
	现蕾期	05-10—05-29	19	7.5	1.0	30	38.5	2.03
	初花期	05-29—06-05	7	21.5	0.0	0	21.5	3.07
T_{12}	返青期	04-10—04-23	13	-3.0	0.4	25	22.4	1.72
	分枝期	04-23—05-10	17	1.5	46.0	30	77.5	4.56
	现蕾期	05-10—05-29	19	2.5	1.0	30	33.5	1.76
	初花期	05-29—06-05	7	16.5	0.0	0	16.5	2.36

表 5 2019 年紫花苜蓿第 2 茬次耗水量及耗水强度

Table 5 Water consumption and water consumption intensity for the second stubble of alfalfa in 2019

处理 Treatment	生育期 Growth stages	起止日期 Beginning and ending dates	天数 Number of days//d	土壤蓄水量减少值 Reduction value of soil water storage//mm	降雨量 Rainfall mm	灌水量 Irrigation amount mm	耗水量 Water consumption amount//mm	耗水强度 Water consumption intensity//mm/d
T_1	返青期	06-05—06-18	13	13.0	2.0	15	30.0	2.31
	分枝期	06-18—07-04	16	3.5	45.6	15	64.1	4.01
	现蕾期	07-04—07-17	13	-14.2	45.8	15	46.6	3.58
	初花期	07-17—07-23	6	-17.5	35.6	14	32.1	5.35
T_2	返青期	06-05—06-18	13	11.0	2.0	18	31.0	2.38
	分枝期	06-18—07-04	16	5.5	45.6	18	69.1	4.32
	现蕾期	07-04—07-17	13	-11.2	45.8	18	52.6	4.05
	初花期	07-17—07-23	6	-21.5	35.6	16	30.1	5.02
T_3	返青期	06-05—06-18	13	9.0	2.0	21	32.0	2.46
	分枝期	06-18—07-04	16	6.5	45.6	21	73.1	4.57
	现蕾期	07-04—07-17	13	-13.2	45.8	21	53.6	4.12
	初花期	07-17—07-23	6	-24.5	35.6	18	29.1	4.85
T_4	返青期	06-05—06-18	13	7.0	2.0	25	34.0	2.62
	分枝期	06-18—07-04	16	3.5	45.6	25	74.1	4.63
	现蕾期	07-04—07-17	13	-15.2	45.8	25	55.6	4.28
	初花期	07-17—07-23	6	-25.5	35.6	20	30.1	5.02
T_5	返青期	06-05—06-18	13	5.0	2.0	28	35.0	2.69
	分枝期	06-18—07-04	16	2.5	45.6	28	76.1	4.76
	现蕾期	07-04—07-17	13	-17.2	45.8	28	56.6	4.35
	初花期	07-17—07-23	6	-30.5	35.6	22	27.1	4.52
T_6	返青期	06-05—06-18	13	3.0	2.0	31	36.0	2.77
	分枝期	06-18—07-04	16	5.5	45.6	31	82.1	5.13
	现蕾期	07-04—07-17	13	-19.0	45.8	31	57.8	4.45
	初花期	07-17—07-23	6	-32.5	35.6	24	27.1	4.52
T_7	返青期	06-05—06-18	13	5.0	2.0	25	32.0	2.46
	分枝期	06-18—07-04	16	4.5	45.6	25	75.1	4.69
	现蕾期	07-04—07-17	13	-17.2	45.8	25	53.6	4.12
	初花期	07-17—07-23	6	-28.5	35.6	20	27.1	4.52
T_8	返青期	06-05—06-18	13	2.0	2.0	25	29.0	2.23
	分枝期	06-18—07-04	16	5.5	45.6	25	76.1	4.76
	现蕾期	07-04—07-17	13	-17.2	45.8	25	53.6	4.12
	初花期	07-17—07-23	6	-33.5	35.6	20	22.1	3.68
T_9	返青期	06-05—06-18	13	4.0	2.0	25	31.0	2.38
	分枝期	06-18—07-04	16	5.5	45.6	25	76.1	4.76
	现蕾期	07-04—07-17	13	-18.2	45.8	25	52.6	4.05
	初花期	07-17—07-23	6	-28.5	35.6	20	27.1	4.52
T_{10}	返青期	06-05—06-18	13	7.0	2.0	25	34.0	2.62
	分枝期	06-18—07-04	16	6.5	45.6	25	77.1	4.82
	现蕾期	07-04—07-17	13	-15.2	45.8	25	55.6	4.28
	初花期	07-17—07-23	6	-27.5	35.6	20	28.1	4.68
T_{11}	返青期	06-05—06-18	13	6.0	2.0	25	33.0	2.54
	分枝期	06-18—07-04	16	3.5	45.6	25	74.1	4.63
	现蕾期	07-04—07-17	13	-16.2	45.8	25	54.6	4.20
	初花期	07-17—07-23	6	-27.5	35.6	20	28.1	4.68
T_{12}	返青期	06-05—06-18	13	8.0	2.0	25	35.0	2.69
	分枝期	06-18-07-04	16	2.5	45.6	25	73.1	4.57
	现蕾期	07-04—07-17	13	-14.2	45.8	25	56.6	4.35
	初花期	07-17—07-23	6	-28.5	35.6	20	27.1	4.52

