

不同灌溉施肥条件对紫花苜蓿株高、产量及肥料利用效率的影响

黄佳媛^{1,2}, 卢轩^{1,2}, 李天琦³, 赵力兴⁴, 高凯^{1,2*}

(1. 内蒙古民族大学, 内蒙古 通辽 028043; 2. 内蒙古民族大学饲用作物数字化栽培及高效利用重点实验室, 内蒙古 通辽 028043; 3. 甘肃农业大学草业学院, 草业生态系统教育部重点实验室, 甘肃省草业工程实验室, 中-美草地畜牧业可持续发展研究中心, 甘肃 兰州 730070; 4. 兴安盟

农牧科学研究所, 内蒙古 兴安盟 137400)

摘要:为探讨水肥耦合对科尔沁沙地紫花苜蓿人工草地产量和肥料利用效率的影响,根据联合国粮农组织推荐的Penman—Monteith方法,以日为步长计算紫花苜蓿实际需水量(ETc),基于ETc设置4个灌溉水平:60ET(60%ETc),80ET(80%ETc),100ET(100%ETc),120ET(120%ETc),研究不同灌溉量及施肥量对紫花苜蓿株高、产量及肥料利用效率的影响,为科尔沁沙地紫花苜蓿水肥管理提供依据。结果表明:第1、2茬地上生物量和总生物量的最大值均出现在80ET,显著高于其他灌水处理;在120ET灌水条件下,根冠比达到最大值,与80ET灌水处理无显著性差异;相同施肥量不同灌水量下,第2茬和第3茬株高均随着灌水量的增加逐渐增加,苜蓿第3茬株高最大,最大值出现在900 kg/hm²施肥处理,与450 kg/hm²施肥处理无显著性差异;肥料农学效率的最大值出现在80ET灌水和450 kg/hm²施肥水平下,显著高于相同灌水处理下的900 kg/hm²施肥处理,肥料偏生产力的最大值出现在80ET灌水和225 kg/hm²施肥水平下,显著高于相同灌水处理下的其他施肥处理。除900 kg/hm²施肥处理外,肥料农学效率和肥料贡献率随着灌水量的增加呈先升高后降低的变化趋势。

关键词:紫花苜蓿;水肥耦合;生长状况;肥料利用率;偏生产力

中图分类号:S541 **文献标志码:**A **文章编号:**1009-5500(2022)05-0046-08

DOI:10.13817/j.cnki.cycp.2022.05.006



紫花苜蓿(*Medicago sativa*)为多年生豆科(Leguminosae)牧草,有“牧草之王”的美誉。近年来,国家种植业结构调整,大力提倡退耕还林还草,苜蓿作为优质牧草之一,种植面积不断扩大,国内市场对苜蓿的需求与日俱增。到2020年我国养殖场消费优质商品苜蓿干草已达250万吨,其中国产干草占供应量的46%,进口干草占53.4%^[1]。我国仍然需要进口大量

优质苜蓿来解决市场需求^[2]。科尔沁地区响应国家政策,苜蓿种植、加工业得到快速发展,种植面积不断增加,投资力度不断扩大,机械化水平不断提高,是新兴的优质苜蓿生产基地^[3],享有“中国草都”之称。科尔沁沙地位于我国北方干旱半干旱地区,土质疏松,土壤贫瘠,养分含量低且流失严重,保水保肥能力较差,在实际生产中仍然存在苜蓿投资力度过大,产量及品质下降,水肥利用效率低的现象,所以水分和肥料的合理施用显得尤为重要^[4]。

灌水和施肥是影响牧草生长发育的两大必不可少的环境因素,水肥的高效利用是苜蓿高产稳产的关键,利用水肥间的协同作用进行合理的水肥管理是改善苜蓿生长发育和提高苜蓿草产量、品质的重要手段^[5]。大量研究表明合理的水肥管理能够促进苜蓿的生长发育,提高苜蓿的产量及品质。沙栢平等^[2]在宁

收稿日期:2021-06-25; **修回日期:**2021-09-29

基金项目:2022年度内蒙古自治区直属高校基本科研业务费项目(GXKY22052);内蒙古自治区自然科学基金项目(2021MS03085);国家自然科学基金(32260343)

