

# 农牧交错带老芒麦的优化灌溉及对产量的影响

王 皓, 李子忠<sup>\*</sup>

(中国农业大学资源与环境学院, 北京 100193)

**摘 要:** 为了定量研究关键生育期灌溉和冬灌对老芒麦生产的作用, 该文通过2005.10~2007.10在河北坝上地区田间定位实测的土壤水分、株高、叶面积指数、生物量和降水资料, 分析了不灌溉、冬灌、关键生育期灌溉和冬灌结合关键生育期灌溉4个处理对老芒麦生长发育和产量的影响。结果表明: 老芒麦的再生草生长缓慢, 灌溉主要是影响了头茬草的生长。关键生育期灌溉能显著促进头茬草的生长发育, 头茬草产量达4500 kg/hm<sup>2</sup>以上, 2 a试验期间分别比对照处理提高104%和391%; 冬灌使老芒麦返青期提前1周左右, 使头茬草的产量分别提高53%和87%; 而共同采用此两种灌溉的处理与单独关键生育期灌溉处理相比增产效果不明显。因此, 在农牧交错地区, 关键生育期灌溉是值得推荐的灌溉制度。另外, 该文结果表明地上部生物量和叶面积指数均随植株高度呈线性增加, 为老芒麦生物量和叶面积指数的模拟提供了依据。

**关键词:** 冬灌, 关键生育期灌溉, 产量, 老芒麦

**中图分类号:** S274.1

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1002-6819(2008)-12-0006-06

王 皓, 李子忠. 农牧交错带老芒麦的优化灌溉及对产量的影响[J]. 农业工程学报, 2008, 24(12): 6-11.

Wang Hao, Li Zizhong. Optimal irrigation of siberian wildrye grass in farming-pastoral ecotone of North China and its effect on yield[J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(12): 6-11. (in Chinese with English abstract)

## 0 引 言

河北坝上农牧交错带地处内蒙古高原的南缘, 牧草供给不足成为制约该地区畜牧业发展的主要障碍, 而水分是限制牧草生长的主要因素, 所以通过灌溉来弥补水分的不足显得尤为重要。披碱草属多年生老芒麦, 因其抗旱、抗寒性强, 越冬性好, 是华北农牧交错带具有较高经济价值的牧草<sup>[1]</sup>。目前国内外对牧草水分管理的研究多采用3~6次“多次灌溉”的制度, 且多集中于当年生长季的水分管理<sup>[2-6]</sup>。而华北农牧交错地区属典型的大陆性干旱半干旱气候, 水资源较少, 生长季为5月初到9月中旬, 在7、8月份的雨季, 降水基本满足牧草的水分需求, 但其他时间降水很少, 导致牧草常常受到水分胁迫, 影响牧草的生长发育和产量。因此, 雨季前的牧草关键生育期灌溉和冬前灌溉可能会对当季和次年的牧草生长产生影响。

根据当前灌溉制度的理论发展, 作物在不同生育期对水分的需求是不一样的。余国英等<sup>[7]</sup>认为禾本科牧草各生育阶段对水分的依赖程度由大到小依次是拔节期、分蘖期、抽穗期、苗期、成熟期。水利部牧区水利科学研究所<sup>[8]</sup>的研究表明老芒麦耗水最大的时期是拔节-抽穗期, 该时期的耗水量占总耗水量的27.9%, 是老芒麦的需

水关键期。李子忠等<sup>[9]</sup>的研究表明关键生育期灌溉能促进老芒麦营养枝迅速生长, 可显著提高老芒麦的地上部生物量。刘文清等<sup>[10]</sup>和王志强等<sup>[11]</sup>也都认为这一时期的灌溉对提高牧草产量具有重要的意义。但是, 目前对只进行1次关键生育期灌溉的制度还研究较少。

Justes等的研究<sup>[12]</sup>表明第一年夏天充足的田间水分状况会促进第二年春天苜蓿的快速再生, 水利部牧区水利科学研究所<sup>[8]</sup>的研究认为冬灌可使多年生苜蓿提前返青15~20 d, 分蘖数增加30%以上。并且, 从北方冬小麦的生产实践中也可知, 适时适量冬灌能减轻冻害, 可为冬小麦安全越冬和春季返青提供良好的土壤水分条件和温度条件<sup>[13]</sup>。因此, 冬灌可能会影响到多年生老芒麦的越冬, 以及春季返青, 甚至整个生长季的生长发育, 但目前对单独冬灌的效果也少有报道。

