

DOI: 10.5846/stxb201312022858

王海青, 田育红, 黄薇霖, 肖随丽. 不同灌溉量对内蒙古人工草地主要牧草产量和水分利用效率的影响. 生态学报, 2015, 35(10): 3225-3232.

Wang H Q, Tian Y H, Huang W L, Xiao S L. Analyzing the impact of irrigation quantity on biomass and water use efficiency of main grasses in artificial grassland in Inner Mongolia. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(10): 3225-3232.

## 不同灌溉量对内蒙古人工草地主要牧草产量和水分利用效率的影响

王海青<sup>1</sup>, 田育红<sup>1,\*</sup>, 黄薇霖<sup>1</sup>, 肖随丽<sup>2</sup>

1 北京师范大学地表过程与资源生态国家重点实验室, 北京师范大学资源学院, 北京 100875

2 环境保护部环境保护对外合作中心, 北京 100035

**摘要:**人工草地建设是缓解内蒙古地区草地生存压力的必要途径,而水分短缺是该区人工草地建设中牧草生长的主要限制因素,适量的人工补水以实现牧草的高产节水是解决这一问题的关键。以当地主要牧草冰草和紫花苜蓿为研究对象,开展单播和混播条件下不同灌溉量对牧草产量、光合性能和水分利用效率影响的对比试验。研究结果表明:(1)豆禾混播有利于提高冰草和紫花苜蓿的产量;(2)8月初现蕾期是冰草和紫花苜蓿收割的最佳季节,此时牧草产量最高;(3)灌溉量达到田间持水量的45%(包含降雨量在内的单位面积灌溉量在7月初达到903.8 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>,在8月初达到1812.4 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>)是牧草高产节水的最佳补水选择;(4)6—8月水分胁迫更有利于提高牧草的长期水分利用效率(long-term water use efficiency, WUEL),开花期后补水对提高牧草 WUEL 的作用开始显著;(5)在牧草产量最高的8月初水分胁迫更有利于提高牧草的瞬时水分利用效率(instantaneous water use efficiency, WUEI),而在7月初光照强烈、水分蒸发量大时,较多地补水更有利于提高牧草的 WUEI。

**关键词:**人工草地;产量;光合速率;水分利用效率;灌溉量

## Analyzing the impact of irrigation quantity on biomass and water use efficiency of main grasses in artificial grassland in Inner Mongolia

WANG Haiqing<sup>1</sup>, TIAN Yuhong<sup>1,\*</sup>, HUANG Weilin<sup>1</sup>, XIAO Suili<sup>2</sup>

1 State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology, College of Resources Science and Technology, Beijing Normal University, Beijing 100875, China

2 Foreign Economic Cooperation Office, Ministry of Environmental Protection, Beijing 100035, China

**Abstract:** The construction of artificial grassland is the necessary way to alleviate pressures on the grassland in Inner Mongolia. Water shortage is the major limiting factor for grass growth in artificial grassland in this region. Suitable irrigation quantity is the key to solve the problem of water shortage by both increasing grass yield and saving water. In this study, we selected two local typical grasses *Agropyron cristatum* and *Medicago sativa*L and conducted irrigation experiments with single sowing and mixture sowing of the two. Then comparative analyses were explored on biomass, photosynthesis and water use efficiency of the two grasses under different irrigation schemes. The results show that: (1) The mixture sowing of leguminous herbage and gramineous herbage is helpful to enhance the yields of the two plants.; (2) Squaring period in the early August is the best season for the harvesting of *Agropyron cristatum* and *Medicago sativa*L, when the yields of the grasses are the highest; (3) Treatment 3, of which the irrigation quantity is up to 45% of the field capacity, the amount of water recharge per unit (including precipitation and irrigation) is 903.8 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup> in early July and 1812.4 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup> in early

基金项目:国家重点基础研究发展计划(973计划)课题(2014CB138803);国家“十二五”科技支撑项目课题(2011BAC07B01)

收稿日期:2013-12-02; 网络出版日期:2014-08-13

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: tianyuhong@bnu.edu.cn

August, is the best water treatment choice for both grass yields increase and water-saving; (4) Rain-fed condition or irrigating a little water (treatment 3) is effective to increase long-term water use efficiency (WUEL) of the grasses from June to August. Irrigating more water (treatments 1 and 2) started to affect WUEL only after entering the flowering stage of the grasses; (5) Rain-fed condition or irrigating a little water is effective to increase grass leaf instantaneous water use efficiency (WUEI) in early August. However, because of intensive sunlight, water evaporation is high and it is more effective to increase WUEI by irrigating more water in early July.