作者简介:黄佳媛(1996-),女,内蒙古通辽人,硕士研究生。E-mail:1602447704@qq.com

*通信作者。E-mail:gaokai555@126.com

夏地区设置不同施肥及灌水处理,结果发现灌水和施肥对苜蓿生长具有显著影响,合理的水肥供应能显著提高紫花苜蓿的株高和生长速率,促进光合同化物的积累及产量的形成;胡优^[6]对紫花苜蓿进行水肥效应的研究发现,灌水处理对苜蓿产量的影响要大于施肥处理,在灌水量为4 500 m³/hm²时,有利于苜蓿种植当年干草产量的提高及营养物质的积累;研究表明在分枝期到现蕾期紫花苜蓿的植株高度与生长速率呈正相关,水分供应充足,苜蓿株高越高,产量也就越大^[7]。但在不同生育时期苜蓿的需水量及需水规律不同,水分供应根据苜蓿蒸腾速率及各地区的降雨量进行补给,过量的灌水会造成苜蓿减产;肥料为苜蓿的生长提供营养元素,参与苜蓿的生理功能及代谢过程,缺乏或过剩都会使苜蓿生理功能失调而造成减产^[8]。在干旱胁迫时水分成为影响苜蓿产量的限制因素,水分充足时苜蓿产量又受到肥料的制约,水分和肥料不是单独发挥作用,而是相互促进,相辅相成的。水分是肥料溶解、迁移的载体,而肥料只有溶解在水中才能在土壤中移动,运转,进而被植物吸收^[9]。本试验在前人研究的基础上,针对科尔沁沙地的特性,以科尔沁沙地紫花苜蓿为试验材料,对其进行灌水量和施肥量双因素随机区组设计,研究不同灌溉量、施肥量对科尔沁沙地紫花苜蓿产量、肥料利用效率的影响,探讨科尔沁沙地圆形喷灌机下人工种植紫花苜蓿草地适宜灌溉和施肥量,可为本地区建立高产节水的紫花苜蓿栽培技术提供依据,同时对促进草牧业发展及解决苜蓿的市场需求也具有重要的意义。

1 材料和方法

1.1 供试材料与试验地概况

试验地位于内蒙古自治区赤峰市阿鲁科尔沁旗邵根镇绿生源生态科技有限公司,地理坐标为E 120°

35',N 43°42',中温带半干旱大陆性季风气候区,年均气温 5.5 °C,年日照时数 2 760~3 030 h,年积温 2 900~3 400 °C,无霜期 95~140 d,年降水量 300~400 mm,主要集中在 6~8 月,年蒸发量 2 000~2 500 mm。沙壤土,0~100 cm 土层土壤容重为 1.45 g/cm³,田间持水量为 16.31%。试验地为 2017 年建植紫花苜蓿人工草地,品种为 WL298HQ,播种量为 45 kg/hm²,行距 15 cm。试验地土壤营养成分碱解氮含量 38.8 mg/kg,速效磷含量 2.1 mg/kg,速效钾含量 103 mg/kg,有机质含量 7.28 mg/kg,pH 值 7.26。

1.2 试验设计

试验采用灌水量、施肥量的二因素随机区组设计,具体如下:

灌溉量:60%ETc (Eapotranspiration, ETc)、80%ETc、100%ETc、120%ETc (60ET、80ET、100ET、120ET),

施肥量:0、225、450、675、900 kg/hm² (CK、F1、F2、F3、F4),分3次施入。

共20个小区,每个小区含5个重复,每个小区面积200 m²。

当W3处理0~60 cm土层含水量达到田间持水量的60%时W1、W2、W3、W4开始灌溉,灌溉量为相邻两次灌溉时期内累计ETc的60%、80%、100%和120%。ETc利用日平均风速、日最高气温、日最低气温、日最大相对湿度、日最小相对湿度、日降水量等气象因子,依照Penman-Monteith公式计算出参考作物蒸发量^[10];为判断土壤水分含量是否到达灌溉下限,在W3处理内埋设6组测定管,用来检测W3处理内不同位置土壤含水量,最终取6组数据的平均值,从而消除土壤空间变异性对灌水时间的影响,使用TRIME-TDR测量系统测定土壤含水量,每天测定1次,分别在距地表20、40、60 cm处测定。

表1 2018年试验期内气象数据

Table 1 Meteorological data during the test period in 2018

茬次	日最高气温/°C	日最低气温/°C	日最大相对湿度/%	日最小相对湿度/%	日平均风速/(m·s ⁻¹)	累计有效降雨量/mm
第1茬	24.04	8.61	52.43	16.60	4.06	15.50
第2茬	30.15	16.18	74.49	31.77	2.84	49.90
第3茬	32.05	20.58	87.80	44.63	2.53	131.50
平均	28.75	15.12	71.58	31.00	3.15	196.90

施肥时间为返青后(5月10日)、第1茬收获后(6月16日)、第2茬收获后(8月2日),每次施入总量的1/3,肥料为蓝磷315,总养分含量(N+P₂O₅+K₂O)≥45%,其中N:P:K=11:19:15,施肥方式模拟当地水肥一体化进行,将肥料充分溶解后均匀撒入小区内。

1.3 测定项目及方法

1.3.1 紫花苜蓿株高的测定 测产前,每个小区内随机选取10株,用卷尺测量其自然株高。

1.3.2 紫花苜蓿生物量及根冠比的测定 地上生物量的测定:每个小区内随机选取4个1 m×1 m的样方进行刈割,留茬高度5 cm,刈割后立即称取鲜重,烘干至恒重称取干重。