为了定量研究关键生育期灌溉和冬灌的作用, 本研究设置了不灌溉、冬灌、关键生育期灌溉和冬灌结合关键生育期灌溉4个水分处理, 分析不同灌溉措施下老芒麦的生长发育规律, 期望为该地区老芒麦的优化灌溉制度和水分管理提供依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究地自然概况

试验于2005~2007年在农牧交错带典型地段——河北省承德市鱼儿山牧场中国农业大学科技攻关实验站进行。试验区地处丰宁满族自治县西北部的坝上高原, 东经116°11', 北纬41°45', 海拔1460 m。属于半干旱大陆季风气候带, 年均温1℃, 一月份平均气温-18.6℃, 七月份平均气温17.6℃, ≥10℃活动积温1513.1℃, 无霜期85 d。年降水量在300~400 mm, 主要集中在6~9月。年平均蒸发量1735.7 mm, 年日照时数2930.9 h。主要土

收稿日期: 2007-10-29 修订日期: 2008-11-30

基金项目: 国家自然科学基金项目(30471228); 国家科技部科技支撑项目(2006BAD16B01)

作者简介: 王 皓(1982-), 男, 山东人, 博士生, 主要从事农业水土资源利用研究。北京 中国农业大学资源与环境学院, 100193。

Email: wanghcau@163.com

<sup>\*</sup>通讯作者: 李子忠(1972-), 男, 山东人, 副教授, 硕士生导师, 主要从事农业水土资源利用和土壤物理学研究。北京 中国农业大学资源与环境学院, 100193。Email: zizhong@cau.edu.cn

壤类型为栗钙土，土壤质地为砂质壤土。试验地土壤的基本理化性质见表 1。

表1 供试土壤基本理化性质  
Table 1 Basic physiochemical properties of experimental soil

土层 / cm	容重 / g·cm <sup>-3</sup>	有机质 / g·kg <sup>-1</sup>	速效氮 / mg·kg <sup>-1</sup>	速效磷 / mg·kg <sup>-1</sup>	速效钾 / mg·kg <sup>-1</sup>	pH 值	电导率 / mS·cm <sup>-1</sup>	田间含水率 $\theta_{FC}$	凋萎含水率 $\theta_{WP}$
0~15	1.40	28.94	99.17	2.73	90.93	8.20	0.15	0.268	0.088
15~30	1.49	25.07	84.34	1.60	67.58	8.32	0.15	0.275	0.087
30~45	1.63	16.89	51.54	0.89	54.72	8.42	0.15	0.184	0.044
45~60	1.59	6.67	30.45	0.77	47.09	8.48	0.14	0.162	0.062

1.2 试验材料和处理

试验所用老芒麦种子为青海省畜牧兽医科学院培育的青牧1号多叶老芒麦 (*Elymus sibiricus* L. cv “Duoye”)，于2005年6月15日播种（机械条播并覆土镇压，行距33 cm），播种量为25 kg/hm<sup>2</sup>，播种前及每年5月份牧草返青后撒施尿素（含N 46 %）130 kg/hm<sup>2</sup>，磷酸二胺（含N 21.21%、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 23.48%）70 kg/hm<sup>2</sup>。试验小区大小为20 m×8 m，每两个小区间隔1.5 m 作为保护行，每个处理设置3个重复，各小区随机排列。试验灌溉设备采用微型喷灌系统，用水表计量灌水量。

根据农业生产对土壤水分的需求状况设置不同的灌溉处理：1）对照处理（CK），即非灌溉处理，水分供给完全来源于降水；2）冬灌处理（W1），即在土壤冻结前，一次性灌溉达到 0~60 cm 土层的田间持水量，2005、2006 年的灌水量分别为 44 mm 和 75 mm；3）关键生育期灌溉处理（W2），即在老芒麦的关键生育期（拔节期）一次性灌溉达到 0~60 cm 土层的田间持水量，2006、2007 年的灌水量分别为 44 mm 和 75 mm；4）冬灌和关键生育期灌溉处理（W3）：将 W1 和 W2 两个处理进行结合，即在冬前和关键生育期分别灌水至 0~60 cm 土层的田间持水量。