**Key Words:** artificial grassland; yield; photosynthesis; water use efficiency; irrigation quantity

水分短缺是干旱半干旱区人工草地建设中牧草生长的关键制约因素。在所有的非生物胁迫中,干旱对牧草造成的损失占首位,仅次于生物胁迫中病虫害造成的损失<sup>[1]</sup>。由于内蒙古草原区降水量少,水资源短缺,对人工草地选择适当的补水方案进而提高牧草的产量和水分利用效率至关重要。生物量和光合生理特征是牧草产量分析的常用指标。其中光合作用是植物生产力构成的最主要因素。牧草净光合速率在一天中的动态变化和出现峰值的高低是叶片光合能力与环境条件综合作用的结果<sup>[2]</sup>,对其进行研究是分析环境因素影响植物生长和代谢的重要手段。

维持人工草地高产的关键性措施是灌溉,研究灌溉量对人工草地产量、光合性能和水分利用效率影响的较少。孙洪仁等<sup>[3]</sup>通过研究发现不同灌溉量之间紫花苜蓿的水分利用效率及耗水系数差异不显著。同时多数有关补水灌溉对植物产量和光合性能影响的研究选择的对象侧重于农作物如马铃薯<sup>[4]</sup>、小麦<sup>[5]</sup>、水稻<sup>[6]</sup>等,而其他相关研究主要针对灌溉方式(沟灌、隔沟灌、畦灌、漫灌)对牧草生物量和水分利用效率的影响<sup>[7]</sup>、水分胁迫下牧草水分利用效率的变化<sup>[8]</sup>、不同种植时期牧草水分利用效率和耗水系数的差异<sup>[9]</sup>、不同品种和不同茬次之间耗水系数和水分利用效率的差异<sup>[10]</sup>等。但这些研究均未得出人工草地主要牧草高产节水的最佳补水量和补水时期。

为获取内蒙古人工草地主要牧草冰草和紫花苜蓿高产节水的最佳补水量和补水时期,本研究开展不同补水条件下两种牧草的单播以及混播情况下的产量、光合速率、瞬时(叶片、个体尺度)水分利用效率(WUEI)和长期(种群、群落尺度)水分利用效率(WUEL)的对比试验,探讨最佳补水方案,以期为缓解当地水资源短缺的压力及为人工草地的可持续发展提供依据。

## 1 研究区概况

研究区位于内蒙古锡林浩特市东部的内蒙古大学毛登牧场生态学实验基地。该区属于中温带半干旱大陆性季风气候,冬季受蒙古高压控制,寒冷干燥;夏季受季风影响,温暖湿润。年平均气温 1.7 °C,年平均降水量 300 mm,集中在 6—9 月,年日照时间 2877 h,平均风速 3.5 m/s<sup>[11]</sup>。该区以栗钙土为主,温性典型草原是主要的草地植被类型,建群种为大针茅和羊草,群落优势植物有冰草与糙隐子草,常见种还有冷蒿、葱类植物等<sup>[12]</sup>。

## 2 试验设计

本研究试验地块于 2012 年 5 月中旬开地,6 月 9 日播种,采取冰草单播、紫花苜蓿单播和冰草+紫花苜蓿混播三种播种方式,全年进行锄草维护。补水处理在牧草生长的第二年进行,对每种播种方式均进行 4 种处理,各 3 个重复,共 48 个地块。补水设计主要基于样地的田间持水量(为 27.29%),涉及 4 个补水梯度,均不搭配人工遮雨棚。补水处理一按照田间持水量的 85%计;补水处理二按照田间持水量的 65%计;补水处理三按照田间持水量的 45%计;处理四为雨养对照。浇水时间选择牧草的 3 个生长关键期:返青期(5 月中旬)、分蘖期(6 月下旬)和抽穗期(7 月下旬)。其中为保证牧草生长旺盛,返青期统一浇充足水,浇水量为田间持水量的 85%。此后两个时期的浇水则按补水梯度浇灌,补水量见表 1。