地下生物量:第3茬刈割后,在样方内随机选取25 cm×25 cm×25 cm的小样方进行取样,将样品带回实验室洗净,称取鲜重,烘干至恒重称取干重。

1.3.3 参数计算 根冠比=地下生物量/地上总生物量。

采用下面的公式计算肥料的相关参数^[11]

$$AE=(Y-Y_0)/F$$

式中:AE为肥料农学效率,Y为施肥区苜蓿产量,Y₀无肥区苜蓿产量(kg/hm²),F 施肥量(kg/hm²)。

$$PFP=Y/F$$

式中:PFP为肥料偏生产力,Y为施肥区苜蓿产量(kg/hm²),F为施肥量(kg/hm²)。

FCR:肥料贡献率=(施肥区产量-无肥区产量)/施肥区产量×100%。

1.3.4 数据分析 采用DPS 14.0软件和Excel对所测数据进行数据分析。

2 结果与分析

2.1 施肥和灌水对紫花苜蓿生物量及肥料利用效率的影响

灌水对苜蓿第2、3茬株高及肥料偏生产力具有极显著影响($P<0.01$),对苜蓿肥料贡献率具有显著影响($P<0.05$);施肥对苜蓿第1、2茬株高具有极显著影响($P<0.01$)(表2)。灌水和施肥对苜蓿第1、2茬株高、第3茬地上生物量、根冠比、地下生物量、总生物量、肥料农学效率、肥料偏生产力及肥料贡献率均具有极显著影响($P<0.01$)。

表2 施肥和灌水对紫花苜蓿生物量及肥料利用效率影响的方差分析

Table 2 Effects of fertilization and irrigation on biomass volume and fertilizer utilization efficiency of alfalfa

变异来源	株高						地上生物量					
	第1茬		第2茬		第3茬		第1茬		第2茬		第3茬	
	F值	P值	F值	P值	F值	P值	F值	P值	F值	P值	F值	P值
灌水	2.676	0.085	8.994	0.001	8.736	0.001	2.263	0.123	1.525	0.249	3.216	0.053
施肥	2.512	0.076	7.927	0.001	24.261	0.000	1.320	0.308	2.399	0.087	0.204	0.956
灌水×施肥	31.086	0.000	19.106	0.000	1.056	0.400	14.779	0.000	2.666	0.005	5.060	0.000
	根冠比		地下生物量		总生物量		肥料农学效率		肥料偏生产力		肥料贡献率	
变异来源	F值	p值	F值	p值	F值	p值	F值	p值	F值	p值	F值	p值
灌水	0.471	0.707	1.076	0.389	3.222	0.053	1.383	0.310	100.818	0.000	4.675	0.031
施肥	0.640	0.673	1.195	0.358	2.104	0.121	1.585	0.260	1.585	0.260	2.338	0.142
灌水×施肥	3.060	0.002	4.376	0.000	11.931	0.000	7.383	0.000	7.384	0.000	6.415	0.000

2.2 施肥和灌水对紫花苜蓿株高的影响

在60ET灌水F3施肥条件下第1茬株高达到最大值,为71.8 cm,在60ET灌水F3施肥条件下第2茬株高达到最大值,为79.32 cm,在60ET灌水F4施肥条件下第3茬株高达到最大值,为81.44 cm;相同灌溉量不同施肥处理条件下第2茬和第3茬株高均显著高于对照($P<0.05$),相同施肥量不同灌水条件下,第2茬和第3茬均随着灌水量的增加呈现逐渐增加的变化趋势;第1茬紫花苜蓿株高随着施肥和灌水量的变化呈

现不同的变化规律。在不同灌水和施肥条件下,苜蓿株高随着茬次的增加呈逐渐增加的变化趋势(表3)。

2.3 施肥和灌水对紫花苜蓿产量的影响

第1、2茬地上生物量和总生物量的最大值均出现在80ET灌水F2施肥条件下,分别为5 716.84、6 492.36和18 903.15 g,第3茬地上生物量和地下生物量的最大值均出现在120ET灌水F1施肥条件下,分别为4 637.75和4 464.00 g。在相同施肥不同灌水条件下,苜蓿第1茬地上生物量随着灌水量的增加呈

表3 不同施肥和灌水条件下的紫花苜蓿株高
Table 3 Alfalfa plant heights under fertilization and irrigation levels

		第1茬株高/cm	第2茬株高/cm	第3茬株高/cm
60ET	CK	56.57±3.16 ^{Ca}	63.21±1.87 ^{Cc}	64.90±2.69 ^{Cbc}
	F1	55.28±2.20 ^{Cb}	66.51±2.10 ^{Bc}	68.81±2.97 ^{BCb}
	F2	56.49±1.82 ^{Cc}	66.38±3.19 ^{Bc}	73.42±1.54 ^{ABa}
	F3	68.38±2.40 ^{Ab}	70.98±1.70 ^{Ac}	75.49±3.10 ^{Ab}
	F4	65.52±3.44 ^{Bb}	71.09±2.54 ^{Ac}	76.33±2.72 ^{Ab}
80ET	CK	56.70±3.52 ^{Ca}	66.25±1.75 ^{Ca}	66.16±3.01 ^{Bc}
	F1	59.61±1.54 ^{Ba}	70.67±1.17 ^{Bb}	75.70±2.38 ^{ABa}
	F2	63.49±3.82 ^{Aa}	74.24±2.59 ^{Ab}	77.20±1.55 ^{Aa}
	F3	63.53±3.60 ^{Ac}	73.95±1.65 ^{Ab}	80.37±3.70 ^{Aa}
	F4	50.20±2.60 ^{Dc}	75.39±1.24 ^{Ab}	79.29±1.99 ^{ABa}
100ET	CK	57.23±2.55 ^{CDa}	65.94±1.73 ^{Cab}	70.46±2.81 ^{Cab}
	F1	55.84±1.88 ^{Db}	74.68±1.60 ^{Aa}	75.92±1.46 ^{ABa}
	F2	60.65±2.06 ^{Bb}	77.25±3.30 ^{Aa}	75.89±2.96 ^{ABa}
	F3	59.36±1.36 ^{BCd}	71.33±0.52 ^{Bc}	78.47±2.30 ^{ABa}
	F4	67.70±2.43 ^{Ab}	77.94±1.67 ^{Aa}	80.25±3.11 ^{ABa}
120ET	CK	57.65±2.56 ^{Da}	64.40±1.89 ^{Dbc}	71.42±5.04 ^{Ca}
	F1	61.74±3.74 ^{Ca}	75.70±0.97 ^{Ba}	71.41±2.70 ^{Ca}
	F2	64.49±1.75 ^{Ba}	75.93±2.74 ^{Ba}	77.98±1.43 ^{ABa}
	F3	71.80±3.20 ^{Aa}	79.32±1.38 ^{Aa}	80.81±1.71 ^{Aa}
	F4	70.93±3.89 ^{Aa}	72.51±1.93 ^{Cc}	81.44±2.48 ^{Aa}