表 6　2019 年紫花苜蓿第 3 茬次耗水量及耗水强度

Table 6　Water consumption and water consumption intensity for the third stubble of alfalfa in 2019

处理 Treatment	生育期 Growth stages	起止日期 Beginning and ending dates	天数 Number of days//d	土壤蓄水量减少值 Reduction value of soil water storage//mm	降雨量 Rainfall mm	灌水量 Irrigation amount mm	耗水量 Water consumption amount//mm	耗水强度 Water consumption intensity//mm/d
T_1	返青期	07-23—08-01	9	3.2	11.8	0	15.0	1.67
	分枝期	08-01—08-21	20	-4.0	46.0	19	61.0	3.05
	现蕾期	08-21—09-13	23	-9.0	54.8	19	64.8	2.82
	初花期	09-13—09-23	10	5.0	8.0	0	13.0	1.30
T_2	返青期	07-23—08-01	9	3.2	11.8	0	15.0	1.67
	分枝期	08-01—08-21	20	3.0	46.0	23	72.0	3.60
	现蕾期	08-21—09-13	23	-6.0	54.8	23	71.8	3.12
	初花期	09-13—09-23	10	6.0	8.0	0	14.0	1.40
T_3	返青期	07-23—08-01	9	9.2	11.8	0	21.0	2.33
	分枝期	08-01—08-21	20	-5.0	46.0	27	68.0	3.40
	现蕾期	08-21—09-13	23	-9.0	54.8	27	72.8	3.17
	初花期	09-13—09-23	10	5.0	8.0	0	13.0	1.30
T_4	返青期	07-23—08-01	9	19.2	11.8	0	31.0	3.44
	分枝期	08-01—08-21	20	-1.0	46.0	30	75.0	3.75
	现蕾期	08-21—09-13	23	-12.0	54.8	30	72.8	3.17
	初花期	09-13—09-23	10	8.0	8.0	0	16.0	1.60
T_5	返青期	07-23—08-01	9	27.2	11.8	0	39.0	4.33
	分枝期	08-01—08-21	20	-8.0	46.0	34	72.0	3.60
	现蕾期	08-21—09-13	23	-15.0	54.8	34	73.8	3.21
	初花期	09-13—09-23	10	8.0	8.0	0	16.0	1.60
T_6	返青期	07-23—08-01	9	30.0	11.8	0	41.8	4.64
	分枝期	08-01—08-21	20	-13.0	46.0	38	71.0	3.55
	现蕾期	08-21—09-13	23	-17.0	54.8	38	75.8	3.30
	初花期	09-13—09-23	10	8.0	8.0	0	16.0	1.60
T_7	返青期	07-23—08-01	9	23.2	11.8	0	35.0	3.89
	分枝期	08-01—08-21	20	-8.0	46.0	30	68.0	3.40
	现蕾期	08-21—09-13	23	-13.0	54.8	30	71.8	3.12
	初花期	09-13—09-23	10	8.0	8.0	0	16.0	1.60
T_8	返青期	07-23—08-01	9	24.2	11.8	0	36.0	4.00
	分枝期	08-01—08-21	20	-11.0	46.0	30	65.0	3.25
	现蕾期	08-21—09-13	23	-12.0	54.8	30	72.8	3.17
	初花期	09-13—09-23	10	8.0	8.0	0	16.0	1.60
T_9	返青期	07-23—08-01	9	24.2	11.8	0	36.0	4.00
	分枝期	08-01—08-21	20	-9.0	46.0	30	67.0	3.35
	现蕾期	08-21—09-13	23	-13.0	54.8	30	71.8	3.12
	初花期	09-13—09-23	10	8.0	8.0	0	16.0	1.60
T_10	返青期	07-23—08-01	9	15.2	11.8	0	27.0	3.00
	分枝期	08-01—08-21	20	-9.0	46.0	30	67.0	3.35
	现蕾期	08-21—09-13	23	-11.0	54.8	30	73.8	3.21
	初花期	09-13—09-23	10	8.0	8.0	0	16.0	1.60
T_{11}	返青期	07-23-08-01	9	22.2	11.8	0	34.0	3.78
	分枝期	08-01—08-21	20	-4.0	46.0	30	72.0	3.60
	现蕾期	08-21—09-13	23	-13.0	54.8	30	71.8	3.12
	初花期	09-13—09-23	10	8.0	8.0	0	16.0	1.60
T_{12}	返青期	07-23—08-01	9	18.2	11.8	0	30.0	3.33
	分枝期	08-01—08-21	20	-9.0	46.0	30	67.0	3.35
	现蕾期	08-21—09-13	23	-12.0	54.8	30	72.8	3.17
	初花期	09-13—09-23	10	8.0	8.0	0	16.0	1.60