试验观测在生长期的 5 月 17 日(返青期)、6 月 4 日(分蘖期)、7 月 1 日(抽穗期)、8 月 9 日(现蕾期)和 9 月 9 日(初花期)5 个时间点进行,主要观测地上生物量和土壤含水量,重复 3 次,调查时补水总量(从年初牧草开始生长算起的降雨量+补水量)见表 1。同时利用 Li-6400 便携式光合系统测定仪测定牧草一天中的各项光合性能指标,包括光合速率( $P_n, \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ )、蒸腾速率( $T_r, \text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ )等,测定时间为 6:00—18:00,每隔 2h 测定一次,每个处理测定 3 个叶片作为重复,每个叶片记录 2 次稳定的数据,并依据公式  $\text{WUEI} = P_n / T_r$  计算牧草 WUEI。牧草 WUEI 利用下列计算公式<sup>[4]</sup>表示:

$$\text{WUEI} = W_{\text{干物质}} / ET$$

式中, $W_{\text{干物质}}$ 是牧草在某一生长期单位面积的干物质重( $\text{kg}/\text{hm}^2$ ), $ET$ 为牧草在某一生长期的蒸散发( $\text{mm}$ ),其值由下列公式得出:

$$ET = P + I \pm vS$$

式中, $P$ 是某一时期的降雨量( $\text{mm}$ ); $I$ 为某一时期的补水量( $\text{mm}$ ); $vS$ 是该时期后期和初期土壤剖面水分含量( $\text{mm}$ )之差,当后期土壤剖面水分含量高于前期时取-,反之取+。

表 1 各时期补水量及调查时总补水量

Table 1 Irrigation amount of different phases and gross irrigation amount

补水时间 Irrigation Time	补水方案 Irrigation Scheme	补水量 Irrigation Amount/ ( $\text{m}^3/\text{hm}^2$ )	调查时间 Survey Time	降雨量 Precipitation/ $\text{mm}$	调查时总补水量 Gross Irrigation amount/( $\text{m}^3/\text{hm}^2$ )
2013-05-18	补水处理一	142.9	2013-06-04	13.21	275
返青期	补水处理二	142.9	分蘖期	13.21	275
	补水处理三	142.9		13.21	275
	雨养处理	142.9		13.21	275
2013-06-23	补水处理一	528.5	2013-07-01	59.18	1263.2
分蘖期	补水处理二	298.9	抽穗期	59.18	1033.6
	补水处理三	169.1		59.18	903.8
	雨养处理	0		59.18	734.7
2013-07-28	补水处理一	324	2013-08-09	135.89	2354.3
抽穗期	补水处理二	232.7	现蕾期	135.89	2033.4
	补水处理三	141.5		135.89	1812.4
	雨养处理	0		135.89	1501.8

### 3 研究结果

#### 3.1 不同补水处理对牧草产量的影响

##### 3.1.1 不同补水处理下牧草产量动态变化

图 1 显示了不同补水处理下不同时期各牧草的生物量。从图 1 可以看出,返青期浇水后,牧草的生物量差异均不明显,因此,后期的生物量可作为补水处理影响牧草产量的依据。无论是单播还是混播,冰草和紫花苜蓿的生物量均在 8 月份达到最大,且补水处理三在生物量最高时对牧草产量的影响均最大。进入 9 月份之后,各处理下牧草的产量均有下降。牧草的生长季节十分短暂,抓住关键生长期进行补水是十分必要的。同时,建议在 8 月初对牧草进行收割,此时无论冰草和紫花苜蓿是单播还是混播,产量都是最高的。

##### 3.1.2 不同补水处理对各时期牧草产量增量的影响

图 2 显示了不同补水处理下不同时期牧草的生物量增量。从图 2 可以看出,对于单播冰草而言,无论哪种补水处理,生物量增长最快的都在 6—7 月份,而雨养处理下生物量增长最快的是在 7—8 月份,因此补水处理提前了单播冰草的快速生长时间。对于单播紫花苜蓿而言,补水处理一和处理二下生物量增长最快的时期均为 6—7 月份,而补水处理三和雨养条件下生物量增长最快的时期是 7—8 月份,因此补水处理一和补水处