注:大写字母表示在相同灌水量不同肥料条件下0.05水平条件下差异显著;小写字母表示在相同施肥不同灌水条件下在0.05水平下差异显著,下同

现先升高后降低的变化趋势;除F4施肥水平,各施肥水平下苜蓿第2茬生物量的最大值均出现在80ET时;苜蓿第3茬地上生物量最大值均出现在120ET;地下生物量和总生物量表现出不同的变化趋势。在120ET灌水处理下,各施肥水平下的苜蓿地上、地下和总生物量均无显著性差异;在其他灌水处理下,苜蓿地上、地下和总生物量表现出不同的变化趋势。苜蓿3茬生物量中第2茬生物量大于第1茬生物量和第3茬生物量(表4)。

2.4 施肥和灌水对紫花苜蓿根冠比的影响

在120ET灌水F1施肥条件下苜蓿根冠比达到最大值,为0.345(图1)。在相同灌水不同施肥处理时,在60ET、80ET灌水条件下,苜蓿根冠比随着施肥量的增加呈现出先升高后降低再升高的变化趋势,100ET、120ET灌水条件下苜蓿根冠比随着施肥量的增加表现出不同的变化趋势;在相同施肥和不同灌水处理下,在F1、F2施肥水平下,苜蓿根冠比随着灌溉量的增加呈

现先降低再升高的变化趋势,F3、F4灌水条件下苜蓿根冠比随着灌水量的增加表现出不同的变化趋势。

2.5 施肥和灌水对紫花苜蓿的肥料利用效率的影响

肥料农学效率最大值出现在80ET灌水和F2施肥条件下,肥料偏生产力的最大值出现在80ET灌水和F1施肥条件下,肥料贡献率的最大值出现在100ET灌水和F4施肥条件下,值分别为7.15 kg/kg、60.08 kg/kg、23.48%(表5)。在相同灌水而不同施肥的条件下,120ET灌水下不同施肥对肥料农学效率和肥料贡献率没有显著性影响,而肥料偏生产力在各灌水处理下随着施肥量的升高而降低,在60ET灌水处理下肥料农学效率和肥料贡献率随着施肥量的增加呈逐渐升高的变化趋势;在相同施肥不同灌水条件下,除F4施肥处理外,肥料农学效率和肥料贡献率随着灌水量的增加呈先升高后降低的变化趋势,肥料偏生产力在F2和F4施肥处理下随着灌水量的增加呈先升高后降低的变化趋势。