1.3 测定项目和方法

1.3.1 土壤含水率的测定

用时域反射仪（加拿大 Environmental Sensors Inc.生产，型号为 MP-917）监测 0~15、15~30、30~45 和 45~

60 cm 的土壤体积含水率，3~5 d 测定一次，并根据各层的土壤体积含水率计算 0~60 cm 土壤贮水量，结合田间持水量和凋萎含水率计算有效贮水量。

$$W_{FC} = \sum_{i=1}^n \theta_{FCi} \times Z_i \tag{1}$$

$$W_{WP} = \sum_{i=1}^n \theta_{WPi} \times Z_i \tag{2}$$

$$TAW = \sum_{i=1}^n (\theta_{FCi} - \theta_{WPi}) \times Z_i \tag{3}$$

$$ASW = \sum_{i=1}^n (\theta_i - \theta_{WPi}) \times Z_i \tag{4}$$

$$RSW = TAW \times p + W_{WP} \tag{5}$$

式中  $W_{FC}$  ——土体的田间持水量，mm； $\theta_{FCi}$  ——第  $i$  层的田间含水率； $W_{WP}$  ——土体的凋萎持水量，mm； $\theta_{WPi}$  ——第  $i$  层的凋萎含水率； $TAW$  ——田间最大有效持水量，mm； $Z_i$  ——第  $i$  层的深度，mm； $ASW$  ——土体有效贮水量，mm； $\theta_i$  ——第  $i$  层的土层含水率； $RSW$  ——作物开始遭受水分胁迫时的临界含水量，mm； $p$  ——跟作物有关的系数<sup>[14]</sup>。

1.3.2 生育期观测

对老芒麦的生长过程进行观测，根据各生育期的生长发育特点判定返青、分蘖、拔节、抽穗、再生等生育期，确定老芒麦的需水关键期。试验期间老芒麦各生育期的开始时间列于表 2。

表2 试验期间老芒麦的生育期统计  
Table 2 Growing stages of siberian wildrye grass (*Elymus sibiricus* L.) during experimental period

处理	2006/月-日						2007/月-日					
	返青	分蘖	拔节	抽穗	刈割	再生	返青	分蘖	拔节	抽穗	刈割	再生
CK	5-1	5-20	6-5	6-29	7-9	7-17	4-28	5-15	6-5	7-6	7-24	8-5
W1	4-25	5-10	6-5	6-29	7-9	7-17	4-20	5-10	6-5	7-6	7-24	8-5
W2	5-1	5-20	6-5	6-25	7-9	7-17	4-28	5-15	6-5	7-1	7-24	8-5
W3	4-25	5-10	6-5	6-25	7-9	7-17	4-20	5-10	6-5	7-1	7-24	8-5

1.3.3 植株高度、叶面积指数和地上部生物量的测定

由于老芒麦种植后第一年生长缓慢，从第二年老芒麦返青后开始测定生物指标，每 10 天测定植株自然高度、叶面积指数（LAI）和生物干质量。LAI 和生物量取 50×50 cm<sup>2</sup> 采样测产，LAI 采用拓印称重法，即裁下与叶面积相同形状的均匀纸片，通过对比小纸片与已知面积的大纸片的质量测算叶片的面积。成熟后进行收获测产，将

植株留茬 5 cm 剪割，75℃烘干至恒质量<sup>[15]</sup>。

1.3.4 降水量的测定

用安装在试验地中央的雨量器（天津气象仪器厂 SDM6 型）测定降水量。

2 结果与分析

2.1 老芒麦人工草地土壤水分动态变化

2a 试验中,老芒麦生育期集中在 5~9 月,其生育期降水量分别为 265.0 mm 和 234.5 mm (图 1), 占多年生育期平均降水量 (278.7 mm) 的 95% 和 84%, 分别属于平水年和偏旱年<sup>[16]</sup>。其中,2006 年的 6、7 月份降水量略高于多年平均值,5 月、8 月和 9 月份较常年少 20% 以上;2007 年的月降水量较低,6~9 月份降水量均比常年少 20% 左右。老芒麦生育期内降水量呈现明显的季节变化规律,即生育前期的 5、6 月份的降水较少,7 月份为雨季,该月多年平均降水量为 97.9 mm,占整个老芒麦生育期降水量的 35%,8 月份后降水量开始逐渐减少。因此,在农牧交错地区,春季的降水较少,7~8 月份是主要的降水季节,9 月份的降水又会减少,具有显著的季节变化规律。

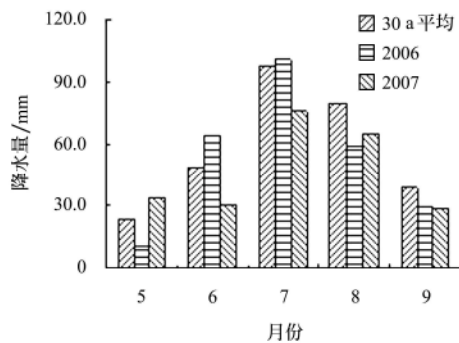


图 1 试验期间老芒麦生育期各月降水量分布

Fig.1 Monthly rainfall distribution of siberian wildrye grass growing stages during experimental period