2019 年不同处理苜蓿全生育期耗水量比较见图 4。由图 4 可知,各处理苜蓿全生育期耗水量从大到小依次为 T_6、T_5、T_{11}、T_{10}、T_8、T_4、T_9、T_7、T_{12}、T_3、T_2、T_1。各处理苜蓿在现蕾期和分枝期的耗水量显著大于其他生育阶段耗水量,说明该时段是苜蓿的需水关键期。2019 年各处理的苜蓿第 2 茬次平均耗水强度最大,第 3 茬次平均耗水强度次之,第 1 茬次平均耗水强度最小。

2.3　不同处理对固定喷灌苜蓿产量和水分利用效率的影响　根据不同处理苜蓿产量和作物水分利用效率,绘制图 5~6。由图 5 可知,不同处理紫花苜蓿干草产量从大到小依次为 T_{10}、T_5、T_4、T_6、T_{11}、T_9、T_3、T_8、T_2、T_7、T_1、T_{12},产量最高的是处理 T_{10}(灌溉定额 3 600 m^3/hm^2,施肥量 N 82.5 kg/hm^2、

P_2O_5 115.5 kg/hm²、K_2O 99 kg/hm²），苜蓿产量达到 14 925 kg/hm²，其次是处理 T_5、T_4 和 T_6，分别为 14 910、14 835 和 14 805 kg/hm²。由图 6 可知，不同处理苜蓿水分利用效率从大到小依次为 T_4、T_{10}、T_9、T_3、T_{11}、T_5、T_2、T_6、T_8、T_1、T_7、T_{12}，苜蓿水分利用效率最高的是处理 T_4（灌溉定额 3 600 m³/hm²，施肥量 N 75 kg/hm²、P_2O_5 105 kg/hm²、K_2O 90 kg/hm²），苜蓿水分利用效率达到 1.87 kg/m³；其次为处理 T_{10}，为 1.86 kg/m³，而处理 T_{12} 苜蓿水分利用效率仅为 0.91 kg/m³。