表4 施肥和灌水对紫花苜蓿产量的影响

Table 4 Alfalfa yield under fertilization and irrigation conditions

kg·hm⁻²

		第1茬	第二茬	第三茬	地下生物量	总生物量
60ET	CK	3 061.71±258.00 ^{Bbc}	4 348.12±166.58 ^{Cc}	3 521.22±115.75 ^{Aa}	2 874.67±421.37 ^{ABa}	1 3805.71±409.77 ^{CDc}
	F1	1 770.94±306.43 ^{Cc}	5 159.13±422.63 ^{Ba}	2 912.31±354.60 ^{ABb}	3 200.00±365.79 ^{ABbc}	13 042.38±525.47 ^{Db}
	F2	1 841.21±100.02 ^{Cd}	6 235.05±703.69 ^{ABab}	3 111.94±51.33 ^{ABb}	3 189.33±444.43 ^{ABab}	14 377.53±386.73 ^{BCc}
	F3	1 841.21±100.02 ^{Aab}	4 756.63±669.48 ^{BCb}	3 278.85±240.79 ^{Aa}	2 512.00±331.27 ^{Bb}	15 120.56±800.55 ^{Bc}
	F4	1 841.21±100.02 ^{Aa}	5 440.95±324.55 ^{Ba}	2 977.26±222.40 ^{ABb}	3 669.33±282.11 ^{Aa}	16 962.81±661.43 ^{Aab}
80ET	CK	3 990.33±712.60 ^{Ca}	4 878.18±526.28 ^{Bbc}	3 064.66±775.45 ^{ABa}	2 858.67±125.53 ^{Ca}	14 791.83±435.02 ^{Cab}
	F1	4 843.34±583.59 ^{Ba}	5 454.53±286.32 ^{Ba}	3 220.21±298.33 ^{ABb}	3 733.33±509.55 ^{ABab}	17 251.41±900.34 ^{Ba}
	F2	5 716.84±326.58 ^{Aa}	6 492.36±80.55 ^{Aa}	2 939.28±65.76 ^{Bb}	3 754.67±417.71 ^{ABa}	18 903.15±569.37 ^{Aa}
	F3	5 145.14±371.64 ^{ABa}	6 227.22±355.07 ^{Aa}	3 100.19±213.64 ^{ABa}	3 184.00±138.26 ^{BCab}	17 656.55±286.50 ^{ABa}
	F4	5 158.98±472.67 ^{ABa}	5 402.39±86.04 ^{Ba}	3 231.45±346.87 ^{ABb}	4 048.00±483.90 ^{Aa}	17 840.82±802.98 ^{ABa}
100ET	CK	2 376.29±249.28 ^{Cc}	5 708.93±230.81 ^{Aa}	2 255.93±325.78 ^{Cb}	27 924.67±649.84 ^{BCa}	13 135.82±902.33 ^{Bbc}
	F1	2 880.23±430.10 ^{Cb}	5 116.60±134.40 ^{Aa}	2 942.97±328.14 ^{ABb}	2 469.33±71.95 ^{Cc}	13 409.12±119.96 ^{Bb}
	F2	4 846.66±39.03 ^{Ab}	5 646.14±246.80 ^{ABc}	3 004.31±491.05 ^{ABb}	2 618.67±419.74 ^{Cb}	13 409.12±119.96 ^{Ab}
	F3	3 652.69±242.86 ^{Bd}	5 210.48±291.54 ^{ABc}	3 397.56±292.77 ^{Aa}	3 920.00±577.78 ^{Aa}	16 180.72±439.72 ^{Abc}
	F4	4 565.39±236.10 ^{Aa}	5 766.83±387.28 ^{Aa}	3 235.92±239.83 ^{Ab}	3 509.33±471.81 ^{ABa}	17 077.49±1220.60 ^{ABab}
120ET	CK	3 511.85±369.87 ^{ABab}	5 380.88±281.59 ^{ABab}	3 623.25±202.95 ^{BCa}	2 666.67±271.95 ^{Da}	15 182.64±585.35 ^{Ba}
	F1	3 396.32±543.39 ^{Ab}	4 959.38±293.18 ^{Aa}	4 637.75±67.32 ^{Aa}	4 464.00±251.97 ^{Aa}	17 457.45±430.37 ^{Aa}
	F2	3 403.16±558.77 ^{Ac}	5 583.30±170.48 ^{ABc}	3 991.03±402.04 ^{Ba}	3 733.33±444.43 ^{ABCa}	16 710.82±394.10 ^{Ab}
	F3	4 028.40±298.67 ^{Abc}	4 861.18±222.28 ^{Ab}	3 678.71±431.01 ^{BCa}	3 898.67±426.20 ^{ABa}	16 466.95±486.31 ^{ABb}
	F4	3 218.60±93.04 ^{Ab}	5 667.37±139.74 ^{Aa}	3 866.26±247.40 ^{Ba}	3 578.67±146.84 ^{BCa}	16 330.89±270.32 ^{ABb}

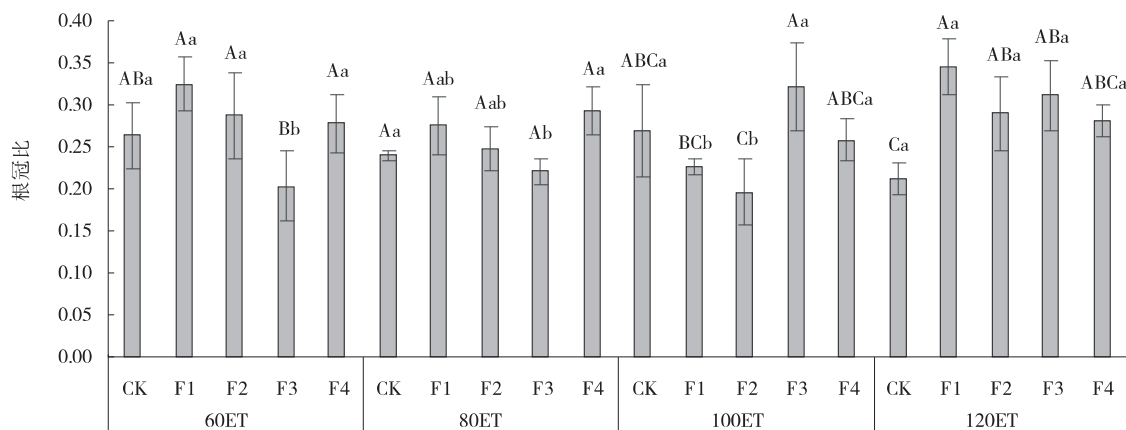


图1 不同施肥和灌水条件下的根冠比

Fig. 1 Alfalfa plant ratio of root to shoot under irrigation and fertilization

注:大写字母表示在相同灌水量不同水肥条件下0.05水平条件下差异显著;小写字母表示在相同施肥不同灌水条件下在0.05水平下差异显著,下同

3 讨论

水分是植物生长发育过程中重要的环境因素,是土壤养分与植物根系联系的媒介,作物的产量更是与土壤水分密切相关,肥料只有溶于水中才能在土壤中迁移,最后被植物根系吸收^[12],而肥料中的矿质元素也能促进植物对水肥的利用,提高水分的利用效