当土壤中的水分低于临界值时,作物就会受到水分胁迫。Allen 等认为土壤有效贮水量在田间最大有效持水量的 40%~60% 以上时,作物不受水分胁迫<sup>[14]</sup>。老芒麦属冷季作物且抗旱能力较强,本文取  $p=0.4$ 。由于该地区地下水埋深较深 (6~7 m), 土壤水分状况主要受自然降水和灌溉的影响。W2 和 W3 处理 0~60 cm 土壤贮水量多数时间维持在临界含水量以上, 土壤水分条件较好, 能够满足老芒麦关键生育期的水分需求 (图 2)。W1、W3 处理由于进行了冬灌, 在返青期土壤贮水量较高, 但返青后下降迅速, W1 处理到 6 月中旬后水分优势不明显。CK 处理的土壤水分条件仅受降水的影响, 水分条件较差。2a 试验中 2006 年降水稍多, 只有 CK 和 W1 处理在 6 月中旬到 7 月中旬受到水分胁迫, 土壤水分条件优于

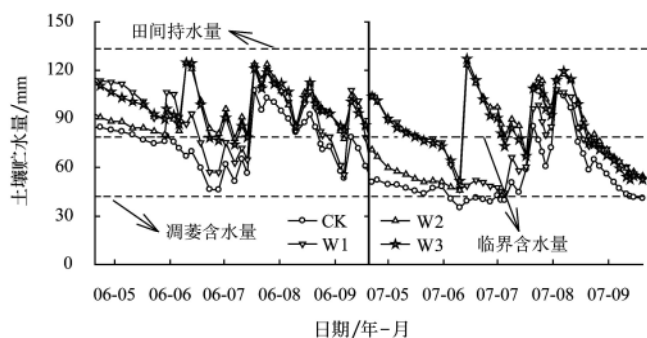


图 2 试验期间各处理的土壤水分动态变化

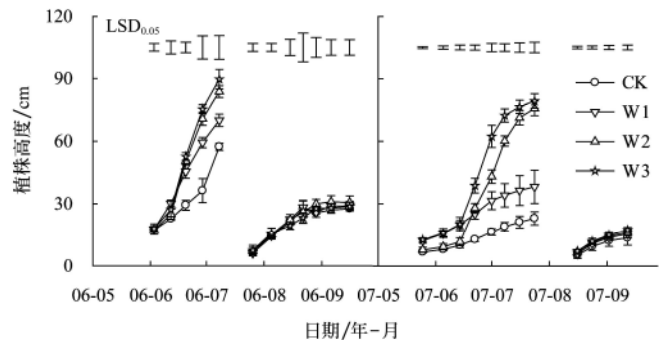
Fig.2 Dynamic changes of soil water storage in 0-60 cm during the 2-year (2006-2007) experiment

2007 年,2007 年 CK 和 W1 处理在生育期内长期遭受水分胁迫, W2 和 W3 处理也在春季灌溉前和生育期末尾受到一定程度的水分胁迫 (图 2)。

## 2.2 不同灌溉处理下老芒麦生长发育规律

### 2.2.1 植株高度

灌溉对老芒麦的植株高度具有显著影响 (图 3)。冬灌使老芒麦提前返青 1 周左右 (表 2), 返青期植株增高较快; 关键生育期灌溉使植株高度迅速增加, 很快超过未进行灌溉的处理; W3 处理的植株返青较早, 但刈割时的植株高度和 W2 处理相比差异不显著。刈割后, 处理间的植株高度差异不显著。2006 年土壤水分条件相对较好, 植株比 2007 年的要高。2006 年头茬草收割前 CK、W1、W2 和 W3 处理的植株高度分别为 57、70、83 和 89 cm; 2007 年 4 个处理头茬草的植株高度分别达到 23、38、76 和 79 cm。因此, 较干旱的年份灌溉对植株的增高较显著。W1 处理的头茬草在 2006 和 2007 年分别比 CK 处理增高 23% 和 65%, W2 处理在 2a 试验期间的增幅分别为 46% 和 230%, 而 W3 与 W2 处理相比差别不大。