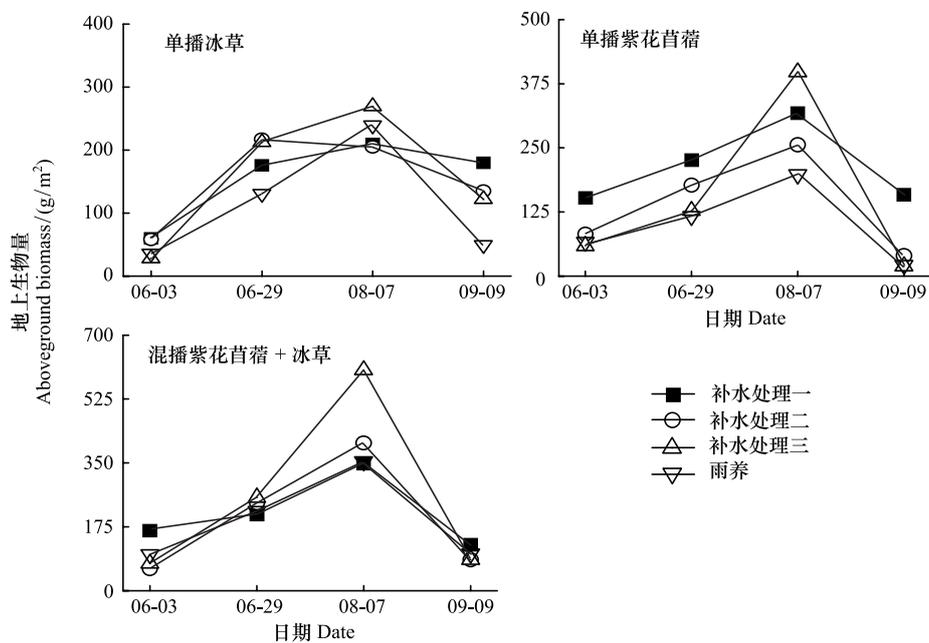


图 1 不同补水处理下不同时期各牧草的生物量

Fig.1 Grass biomass in different periods under different irrigation schemes

理二提前了它的快速生长时间。此外,在整个生长季内,大部分情况下,冰草和紫花苜蓿生物量增长最多的是补水处理一,且生物量的增长量一般随着补水量的减少而降低。如果考虑在最佳收割季节 8 月初收获,此时补水处理三是各牧草生物量增长最多的最佳补水方案,即在 7 月初对牧草的补水总量(包含降雨量)达到 903.8 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>,在 8 月初对牧草的补水总量达到 1812.4 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>。

### 3.1.3 不同播种方式对牧草产量的影响

从图 1 可以看出,无论是冰草还是紫花苜蓿,混播后的产量都明显要比单播提高很多。通过方差分析发现(表 2),在 4 种处理下混播的增产能力在显著水平为 0.05 的情况下都是显著的。因此,为提高牧草产量,用豆禾混播的方式最佳。

表 2 不同牧草不同播种方式的方差分析结果(Duncan grouping)

Table 2 Results of variance analysis of different forage under different sowing patterns

播种方式 Planting patterns	N	α = 0.05 的子集 Subset of alpha = 0.05							
		补水处理一 Treatment 1		补水处理二 Treatment 2		补水处理三 Treatment 3		雨养处理 Treatment 4	
		1	2	1	2	1	2	1	2
1	3	89.85		87.86		115.45		84.78	
2	3	136.21	136.21	109.62		170.26	170.26	102.69	
3	3		148.98		173.65		258.98		151.71
Sig.		0.09	0.60	0.43	1.00	0.27	0.09	0.37	1.00

播种方式中:1 代表单播冰草,2 代表单播紫花苜蓿,3 代表混播紫花苜蓿+冰草;N 为样本数;显著性数值大于 0.05 即为显著

### 3.2 不同补水处理对牧草光合性能和 WUEI 的影响

表 3 显示了不同补水处理下不同时期各牧草的光合速率、蒸腾速率和 WUEI 的日均值。从表 3 可以看出,无论是单播还是混播,与 7 月初相比,冰草和紫花苜蓿的光合速率、蒸腾速率和 WUEI 在 8 月初均有下降,因此牧草的叶片在 8 月初开始衰落,也意味着牧草的产量在此后会逐渐减少。对于单播冰草和混播冰草来说,3 种补水处理均有利于提高牧草在 7 月初和 8 月初的光合速率、8 月初的蒸腾速率以及 7 月初的 WUEI。在 8 月初,雨养更有利于提高单播冰草的 WUEI,补水处理三更有利于提高混播冰草的 WUEI。对于单播紫花