率^[13]。生物量是体现植物生长状况和生产力的关键因素,是产量形成的基础。赵金梅等^[14]和霍海丽等^[15]的研究表明水分可以促进作物增产,苜蓿的产量和品质随灌水量的增加而增加。也有研究表明灌水较多,间隔时间过长不利于苜蓿生长,会造成苜蓿矮小,产量下降,水分利用效率低,水资源浪费严重^[16]。董国锋等^[17]和寇丹等^[18]研究表明适量的水分亏缺不总是

表 5 施肥和灌水对紫花苜蓿肥料利用效率的影响

Table 5 The effects of fertilization and irrigation on the fertilizer utilization efficiency of alfalfa

		肥料农学效率/ (kg·kg ⁻¹)	肥料偏生产力 (kg·kg ⁻¹)	肥料贡献率/%
60ET	F1	-4.84±0.81 ^{Bc}	43.74±0.81 ^{Ac}	-11.10±2.04 ^{Cb}
	F2	0.57±1.28 ^{Ab}	24.86±1.28 ^{Bc}	2.05±0.88 ^{Bb}
	F3	2.49±1.61 ^{Ab}	18.68±1.61 ^{Cb}	12.64±7.65 ^{Aa}
	F4	2.62±0.88 ^{Ab}	14.77±0.88 ^{Da}	17.48±4.92 ^{Ab}
80ET	F1	7.04±2.54 ^{Aa}	60.08±2.54 ^{Aa}	11.56±3.79 ^{Ba}
	F2	7.15±0.61 ^{Aa}	33.66±0.61 ^{Ba}	21.20±1.41 ^{Aa}
	F3	3.76±0.59 ^{Ba}	21.44±0.59 ^{Ca}	17.48±2.31 ^{Ba}
	F4	2.07±0.37 ^{Bab}	15.33±0.37 ^{Da}	13.43±2.09 ^{Bb}
100ET	F1	2.66±0.77 ^{Bb}	48.62±0.77 ^{Ab}	5.45±1.51 ^{Ba}
	F2	7.01±1.58 ^{Aa}	29.99±1.58 ^{Bb}	23.18±3.90 ^{Aa}
	F3	2.84±0.34 ^{Ba}	18.16±0.34 ^{Cb}	15.63±1.56 ^{Aa}
	F4	3.59±0.93 ^{Ba}	15.08±0.93 ^{Da}	23.48±4.90 ^{Aa}
120ET	F1	2.12±2.84 ^{Ab}	57.75±2.84 ^{Aa}	3.45±4.66 ^{Aa}
	F2	1.03±1.37 ^{Ab}	28.84±1.37 ^{Bb}	3.34±4.66 ^{Ab}
	F3	0.08±0.74 ^{Ab}	18.62±0.74 ^{Cb}	0.26±0.05 ^{Ab}
	F4	0.26±0.44 ^{Ab}	14.17±0.44 ^{Da}	1.76±0.09 ^{Ac}

造成作物减产,在作物生长的一定生育时期,适度的缺水会使作物在节水的同时获得高产;孟兆江等^[19]的研究表明玉米(*Zea mays*)调亏灌溉可以达到玉米高产的目的,同时还可以避免水资源的浪费。本研究发现在相同施肥量的情况下,苜蓿第1茬和第2茬地上生物量的最大值均出现在80ET时,显著高于其他灌水处理,说明适度的水分不足不会使苜蓿产量下降,反而会刺激苜蓿自身的调节机制和补偿功能,促进光合同化物的积累,与正常灌溉下的苜蓿产量无显著性差异,这与前人^[20]的研究较为一致。此外生长期内收获3茬苜蓿,生物量的大小关系为第2茬地上生物量>第1茬地上生物量>第3茬地上生物量,这可能是由于第2茬草生长阶段北方地区降雨量增多,且第2茬时的温湿度使得苜蓿快速生长,所以第2茬生物量最大,第1茬和第3茬生长阶段降雨量较少,苜蓿的水分来源主要靠灌溉获取,且返青后气温较低,抑制了杂草的生长,充足的营养物质供应给苜蓿,使其生长发育较快,因此第1茬生物量要高于第3茬生物量^[21];还可能是因为苜蓿第1、2茬生长期内灌水较多,第3茬生长期内的灌水较少导致第1、2茬生物量高于第3茬生物量,水分可以提高土壤养分的矿化及有效性,促进苜蓿根系对水分及养分的吸收和利用,而养分能够加快