注: 同一日期的数据采用 LSD 多重比较进行差异性分析, 显著水平  $P < 0.05$ 。下同。

图 3 不同灌溉处理下老芒麦的植株高度

Fig.3 Plant heights of siberian wildrye grass (*Elymus sibiricus* L.) with different irrigation treatments

### 2.2.2 叶面积指数

灌溉对老芒麦叶面积指数的影响和对植株高度的影响相似 (图 4)。冬灌使老芒麦在返青初期的 LAI 大于其它处理, 拔节期以后关键生育期灌溉处理的 LAI 迅速增加; CK 处理的 LAI 始终保持最低的水平; 刈割后, 处理间叶面积指数差异不显著。2006 年土壤水分条件相对较好, LAI 比 2007 年的大。2006 年头茬草收割前 CK、W1、W2 和 W3 处理的 LAI 分别为 2.4、4.2、4.7 和 4.9; 2007 年 4 个处理头茬草的 LAI 分别达到 1.0、2.3、3.7 和 3.6。因此, 越是干旱年份, 灌溉对 LAI 的提高越显著。W1 处理的头茬草在 2006 和 2007 年收割时的 LAI 分别比 CK 处理提高 75% 和 130%, W2 处理在 2a 试验期间的增幅分别为 96% 和 270%, 而 W3 与 W2 处理相比差别不大。

### 2.2.3 地上部生物量

灌溉对老芒麦地上部生物量的影响同植株高度及 LAI 的变化规律相似 (图 5)。冬灌促使老芒麦返青后生物量迅速增大; 拔节期以后, W1 处理的生物量增加放缓, W2 和 W3 处理的生物量迅速增加; CK 处理始终处于较

低的水平;刈割后,处理间生物量的差异不显著。其中,越是干旱年份,灌溉对地上部生物量的提高越显著。W1 处理的头茬草在 2006 和 2007 年收割时的地上部生物量分别比 CK 处理提高 53% 和 174%, W2 处理在 2 a 试验期间的增幅分别为 104% 和 522%, 而 W3 与 W2 处理相比差别不大。

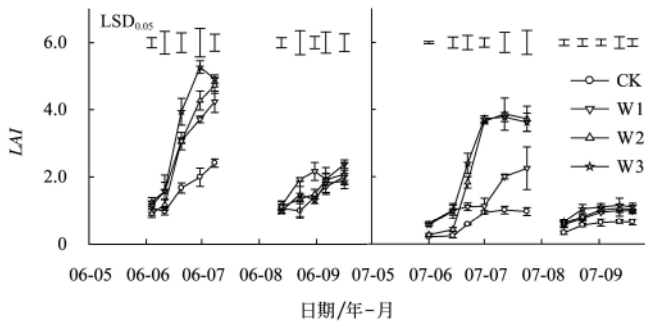


图 4 不同灌溉处理下老芒麦的叶面积指数

Fig.4 Leaf area indexes of siberian wildrye grass (*Elymus sibiricus* L.) with different irrigation treatments

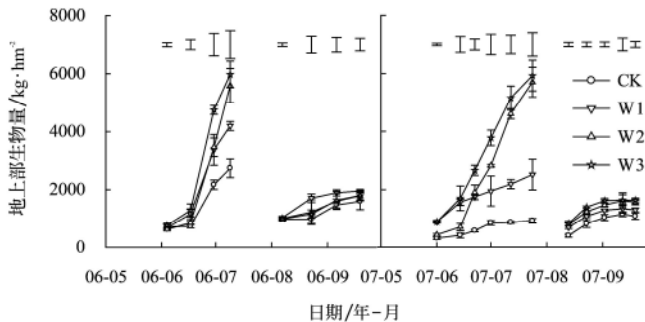
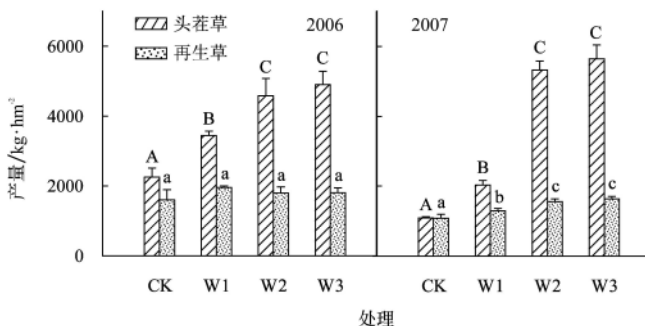


图 5 不同灌溉处理下老芒麦的地上部生物量

Fig.5 Aboveground biomass of siberian wildrye grass (*Elymus sibiricus* L.) with different irrigation treatments