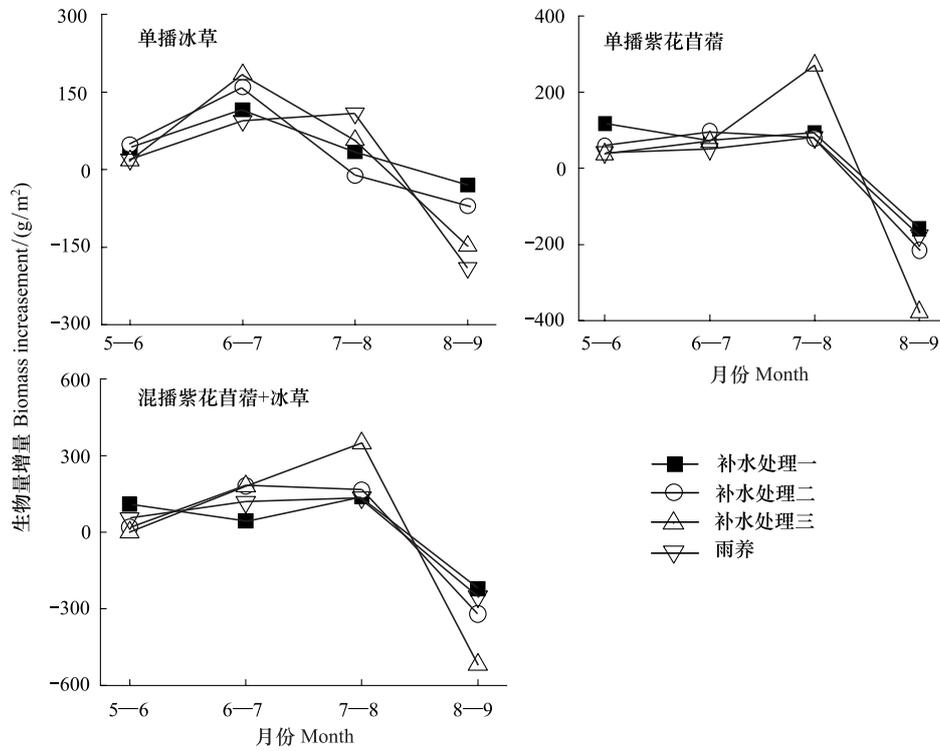


图 2 不同处理下不同时期各牧草的生物量增量

Fig.2 Grass biomass increment in different periods under different irrigation schemes

苜蓿和混播紫花苜蓿而言,三种补水处理均可提高牧草7月初和8月初的光合速率和WUEI以及8月初的蒸腾速率,而雨养更有利于提高牧草7月初的蒸腾速率。

表 3 不同补水处理下不同时期各牧草的光合速率、蒸腾速率和 WUEI

Table 3 Daily mean values of grass Pn, Tr, WUEI in different periods under different irrigation schemes

牧草名称 Forage name	补水方式 Irrigation patterns	光合速率(日均值) Photosynthesis ( $Pn/\mu\text{molCO}_2 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$ )		蒸腾速率(日均值) Trmmol/ ( $Tr/\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ )		WUEI(日均值) WUEI/ ( $\text{molCO}_2 \text{ mmolH}_2\text{O}^{-1}$ )	
		7月1日	8月9日	7月1日	8月9日	7月1日	8月9日
单播冰草 Single sowing of <i>Agropyron cristatum</i>	补水处理一	11.10	4.34	2.84	1.91	3.81	2.26
	补水处理二	11.72	3.03	2.20	1.52	5.31	2.23
	补水处理三	10.69	3.80	3.02	1.69	4.03	2.25
	雨养处理	8.68	3.44	3.17	1.45	2.73	2.48
单播紫花苜蓿 Single sowing of <i>Medicago sativa L.</i>	补水处理一	8.22	5.31	2.25	2.39	3.90	2.22
	补水处理二	12.97	3.86	2.17	1.84	5.97	2.10
	补水处理三	10.21	4.09	1.96	1.66	5.09	2.45
	雨养处理	10.15	3.26	2.67	1.74	3.79	1.86
混播冰草 Agropyron cristatum of Mixture sowing	补水处理一	11.45	3.68	3.32	1.88	3.44	1.94
	补水处理二	11.39	2.52	2.24	1.50	5.07	1.58
	补水处理三	8.42	3.17	1.92	1.33	4.04	2.37
	雨养处理	8.13	2.14	3.00	1.10	2.70	1.94
混播紫花苜蓿 <i>Medicago sativa L.</i> of mixture sowing	补水处理一	12.28	5.80	2.36	2.91	5.17	1.99
	补水处理二	10.47	4.03	1.86	2.04	5.78	1.97
	补水处理三	12.48	2.98	2.31	1.52	5.49	1.94
	雨养处理	9.43	2.67	2.88	1.38	3.27	1.93

