

# 白羊草与达乌里胡枝子混播草地不同 降雨年份土壤水分利用状况

舒佳礼<sup>1</sup>, 王京<sup>1</sup>, 高志娟<sup>1</sup>, 陈吉<sup>1</sup>, 丁文利<sup>1</sup>, 徐炳成<sup>1,2</sup>

(1. 西北农林科技大学 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西 杨凌 712100;

2. 中国科学院 水利部 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100)

**摘要:**为合理利用黄土丘陵区优良乡土草种,探索人工草地建设中乡土草种的最佳混播比例,选取白羊草(*Bothriochloa ischaemum*)和达乌里胡枝子(*Lespedeza davurica*)为研究材料,采用生态替代法,按照白羊草与达乌里胡枝子行比设置了7种组合比例(即0:10,2:8,4:6,5:5,6:4,8:2和10:0),比较研究了丰水年(2011年,降雨量663.4 mm)与偏旱年(2012年,降雨量458.2 mm)混播草地土壤水分季节变化特征、年度生物量 and 水分利用效率。结果表明,白羊草与达乌里胡枝子混播草地土壤水分消耗和补充与混播比例密切相关,但主要受年度降雨量及其季节分配的影响。在2011年,充沛的降雨可补充20—260 cm土层土壤水分,并弱化了不同混播比例和土层间土壤水分的时空差异。不同降雨量年份里,白羊草和达乌里胡枝子在6:4与8:2两混播比例下的地上生物量 and 水分利用效率均显著较高。

**关键词:** 白羊草; 达乌里胡枝子; 混播比例; 土壤储水量; 水分利用效率

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2014)03-0075-07

中图分类号: Q152.7<sup>+</sup>5

DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2014.03.015

## Soil Water Use of *Bothriochloa Ischaemum* and *Lespedeza Davurica* Mixture Grassland in Two Years with Different Rainfall Amounts

SHU Jia-li<sup>1</sup>, WANG Jing<sup>1</sup>, GAO Zhi-juan<sup>1</sup>, CHEN Ji<sup>1</sup>, DING Wen-li<sup>1</sup>, XU Bing-cheng<sup>1,2</sup>

(1. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau,

Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. Institute of Soil and Water

Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China)

**Abstract:** To rationally use native species in the loess hilly-gully region and find appropriate mixture ratio of native species for artificial grassland construction, *Bothriochloa ischaemum* and *Lespedeza davurica* were sowed by the seven row ratios of 0:10, 2:8, 4:6, 5:5, 6:4, 8:2 and 10:0 in a terraced field. The seasonal soil moisture characteristics, yearly aboveground biomass and water use efficiency were investigated and compared in two years with different rainfall amounts (663.4 mm in 2011 and 458.2 mm in 2012). Results indicated that soil water consumption and replenishment were closely related with the mixture ratio of the two species in the mixture grassland, mainly affected by yearly rainfall amount and seasonal distribution. In 2011, soil water supplement reached the 20—260 cm soil layer, and the spatial and temporal difference of soil moisture between mixture ratios and soil layers were reduced because of plentiful rainfall in the rainy season. Both in 2011 and 2012, *Bothriochloa ischaemum* and *Lespedeza davurica* mixtures at 6:4 and 8:2 ratios had higher aboveground biomass production and water use efficiency.

**Keywords:** *Bothriochloa ischaemum*; *Lespedeza davurica*; mixture ratio; soil water storage; water use efficiency

半干旱黄土丘陵区是黄土高原生态最为脆弱的地区之一,水分是限制该区植物生长、分布和植被恢

复最主要的制约因子<sup>[1]</sup>。多年的研究表明,通过植种草恢复植被是该区防治水土流失,改善生态环境最

收稿日期:2013-07-15

修回日期:2013-09-06

资助项目:国家自然科学基金项目“黄土丘陵区天然草地群落及其优势种对脉冲降雨的响应”(41371509);教育部新世纪优秀人才计划“黄土丘陵区草地群落优势种生物量形成对降雨格局变化的响应”(NECT-11-0444)

作者简介:舒佳礼(1988—),男(汉族),湖北省恩施市人,硕士研究生,研究方向为植物水分生理生态。E-mail: august\_shu@163.com。

通信作者:徐炳成(1973—),男(汉族),安徽省肥东县人,博士研究生,研究员,主要从事草地建设与植被恢复的研究。E-mail: Bcxu@ms.iswc.ac.cn。

有效的措施。作为植被建设的重要组成部分,人工草地不仅具有良好的生态效益,也是该区发展草地畜牧业的重要物质基础。在长期的草地建设过程中,由于过度追求高生物量和不合理的草种配置等,人工草地常因土壤水分过耗出现土壤旱化、早衰等为主要特征的退化现象<sup>[2-5]</sup>。因此,为保证人工草地建设和土壤水分利用的可持续性,正确选择植被类型、适度发展草地生产力以高效利用有限降雨,就显得尤为重要<sup>[6]</sup>。

豆禾牧草混播后因豆科植物具有生物固氮作用,能够改善草地土壤质量和提高土壤肥力,并提高饲草产量和饲草品质以及水分利用效率<sup>[6-8]</sup>等,使其成为旱区建设人工草地的首选类型<sup>[9]</sup>。但在建立豆禾混播草地时,仍需要考虑豆禾牧草的高产性与稳定性、二者间的互利关系等因素<sup>[10]</sup>。与外来引进种相比,地带性乡土草优势种由于经历长期自然选择,具有良好的区域环境生态适应性与种间兼容性,加强对其生产力与生态适应性研究,对种质资源保护和合理开发利用具有重要意义<sup>[11]</sup>。在黄土高原半干旱地区,土壤水分条件的优劣是植物生产力高低的重要标志,由于植物吸收和利用的土壤水分主要来源于天然降水,因此提高混播草地生产力需要考虑植物本身适应性特征和土壤水分条件<sup>[12-13]</sup>。通过比较不同水文年(丰水年、平水年、干旱年)豆禾牧草混播草地的土壤水分利用特征与差异,对控制草地密度和生产力、提高水资源利用效率、优化草种配置等具有重要意义<sup>[14]</sup>。