### 2.3 不同灌溉处理下老芒麦的产量

老芒麦的再生能力较差,再生草的产量较低。灌溉主要促进了老芒麦头茬草产量的增加,2006 年对再生草的影响较小,而在较干旱的 2007 年,灌溉也促进了再生草增产(图 6)。CK 处理 2 a 试验期间头茬草的产量分别为 2250 kg/hm<sup>2</sup> 和 1085 kg/hm<sup>2</sup>,全年总产量为 3845 kg/hm<sup>2</sup> 和 2162 kg/hm<sup>2</sup>; W1 处理使 2 a 的头茬草分别增产 53% 和



注:采用LSD多重比较进行差异性分析,标不同字母的处理间差异显著( $P < 0.05$ )

图 6 不同灌溉处理下老芒麦的产量

Fig.6 Yields of siberian wildrye grass (*Elymus sibiricus* L.) with different irrigation treatments

87%, 全年总产量增加 40% 和 53%; W2 处理可使 2 a 的头茬草分别增产 104% 和 391%, 全年总产量增加 66% 和 218%; W3 处理的头茬草增产 118% 和 420%, 全年总产量增加 74% 和 237%。因此, W2 处理具有最大的增产效果, W3 处理和 W2 处理无显著差异。另外,由于 2007 年偏旱,导致本年 CK 处理头茬草产量比 2006 年降低了 52%, W1 处理头茬草产量降低了 41%, 而 W2 处理的头茬草产量略有增加,表明关键生育期灌溉可以使老芒麦保持高产和稳产。

## 3 讨论

### 3.1 土壤的水分变化同老芒麦生长的关系

2 a 试验期间,以 2006 年的降水量较多,生育期间达 265 mm,土壤水分条件较好,老芒麦受到水分胁迫的天数较少。2007 年为偏旱年,对照处理和冬灌处理长期遭受水分胁迫,仅仅在 7 月底雨季来临后得到一定的改善。每年的 6 月中旬到 7 月中旬是老芒麦生物量积累的主要时期,这段时期产生的生物量干质量占全年总生物量的绝大部分,因此这段时期的土壤水分状况直接影响到老芒麦的生长发育及最终的产量。

4 个处理中,进行冬灌的处理(W1、W3)初春土壤水分好,返青较早,但此时地表裸露,土面蒸发比较大,到 6 月初,土壤的水分优势已经不再明显,甚至在这段时期的土壤贮水量低于临界含水量,使处于关键生育期的老芒麦受到水分胁迫<sup>[14,17]</sup>,如果不进行灌溉,导致老芒麦生长受到限制。关键生育期进行灌溉的处理(W2、W3),在 6 月中旬到 7 月中旬的土壤水分优势明显,土壤贮水量保持在临界含水量以上,基本上不会受到水分胁迫作用,对老芒麦的生长发育起到很大的促进作用。

### 3.2 灌溉对老芒麦产量的影响

试验区牧草旺盛生长的时间较短,仅有 1 个月左右,老芒麦的产量以头茬草为主,进入 8 月份后,气温的降低可能成为老芒麦生长的限制因素。有研究表明提高老芒麦产量的关键是提高头茬草的产量<sup>[9]</sup>。因此,在 6 月中旬以后保持土壤贮水条件的优势,应该是提高老芒麦产量的关键所在。虽然冬灌能提高老芒麦返青期间的土壤水分,使老芒麦早返青,但试验结果表明,返青时间并不是决定最终产量的关键因素。拔节期的土壤水分优势使老芒麦的植株高度、叶面积、生物量迅速增加,是老芒麦提高产量的关键时期。

2006 年 CK 和 W1 处理的产量较高,2007 年为干旱年份,这两个处理的产量极低,表明这些处理的产量随气候条件变化明显; W2 处理的老芒麦产量的年际间差异不大,在雨量较多的 2006 年和较干旱的 2007 年都达到较理想的水平。这就表明,越是干旱年份,作物对水分的需求就越迫切,产量对水分的依赖性就越强,而关键生育期灌溉的增产效果也就越显著。

### 3.3 老芒麦的植株高度、叶面积指数、生物量之间的内在关系

叶面积指数和生物量都是草原生态系统中的重要因素,其研究对于草原生态系统的稳定性及牧区畜牧业的

发展都有重要的意义。当前对牧草生物量等指标的估算主要以收割测产为主,很少对放牧区牧草的生物量等指标进行估算。

老芒麦的生物量( $B$ )与植株高度( $H$ ),生物量与叶面积指数( $LAI$ ),以及叶面积指数同植株高度间均呈现明显的线性关系(图7),2a 试验期间的结果一致,且不同的灌溉处理间没有明显的差异,说明老芒麦的生物量与植株高度、生物量与叶面积指数、叶面积指数与植株高度间呈现稳定的线性关系,不随水分条件的改变而改变,这为草原地区特别是放牧区老芒麦的生物量及叶面