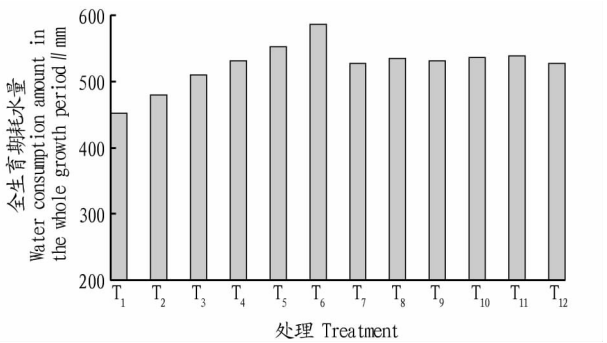

图 4 2019 年不同处理紫花苜蓿全生育期耗水量的比较

Fig. 4 Comparison of water consumption amount in the whole growth period of alfalfa in 2019 among different treatments

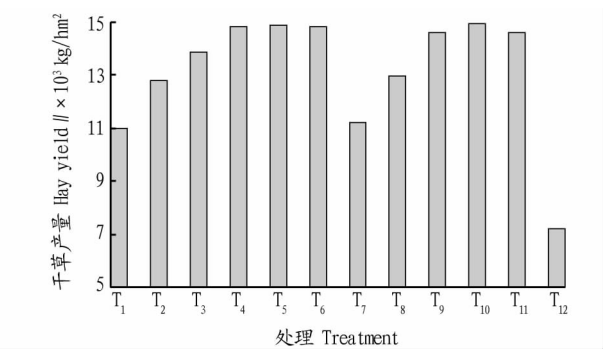

图 5 2019 年不同处理紫花苜蓿干草产量的比较

Fig. 5 Comparison of hay yield of alfalfa in the whole growth period in 2019 among different treatments

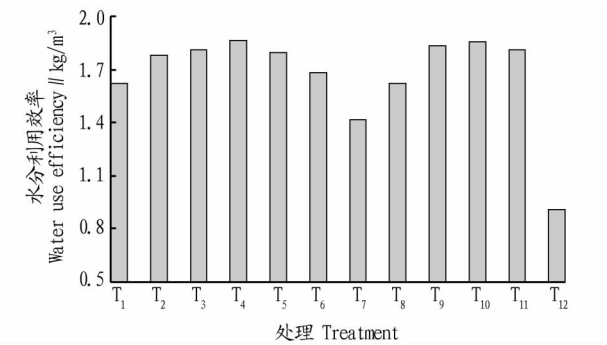

图 6 2019 年不同处理紫花苜蓿水分利用效率的比较

Fig. 6 Comparison of water use efficiency of alfalfa in the whole growth period in 2019 among different treatments

综上分析，各水肥处理下苜蓿产量和水分利用效率均较高的是处理 T_4（灌溉定额 3 600 m³/hm²，施肥量 N 75 kg/hm²、P_2O_5 105 kg/hm²、K_2O 90 kg/hm²）和 T_{10}（灌溉定额 3 600 m³/hm²，施肥量 N 82.5 kg/hm²、P_2O_5 115.5 kg/hm²、K_2O 99 kg/hm²），且二者无显著差异，由于处理 T_4 和 T_{10} 的灌水量相同，施肥量不同，推荐施肥量更小的处理 T_4 作为推荐的苜蓿喷灌水肥组合。

3 结论

（1）固定喷灌苜蓿每茬次株高从大到小依次为 T_{11}、T_{10}、T_6、T_5、T_7、T_4、T_9、T_8、T_3、T_2、T_1、T_{12}。

（2）各处理苜蓿全生育期耗水量从大到小依次为 T_6、T_5、T_{11}、T_{10}、T_8、T_4、T_9、T_7、T_{12}、T_3、T_2、T_1。各处理苜蓿在现蕾期和分枝期耗水量显著大于其他生育阶段耗水量。2019 年各处理紫花苜蓿第 2 茬次平均耗水强度最大，第 3 茬次平均耗水强度次之，第 1 茬次平均耗水强度最小。

（3）不同处理苜蓿干草产量从大到小依次为 T_{10}、T_5、T_4、T_6、T_{11}、T_9、T_3、T_8、T_2、T_7、T_1、T_{12}，产量最高的处理是处理 T_{10}，苜蓿产量达到 14 925 kg/hm²；不同处理苜蓿水分利用效率从大到小依次为 T_4、T_{10}、T_9、T_3、T_{11}、T_5、T_2、T_6、T_8、T_1、T_7、T_{12}，其中处理 T_4 和 T_{10} 处理苜蓿水分利用效率不存在显著差异。