Duncan 多重比较方差分析发现(表 4),在显著水平为 0.05 的情况下,对于冰草和紫花苜蓿,无论是单播还是混播,4 种处理对 7 月初和 8 月初牧草光合速率、蒸腾速率和 WUEI 影响的差异均不明显(同属一类子集)。因此,考虑到节水的同时提高牧草光合性能和产量,选用补水三的处理方式比较合适。

表 4 不同播种方式下不同补水处理的光合、蒸腾和 WUEI 方差分析结果

Table 4 Variance analysis of grass Pn, Tr and WUEI of different treatment in different periods

补水方案 Irrigation scheme	N	$\alpha = 0.05$ 的子集							
		单播冰草		单播紫花苜蓿		混播冰草		混播紫花苜蓿	
		7 月	8 月	7 月	8 月	7 月	8 月	7 月	8 月
<i>P<sub>n</sub></i>									
1	7	11.67	4.34	11.63	5.31	11.45	3.72	11.09	5.80
2	7	11.72	3.17	12.97	3.86	11.39	2.62	12.78	4.03
3	7	11.80	3.80	10.64	4.09	8.50	3.17	12.81	2.98
4	7	8.68	3.65	10.15	3.26	8.13	2.38	9.43	2.89
Sig.		0.40	0.30	0.50	0.08	0.38	0.22	0.45	0.05
<i>Tr</i>									
1	7	3.81	1.91	3.90	2.39	3.44	1.88	5.17	2.91
2	7	5.31	1.52	5.97	1.84	5.07	1.50	5.78	2.04
3	7	4.03	1.69	5.09	1.66	4.04	1.33	5.49	1.52
4	7	2.73	1.45	3.79	1.74	2.70	1.10	3.27	1.38
Sig.		0.22	0.30	0.10	0.12	0.12	0.13	0.06	0.05
WUEI									
1	7	3.16	2.83	3.11	2.46	3.24	2.33	2.07	2.24
2	7	2.29	2.28	2.27	2.31	2.55	1.99	1.93	2.16
3	7	2.85	2.38	2.03	2.70	2.23	2.84	2.23	2.17
4	7	3.11	2.67	2.61	2.40	2.97	1.99	2.63	2.15
Sig.		0.34	0.47	0.20	0.67	0.17	0.41	0.28	0.90

补水方案中:1 代表补水处理一,2 代表补水处理二,3 代表补水处理三,4 代表雨养;N 为样本数;显著性数值大于 0.05 即为显著

### 3.3 不同补水处理对牧草 WUEI 的影响

图 3 显示了不同补水处理下不同时期牧草的 WUEI。从图 3 可以看出,对于单播冰草而言,在 6—7 月 WUEI 最高的是补水处理三,在 7—8 月 WUEI 最高的是雨养。对于单播紫花苜蓿而言,在 6—7 月 WUEI 最高的是雨养,在 7—8 月 WUEI 最高的是补水处理三。对于混播紫花苜蓿+冰草而言,在 6—7 月水分利用效率最高的是雨养,在 7—8 月 WUEI 最高的是补水处理三。因此,对于冰草和紫花苜蓿(无论是单播还是混播)而言,在牧草生长旺季(6—8 月份),雨养或者补少量水(补水处理三)即可较好地提高牧草的 WUEI。

### 3.4 牧草增产节水效益分析

表 5 显示了不同时期不同补水处理与雨养相比产量和 WUEI 增加的比例。从表 5 可以看出,与雨养处理相比,补水处理三在单播紫花苜蓿生长旺季能使其产量增加 157.52%,WUEI 增加 59.54%;补水处理三在混播紫花苜蓿+冰草生长旺季能使其产量增加 108.01%,WUEI 增加 36.20%;而对于单播冰草来说,在牧草的整个生长季节内,3 种补水处理均能显著提高牧草的产量和 WUEI,为节水考虑,采取补水处理三为佳。因此,总的来说,对于冰草和紫花苜蓿而言,无论是单播还是混播,考虑牧草增产节水且 WUEI 显著提高的综合效益,补水处理三是进行人工补水干预的最佳方案。

## 4 结论与讨论

在牧草生长旺季,在水分胁迫的情况下,植物体内的水分状况会表现出如下特点:组织含水量下降,吸水量降低,蒸腾量减少,但蒸腾仍大于吸水<sup>[13]</sup>。同时,植物也会通过一系列的生理生化变化来适应水分胁迫生境,即在缺水条件下,植物体内会主动积累一些溶质,如可溶性糖、脯氨酸等。由于细胞内溶质增多,渗透势下