苜蓿光合作用同化物积累,提高水分利用效率,这与马彦麟等^[22]的研究结果一致。

肥料中含有作物所需要的矿质元素,它们参与作物的光合作用和代谢过程,也是植物体多种化合物及辅酶的组成成分,是作物达到高产的限制性因素^[23]。但也有研究显示不合理的施肥不仅不会促进作物的高产稳产,还会降低肥料的利用效率,造成环境的污染及资源的浪费^[24]。肥料利用率是评价养分管理的重要指标,而近年来由于有机和无机肥料的增施,土壤及环境中的养分增加,肥料利用率低下,肥料偏生产率逐渐成为评价的指标^[11,25]。肥料偏生产力指在一定范围内生产单位农作物所需要施入的化肥数量,对施肥的宏观决策有一定的指导意义,而肥料农学效率是评价肥料增产效益较为准确的指标^[26]。胡伟等^[27]的研究表明,一定程度的灌水量和施肥量可以提高紫花苜蓿的氮肥农学效率和偏生产力。张冠初等^[28]发现适量地减施氮肥再配施钙肥能够增加植株的净光合速率、产量和肥料贡献率。本研究发现肥料的农学效率和肥料贡献率120ET高灌水处理下,随着施肥量的增加没有显著性差异,但显著低于80ET低灌水处理,且肥料的农学效率在80ET灌水条件下达到峰值;肥料偏生产力在F2和F4施肥处理下随着灌水量的增

加呈先升高后降低的变化趋势,进一步解释了降雨或灌水过多会造成土壤养分的淋溶损失,肥料供应不足,植物生长缓慢,降低肥料的利用效率^[29]。

4 结论

在科尔沁沙地适量的灌水和施肥能显著提高紫花苜蓿的株高、地上生物量、根冠比,灌水和施肥均会影响苜蓿的生物量和肥料利用效率,在高灌水处理下随着施肥量的增加,苜蓿产量和肥料利用效率较低灌水处理低,在80ET灌水量、450 kg/hm²施肥量下苜蓿第1,2茬生物量达最大值,分别为5 717 g/m²、6 492 g/m²;3茬苜蓿中第3茬株高最大,最大值出现在900 kg/hm²施肥条件下,与450 kg/hm²施肥处理无显著差异;在80ET灌水450 kg/hm²施肥处理下肥料农学效率达到最大值,且显著高于60ET和120ET灌水处理。从节水和可持续发展角度出发,科尔沁地区最佳灌水量和施肥量是80ET和450 kg/hm²。

参考文献:

- [1] 孙浩,张玉霞,梁庆伟,等. 施肥对科尔沁沙地苜蓿产量与品质的影响[J]. 草原与草坪,2020,40(3):30-41.
- [2] 沙栢平,谢应忠,高雪芹,等. 地下滴灌水肥耦合对紫花苜蓿草产量及品质的影响[J]. 草业学报,2021,30(2):102-114.
- [3] 孙浩,张玉霞,梁庆伟,等. 施肥对科尔沁沙地苜蓿产量与品质的影响[J]. 草原与草坪,2020,40(3):30-41.
- [4] 赵力兴,高阳,李天琦,等. 施肥对科尔沁沙地苜蓿生长及产草量的影响[J]. 中国农业科技导报,2019,21(7):136-144.
- [5] 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[J]. 草业学报,2020,29(5):98-108.
- [6] 胡优. 宁夏苜蓿地下滴灌水肥效应与喷灌土壤养分水分空间变异规律研究[D]. 银川:宁夏大学,2017.
- [7] 张庆霞,宋乃平,陈林,等. 不同灌溉量对紫花苜蓿生长特性及生物量的影响[J]. 水土保持通报,2009,29(2):150-154.
- [8] 文霞. 水肥对紫花苜蓿生产性能和品质的影响研究[D]. 兰州:兰州大学,2010.
- [9] 李天琦,赵力兴,林志玲,等. 灌溉量对科尔沁沙地紫花苜蓿产量和水分利用效率的影响[J]. 中国草地学报,2020,42(2):117-123.
- [10] Richard G. Allen, Luis S. Pereira. Crop Evapotranspiration, Guidelines for crop water requirements [M]. FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56, 1998.
- [11] 王寅,冯国忠,焉莉,等. 吉林省玉米施肥效果与肥料利用效率现状研究[J]. 植物营养与肥料学报,2016,22(6):1441-1448.
- [12] 张晓琳,翟鹏辉,赵祥,等. 增水和施肥对苜蓿-小麦轮作系统冬小麦生物量的影响[J]. 草地学报,2020,28(3):828-834.
- [13] 毕舒怡,曹婧,李跃,等. 不同水肥组合对苜蓿品质的影响[J]. 草地学报,2018,26(1):105-113.
- [14] 赵金梅,周禾,郭继承,等. 灌溉对紫花苜蓿生产性能的影响[J]. 草原与草坪,2007(1):38-41.
- [15] 霍海丽,王琦,张恩和,等. 灌溉和施磷对紫花苜蓿干草产量及营养成分的影响[J]. 水土保持研究,2014,21(1):117-121+126.
- [16] 王田涛,师尚礼,张恩和,等. 灌溉与施氮对紫花苜蓿干草产量及水分利用效率的影响[J]. 生态学杂志,2010,29(7):1301-1306.
- [17] 董国锋,成自勇,张自和,等. 调亏灌溉对苜蓿水分利用效率和品质的影响[J]. 农业工程学报,2006,22(5):201-203.
- [18] 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.
- [19] 孟兆江,刘安能,庞鸿宾,等. 夏玉米调亏灌溉的生理机制与指标研究[J]. 农业工程学报,1998,14(4):94-98.
- [20] 张树振,麦麦提敏·乃依木,陈述明,等. 地下调亏滴灌对紫花苜蓿生长和产量的影响[J]. 节水灌溉,2019(9):33-35+39.
- [21] 朱铁霞,邓波,王显国,等. 灌水量对科尔沁沙地苜蓿草产量、土壤含水量及二者相关性的影响[J]. 中国草地学报,2017,39(4):36-40.
- [22] 马彦麟,齐广平,汪精海,等. 西北荒漠灌区紫花苜蓿产量和营养品质对水肥调控的响应[J]. 甘肃农业大学学报,2018,53(6):171-179+186.
- [23] 赵建华,樊廷录,王淑英,等. 施氮与灌水对河西制种玉米产量及水氮利用效率的影响[J]. 核农学报,2016,30(5):997-1004.
- [24] 刘艳,孙文涛,邢月华,等. 长期施肥对春玉米耕层土壤养分和肥料贡献率的影响[J]. 华北农学报,2020,35(1):106-113.
- [25] 于飞,施卫明. 近10年中国大陆主要粮食作物氮肥利用率分析[J]. 土壤学报,2015,52(6):1311-1324.