（4）综合分析紫花苜蓿生长、水分、产量及水分生产效率等指标，得出宁夏干旱风沙草原区苜蓿固定喷灌水肥耦合灌溉制度为灌溉定额 3 600 m³/hm²，灌水次数为 9 次，施肥量 N 75 kg/hm²、P_2O_5 105 kg/hm²、K_2O 90 kg/hm²，具体水肥耦合灌溉制度见表 7。

表 7 宁夏干旱风沙草原区苜蓿固定喷灌水肥耦合灌溉制度

Table 7 Water and fertilizer coupling irrigation system of alfalfa with fixed spray irrigation in arid wind savanes of Ningxia

茬次 Stubble number	生育期 Growth stages	灌水定额 Irrigation quota m³/hm²	施肥量 Fertilizer amount//kg/hm²		
			N	P_2O_5	K_2O
第 1 茬 The first stubble	苗期（4 月上旬至中旬）	375	15.00	21.00	18.00
	分枝期（4 月下旬至 5 月中旬）	450	18.75	26.25	22.50
	现蕾期—开花期（5 月下旬至 6 月中旬）	450			
第 2 茬 The second stubble	苗期（6 月下旬至 7 月上旬）	375	22.50	31.50	27.00
	分枝期（7 月上旬至中旬）	375			
	现蕾期（7 月中旬至下旬）	375			
	开花期（7 月下旬至 8 月上旬）	300			
第 3 茬 The third stubble	苗期—分枝期（8 月上旬至下旬）	450	18.75	26.25	22.50
	现蕾期—开花期（9 月上旬至下旬）	450			
合计 Total		3 600	75.00	105.00	90.00

参考文献

[1] 吴文荣，丁培峰，忻龙祚，等. 我国节水灌溉技术的现状及发展趋势[J]. 节水灌溉，2008(4)：50-51，54.

[2] 陈广锋，杜森，江荣风，等. 我国水肥一体化技术应用及研究现状[J]. 中国农技推广，2013，29(5)：39-41.

（下转第 205 页）

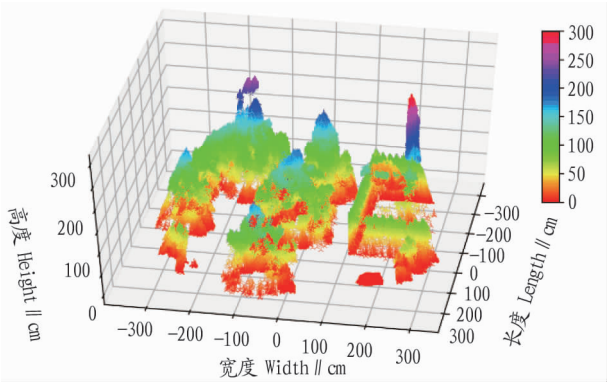

图 7　广西崇左植被三维群落结构

Fig. 7　Three-dimensional vegetation community structure diagram in Chongzuo, Guangxi

4　结论

针对植被生态自动化观测方法及仪器设计与实现，该研究明确了植被生态自动化的观测要素、观测方式和使用的传感器类型，解决了植被生态自动化观测方法不明确和不统一的问题。另外，基于植被生态自动化观测方法提出了仪器的设计与实现的流程与具体方法步骤，首先明确了仪器的系统组成，进而确定仪器的核心部件控制处理硬件的主要接口和功能，再进一步提出了控制处理器嵌入式软件在基于 ARM 架构 ubuntu 16.04 系统下 AI 运算的设计流程和主功能模块设计流程，解决了仪器的设计和实现问题。最后，通过仪器在国家级农业气象试验基地，针对不同的植被类型与人工进行平行观测，进行外场观测试验，结果表明采用的植被生态自动化观测方法是可行的、有效的，基于植被生态自动化观测方法研制的仪器性能指标是符合实际业务观测要求的。