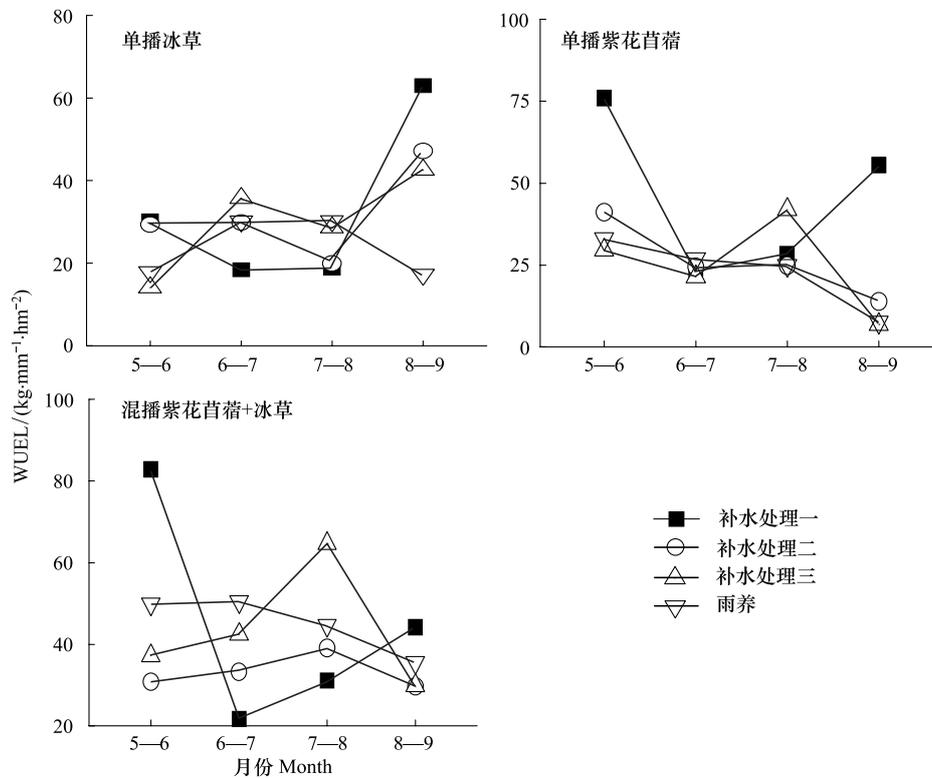


图 3 不同补水处理下不同时期各牧草的 WUEL

Fig.3 Grass WUEL in different periods under different irrigation schemes

表 5 不同时期不同补水处理与雨养处理相比产量和 WUEL 增加的比例

Table 5 Increase proportion of yield and WUEL of different treatment compared with treatment 4 in different periods

牧草名称 Forage name	补水方式 Irrigation patterns	产量增产比例 Increase proportion of yield/%			WUEL 增加比例 Increase proportion of WUEL/%		
		6—7 月	6—8 月	6—9 月	6—7 月	6—8 月	6—9 月
单播紫花苜蓿 Single sowing of <i>Medicago sativa</i> L	补水处理一	46.61	26.06	-114.07	-12.30	-5.14	635.00
	补水处理二	89.84	32.31	-5.84	-9.29	-9.72	84.26
	补水处理三	36.54	157.52	-11.81	-20.64	59.54	-10.02
单播冰草 Single sowing of <i>Agropyron cristatum</i>	补水处理一	21.90	-26.56	776.63	-39.11	-48.35	263.89
	补水处理二	67.49	-27.80	463.76	-1.19	-40.28	172.94
	补水处理三	94.03	18.33	584.51	18.18	-10.26	146.23
混播紫花苜蓿+冰草 Mixture sowing of <i>Medicago sativa</i> L and <i>Agropyron cristatum</i>	补水处理一	-62.85	-27.97	-1930.76	-57.07	-42.09	24.08
	补水处理二	52.00	35.48	1078.01	-34.09	-20.25	-16.42
	补水处理三	51.94	108.01	414.34	-15.93	36.20	-15.80