积指数的模拟提供了可能。3 种回归关系的方程分别为:

$$B = 59.2 \times H - 9.8 \quad (n=76, R^2=0.83) \quad (6)$$

$$B = 942.6 \times LAI + 97.2 \quad (n=76, R^2=0.72) \quad (7)$$

$$LAI = 0.06 \times H + 0.08 \quad (n=76, R^2=0.92) \quad (8)$$

3 个回归方程的显著水平  $P$  均小于 0.01,说明生物量同植株高度、生物量同叶面积指数、以及叶面积指数同植株高度间的线性回归关系极显著。其中,生物量同植株高度、叶面积指数同植株高度之间的回归关系的  $R^2$  分别达到 0.83 和 0.92,可以为老芒麦生物量及叶面积指数的模拟提供依据。

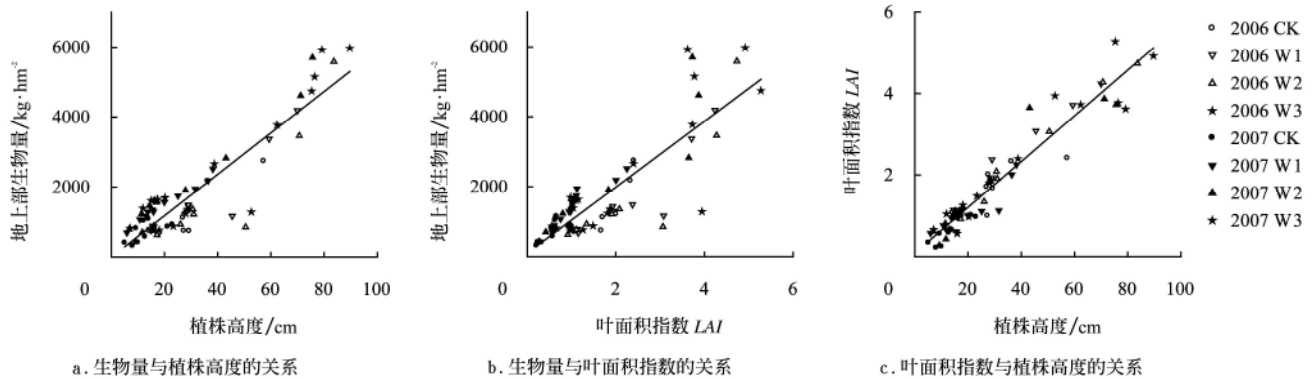


图7 不同灌溉处理老芒麦的生物量、叶面积指数及植株高度的关系

Fig.7 Relationship among biomass, leaf area index and plant height of siberian wildrye grass with different irrigation treatments

## 4 结 论

1) 老芒麦的产量主要集中在头茬草,再生草生长缓慢,产量较低,不同处理间的差异不明显。

2) 冬灌能促使老芒麦提前返青 1 周左右,加速返青后到分蘖期的生长,但到拔节期时土体的水分优势不再明显,2a 试验期间分别使头茬草产量增高 53% 和 87%。

3) 关键生育期灌溉能有效促使老芒麦植株高度、叶面积指数及地上部生物量的增加,2a 试验期间分别使头茬草产量提高 104% 和 391%,能够保证牧草高产和稳产。

4) 冬灌和关键生育期灌溉的复合处理对老芒麦的增产效果和只进行关键生育期灌溉的处理差异不显著。因此,关键生育期灌溉具有较好的增产效果,是该地区老芒麦生产中值得推荐的灌溉制度。另外,生物量、叶面积指数同植株高度之间均呈现显著的线性回归关系,为牧区草地生物量及叶面积指数的模拟提供了依据。