参考文献

[1] 朱敬芳，邢白灵，居为民，等. 内蒙古草原植被覆盖度遥感估算[J]. 植物生态学报，2011，35(6)：615-622.
[2] 杨绘婷，徐涵秋. 基于遥感空间信息的武夷山国家级自然保护区植被覆盖度变化与生态质量评估[J]. 应用生态学报，2020，31(2)：533-542.
[3] 何斌，李青，刘勇. 黔西北地区不同演替阶段植物群落结构与物种多样性特征[J]. 广西植物，2019，39(8)：1029-1038.
[4] 张颖，李松，张文豪，等. 基于星载激光测高数据的植被冠层高度反演[J]. 应用光学，2020，41(4)：697-703.
[5] 王川，范景辉，林思美，等. 光学遥感植被指数与 SAR 遥感参数的相关性及其主要影响因素研究[J]. 国土资源遥感，2020，32(2)：130-137.
[6] 沙文生，魏淑花，牟高峰，等. 宁夏草地植被覆盖度动态变化监测[J]. 安徽农业科学，2020，48(23)：10-15，20.
[7] 孙玉芳，姜丽华，李刚，等. 外来植物入侵遥感监测预警研究进展[J]. 中国农业资源与区划，2016，37(8)：223-229.
[8] 中国林业科学研究院资源信息研究所. 一种森林物候信息自动观测方法：CN201710356448.0[P]. 2017-09-05.
[9] 杨玉泽，林文树. 基于激光点云数据的树木枝叶分割和三维重建[J]. 西北林学院学报，2020，35(3)：171-176.
[10] 河南中原光电测控技术有限公司. 一种农作物冠层高度的检测方法及装置：CN201611219819.2[P]. 2019-01-29.
[11] 国家卫星气象中心(国家空间天气监测预警中心). 冠层植被指数的反演方法、装置及服务器：CN201911426087.8[P]. 2020-05-19.
[12] 尹晓明. 基于 TensorFlow 深度学习机制的识别系统的实现及其移动端识别优化技术的研究[D]. 昆明：云南大学，2017：45-54.
[13] NICK TAUSANOVITCH. 人工智能 AI 需要的硬件技术分析[J]. 集成电路应用，2018，35(1)：30-32.
[14] 黎普涛，鞠训光，张德升，等. 卷积神经网络在植被识别中的应用研究[J]. 计算机科学与应用，2019，9(5)：841-848.

(上接第 200 页)

[3] 高鹏，简红忠，魏样，等. 水肥一体化技术的应用现状与发展前景[J]. 现代农业科技，2012(8)：250，257.
[4] 吴文奇，夏玉慧，张志芬，等. 地下滴灌技术在紫花苜蓿种植上的应用研究[J]. 节水灌溉，2009(4)：14-17.
[5] 郭彦芬，霍轶珍，王文达. 紫花苜蓿耗水规律及灌溉制度优化研究[J]. 节水灌溉，2017，25(3)：8-10，13.
[6] 裴学艳，宋乃平，王磊，等. 灌溉量和灌溉时期对紫花苜蓿耗水特性和产量的影响[J]. 节水灌溉，2010(1)：26-30.
[7] 张前兵，于磊，鲁为华，等. 优化灌溉制度提高苜蓿种植当年产量及品质[J]. 农业工程学报，2016，32(23)：116-122.
[8] 李新乐，穆怀彬，侯向阳，等. 水、磷对紫花苜蓿产量及水肥利用效率的影响[J]. 植物营养与肥料学报，2014，20(5)：1161-1167.
[9] 霍星，吕志远，范志东，等. 水肥耦合对毛乌素沙地紫花苜蓿生长与产量的影响[J]. 灌溉排水学报，2013，32(2)：111-115.
[10] 王琦，张恩和，龙瑞军，等. 不同灌溉方式对紫花苜蓿生长性能及水分利用效率的影响[J]. 草业科学，2006，23(9)：75-78.
[11] 李茂娜，王晓玉，杨小刚，等. 圆形喷灌机条件下水肥耦合对紫花苜蓿产量的影响[J]. 农业机械学报，2016，47(1)：133-140.