- [26] 吴立峰,张富仓,周罕觅,等. 不同滴灌施肥水平对北疆棉花水分利用率和产量的影响[J]. 农业工程学报, 2014,30(20):137-146.
- [27] 胡伟,张亚红,李鹏,等. 水氮供应对地下滴灌紫花苜蓿生产性能及水氮利用效率的影响[J]. 草业学报,2019, 28(2):41-50.
- [28] 张冠初,戴良香,徐扬,等. 减氮配施钙肥对花生光合特性、产量及肥料贡献率的影响[J]. 中国油料作物学报, 2020,42(6):1010-1018.
- [29] 冯萌,于成,林丽果,等. 灌溉和施氮对河西走廊紫花苜蓿生物量分配与水分利用效率的影响[J]. 中国生态农业学报,2016,24(12):1623-1632.

Effect of different irrigation and fertilization conditions on alfalfa plant height,yield and fertilizer utilization efficiency

HUANG Jia-yuan^{1,2}, LU Xuan^{1,2}, LI Tian-qi³, ZHAO Li-xing⁴, GAO Kai^{1,2*},

(1. Inner Mongolia University for Nationalities, Tongliao 028043, China; 2. Key Laboratory of Digital Cultivation and Efficient Utilization of Feeding Crops at Inner Mongolia Minzu University, Tongliao 028043, China; 3. College of Pratacultural Science, Gansu Agricultural University, Key Laboratory for Grassland Ecosystem of Ministry of Education, Pratacultural Engineering Laboratory of Gansu Province, Sino-U. S. Centers for Grazingland Ecosystem Sustainability, Lanzhou 730070, China; 4. Xing'an League Institute of agriculture and animal husbandry, Xing'an League 137400, China))

Abstract: This research evaluated the effects of water and fertilizer regimes on alfalfa plant height, grass yield and fertilizer utilization efficiency in Horqin sandy land. According to the Penman-Monteith method recommended by the FAO, the actual water demand (ET_c) of alfalfa was calculated on a daily base. To provide the basis for alfalfa water and fertilizer management in Horqin sandy land, the effects of different irrigation amount and fertilization on alfalfa height, yield and fertilizer use efficiency in Horqin sandy land were measured using four irrigation levels: 60ET (60% ET_c), 80ET (80% ET_c), 100ET (100% ET_c), 120ET (120% ET_c). The results showed that the maximum values of the above-ground biomass and total biomass on the first and second c Under the 120ET irrigation conditions, the root/shoot ratio reached the maximum, but was not significantly different from 80ET irrigation treatment. Regardless irrigation and the same fertilization conditions the plant height of the second and third crops increased steadily with the increase of the amount of irrigation. The third crop of alfalfa achieved the highest height with the maximum value in 900 kg/hm², but was not significantly different from 450 kg/hm² fertilization treatment. The maximum values of fertilizer agricultural efficiency under the 80ET irrigation and 450 kg/hm² fertilization conditions, significantly higher than 900 kg/hm² fertilization treatment under the same irrigation treatment, and the maximum value of fertilizer partial productivity under the 80ET irrigation and 225 kg/hm² fertilization conditions, significantly higher than other fertilization treatments under the same irrigation treatment. Except for 900 kg/hm² fertilization treatment, the fertilizer agricultural efficiency and fertilizer contribution rate increased first and second decrease with the increase of irrigation water volume. Considering the yield and fertilizer utilization efficiency, the optimum irrigation and fertilization amount in Horqin area should be 80ET and 150 kg/hm².

Key words: alfalfa; water and fertilizer coupling; growth status; fertilizer utilization; partial productivity