### 【参 考 文 献】

- [1] 毛培胜,韩建国,吴喜才.收获时间对老芒麦种子产量的影响[J].草地学报,2003,11(1):33-37.
- [2] Jensen K B, Asay K H, Waldron B L. Dry matter production of orchardgrass and perennial ryegrass at five irrigation levels[J]. Crop Science, 2001, 41: 479-487.
- [3] Lauriault L M, Kirksey R E, VanLeeuwen D M. Performance of perennial cool-season forage grasses in diverse soil moisture environments, southern high plains, USA[J]. Crop Science, 2005, 45: 909-915.
- [4] Smeal D, O'Neill M K, Arnold R N. Forage production of cool season pasture grasses as related to irrigation[J]. Agricultural Water Management, 2005, 76: 224-236.
- [5] Waldron B L, Asay K H, Jensen K B. Stability and yield of cool-season pasture grass species grown at five irrigation levels[J]. Crop Science, 2002, 42: 890-896.
- [6] Zhao Chuanyan, Feng Zhaodong, Chen Guodong. Soil water balance simulation of alfalfa (*Medicago sativa* L.) in the semiarid Chinese Loess Plateau[J]. Agricultural Water Management, 2004, 69: 101-114.
- [7] 余国英,胡雨琴.内蒙古地区牧草节水灌溉制度优化研究[J].内蒙古水利,2004,(1):71-73.
- [8] 刘承吉,郭克贞,何京丽.草原灌溉[M].北京:水利电力出版社,1995:84-109.
- [9] 李子忠,黄 顶,王忠彦.灌溉制度对老芒麦(*Elymus sibiricus*)生长的影响[J].中国农业科学,2005,38(8):1621-1628.
- [10] 刘文清,陈凤林.老芒麦需水特性及灌溉效果的研究[J].草地学报,2004,12(1):57-59.
- [11] 王志强,朝伦巴根,高瑞忠,等.多年生人工牧草高效用水灌溉制度的研究[J].农业工程学报,2006,22(12):49-55.
- [12] Justse E, Thiebeau P, Avise J C, et al. Influence of summer sowing dates, N fertilization and irrigation on autumn VSP accumulation and dynamics of spring regrowth in alfalfa (*Medicago sativa* L.)[J]. Journal of experimental botany, 2002, 53(1):111-121.
- [13] 龚家栋,祁旭升,谢忠奎,等.季节性冻融对土壤水分的作用及其在农业生产中的意义[J].冰川冻土,1997,19(4):328-333.
- [14] Allen R G, Pereira L S, Raes D, et al. Crop evapotranspiration guidelines for computing crop water requirements

- [M]. Rome: FAO, 1998: 161—175.
- [15] Ercoli L, Mariotti M, Masoni A, et al. Effect of irrigation and nitrogen fertilization on biomass yield and efficiency of energy use in crop production of *Miscanthus*[J]. *Field Crops Research*, 1999, 63: 3—11.
- [16] 张 娜, 梁一民. 干旱气候对白羊草群落土壤水分和地上部生长的初步观察[J]. *生态学报*, 2000, 20 (6): 964—970.
- [17] Webber H A, Madramootoo C A, Bourgault M, et al. Water use efficiency of common bean and green gram grown using alternate furrow and deficit irrigation[J]. *Agricultural Water Management*, 2006, 86: 259—268.

## Optimal irrigation of siberian wildrye grass in farming-pastoral ecotone of North China and its effect on yield

Wang Hao, Li Zizhong\*

(College of Resources and Environmental Sciences, China Agricultural University, Beijing 100193, China)

**Abstract:** In order to investigate the effects of winter irrigation and irrigation during the key growing stage on crop growth and forage yield of siberian wildrye grass (*Elymus sibiricus* L.), field experiments were conducted in Bashang Plateau in the farming-pastoral ecotone of North China during 2005.10-2007.10. Rainfall, soil water content, plant height, leaf area index (LAI), biomass and forage yield were measured in field plots under no irrigation (CK), winter irrigation (W1), irrigation during key growing stage (W2), and the combination of W1 and W2 (W3). The results showed that forage yield was dominated by the first cutting due to the poor regrowing ability. The single irrigation during the key growing stage significantly improved the plant height, LAI and biomass of the first harvest. Forage yield of the first cutting under W2 was above 4500 kg/hm<sup>2</sup>, which was increased by 104% and 391%, respectively, in two years compared with CK. The grass under W1 turned green earlier in the following spring, and the forage yield of the first cutting was increased by 53% and 87%, respectively. There was no significant difference between forage yields under W3 and W2. Therefore, single irrigation during the key growing stage is recommendable for siberian wildrye grass in this region. In addition, the biomass and LAI increased with plant height linearly, which provides evidence for simulating the biomass and LAI of siberian wildrye grass.

**Key words:** winter irrigation, irrigation during key growing stage, yield, siberian wildrye grass (*Elymus sibiricus* L.)