降,植物就可以从外界继续吸水,维持细胞膨压,使生理过程正常进行<sup>[14]</sup>。在本研究中发现,8 月份冰草和紫花苜蓿充分体现了水分胁迫下的适应能力,所以不用补太多的水,牧草一天中的 WUEI 均值和 WUEL 均比较高。而 7 月份是当地降雨集中的时期,且太阳光照强烈,蒸发旺盛,使得牧草的水分保存策略(通过减少水分消耗最大化的提高 WUEI)失去了适应优势,因为强烈的蒸发过程消耗叶片获取的水分,同时,与其相比较的牧草使用了充足的水分来保持竞争力<sup>[15]</sup>。因此,在 7 月份光照强烈时,牧草的 WUEI 日均值一般在补水处理二最高。但牧草的 WUEL 在 7 月份依然受到水分胁迫的影响,依然是在雨养或补水处理三的情况下数值最高。

本研究是在天然无棚的条件下开展的,选择干旱半干旱地区人工草地建植的主要草种紫花苜蓿和冰草作

为研究对象,是适应当地气候和栽培条件的,符合建植人工草地的目的和要求。依据本研究的结论,即为实现内蒙古人工草地主要牧草冰草和紫花苜蓿高产节水的目标,应对两种牧草以混播的方式种植,在8月初进行收割,同时在返青期补充充足的水分,此后在7月初使单位面积灌水量(包括降雨量和补水量)达到 $903.8 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ ,在8月初达到 $1812.4 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ 。本研究结合水分胁迫的理论和实际降雨情况,同时考虑牧草 WUEI 和 WUEL,其试验设计方案可用于分析干旱半干旱区其他常见的人工草种,而研究的结果也有利于在研究区的人工草地建设中进行大面积推广和应用。

#### 参考文献 (References):

- [ 1 ] 李世雄,王彦荣,孙建华. 中国苜蓿品种种子产量性状的遗传多样性. 草业学报, 2003, 12(1): 23-29.
- [ 2 ] 万素梅,贾志宽,杨宝平. 苜蓿光合速率日变化及其与环境因子的关系. 草地学报, 2009, 17(1): 27-31.
- [ 3 ] 孙洪仁,马令法,何淑玲,李品红,刘爱红. 灌溉量对紫花苜蓿水分利用效率和耗水系数的影响. 草地学报, 2008, 16(6): 636-639, 645-645.
- [ 4 ] 陈光荣,高世铭,张晓艳. 补水时期和施钾量对陇中半干旱区旱地马铃薯产量和水分利用率的影响. 中国土壤与肥料, 2009, (1): 23-26, 39-39.
- [ 5 ] 周续莲,吴宏亮,康建宏,许强. 不同灌水处理对春小麦水分利用率和光合速率的影响. 农业科学研究, 2011, 32(4): 1-5, 37-37.
- [ 6 ] 余青. 不同灌溉方式对水稻产量及水分利用率的影响. 贵州农业科学, 2010, 38(8): 37-39.
- [ 7 ] 王琦,张恩和,龙瑞军,赵桂琴,孙永胜. 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. 草业科学, 2006, 23(9): 75-78.
- [ 8 ] 刘国利,何树斌,杨惠敏. 紫花苜蓿水分利用效率对水分胁迫的响应及其机理. 草业学报, 2009, 18(3): 207-213.
- [ 9 ] 孙洪仁,关天复,孙建益,武瑞鑫,李品红. 不同年限紫花苜蓿(生长)水分利用效率和耗水系数的差异. 草业科学, 2009, 26(3): 39-42.
- [ 10 ] 孙洪仁,张英俊,历卫宏,逯涛林,高飞,韩建国. 北京地区紫花苜蓿建植当年的耗水系数和水分利用效率. 草业学报, 2007, 16(1): 41-46.
- [ 11 ] 牛建明. 内蒙古主要植被类型与气候因子关系的研究. 应用生态学报, 2000, 11(1): 47-52.
- [ 12 ] 李素英,李晓兵,莺歌,符娜. 基于植被指数的典型草原区生物量模型——以内蒙古锡林浩特市为例. 植物生态学报, 2007, 31(1): 23-31.
- [ 13 ] 孙国荣,阎秀峰,肖玮. 星星草耐盐碱生理机制的初步研究. 植物科学学报, 1997, 15(2): 162-166.
- [ 14 ] 张彤,齐麟. 植物抗旱机理研究进展. 湖北农业科学, 2005, (4): 107-110.
- [ 15 ] Fischer R A. Growth and water limitation to dryland wheat yield in Australia: a physiological framework. Journal of the Australian Institute of Agricultural Science, 1979, 45: 83-94.