白羊草(*Bothriochloa ischaemum*)和达乌里胡枝子(*Leapedeza davurica*)为黄土丘陵区较常见的两种优良乡土牧草,前者为多年生禾本科植物,后者为多年生豆科草本状半灌木,均具有耐旱、耐践踏、固土保水能力强等特性,在维持区域生态景观和水土保持中发挥着重要作用。本研究主要从不同降雨年份出发,比较白羊草与达乌里胡枝子不同混播比例下的土壤水分特征,以期寻求二者合理混播组合比例以及该区人工草地建设中乡土草种合理利用提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

试验地位于陕西省安塞县中国科学院安塞水土保持综合试验站,地理位置为 109°19'23"E,36°51'31"N,海拔为 1 068~1 309 m。气候属暖温带半干旱气候,年均温为 8.8℃,最冷月 1 月平均温度 -6.9℃,最热月 7 月平均温度 22.6℃,全年≥10℃积温 3 113.9℃,无霜期 159 d。年平均降雨量 540 mm,季节分布不均,其中生长季 4—10 月占 90%左右,干燥度 1.14,

主要土壤类型为黄绵土。植被属暖温带半干旱森林草原区,天然植被中以中旱生草本植物群落占绝对优势,其中分布较广的植物有铁杆蒿(*Artemisia sacrorum*)、达乌里胡枝子、白羊草、长芒草(*Stipa bungeana*)、芨芨草(*Artemisia giraldii*)等。人工植被以紫花苜蓿(*Medicago sativa*)、沙打旺(*Astragalus Laxmannii*)、柠条(*Caragana korshinskii*)、油松(*Pinus tabulaeformis*)等为主,其中沙打旺和苜蓿为当地人工草地建设的主要种。

### 1.2 试验材料与设计

试验材料为白羊草和达乌里胡枝子,种子采自该区天然草地群落。试验地位于山地梯田,于 2009 年 7 月 15 日建立。白羊草和达乌里胡枝子混播草地采用条播播种,播种量均为 15 kg/hm<sup>2</sup>,行距 20 cm,东西走向。混播草地采用生态替代法设计,即保持种群总行数不变而改变组成物种行比,按照白羊草(B)和达乌里胡枝子(D)行比共设置了 7 种组合比例组合(B<sub>0</sub>D<sub>10</sub>,B<sub>2</sub>D<sub>8</sub>,B<sub>4</sub>D<sub>6</sub>,B<sub>5</sub>D<sub>5</sub>,B<sub>6</sub>D<sub>4</sub>,B<sub>8</sub>D<sub>2</sub>,B<sub>10</sub>D<sub>0</sub>),即白羊草与达乌里胡枝子混合比例分别为 0:10,2:8,4:6,5:5,6:4,8:2,10:0),每种比例重复 3 次,共 21 个小区,小区面积为 3 m×3 m,完全随机区组排列。于 2010 年 4 月在每小区几何中心处理设土壤水分监测中子管,深度 380 cm。试验期间不施肥,不灌溉,在生长季内每月中旬适时清除杂草,每年年底生育期结束时全部齐地刈割。

### 1.3 测定项目及方法

土壤体积含水量:采用中子仪(CNC503B,北京核业超能科技有限公司)测定。其中 0—200 cm 每 10 cm 测定 1 次,200—380 cm 每 20 cm 测定 1 次。从 4 月返青期至 10 月枯黄期每月中旬连续监测,根据中子仪测量值换算成体积含水量。土壤储水量公式为<sup>[3]</sup>:

$$W = \sum_{i=1}^n \text{VSWC}_i \times H_i \quad (1)$$

式中:W——土壤储水量(mm);VSWC——每层土壤体积含水量(%);H——土层厚度(cm);i——土层序数;n——土层总数。本试验中 n=29,土层深度 H<sub>1-20</sub> 为 10 cm,H<sub>21-29</sub> 为 20 cm。

由于试验在山地梯田,草地阶段耗水量采用简化公式计算<sup>[15]</sup>:

$$\text{ET} = W_i + R - W_{i+1} \quad (2)$$

式中:ET——蒸散量(mm);W<sub>i</sub>——生育初期土壤储水量(mm);W<sub>i+1</sub>——生育末期土壤储水量(mm);R——降水量(mm)。降雨数据由安塞站山地气象观测场测得。

草地生物量:采用刈割收获法测定,于生长季末在每个小区随机选取 0.5 m 样草带,刈割称取鲜重后于 105 °C 杀青 5 min,80 °C 烘干至恒重。根据各小区中两草种组合比例折算单位面积白羊草和达乌里胡枝子总生物量。各草地小区水分利用效率为地上生物量与年度耗水量之比。

#### 1.4 数据统计与分析

试验数据采用 Microsoft Excel 2007 软件进行处理,不同组合比例间和年、季间土壤含水量、耗水量、地上部分生物量以及水分利用效率等差异显著性采用 ANOVA 分析(SPSS 11.0,  $p=0.05$ )。

## 2 结果与分析

### 2.1 生长季降雨量

研究区多年平均降雨量为 528.3 mm(1971—2004 年),其中作物生长季 4—10 月降雨量呈单峰曲线,峰值在 8 月,降雨主要集中在 7—9 月,占全年的 60.1%(图 1)。本试验期间,2011 年降雨量为 663.4 mm,高出多年平均 25.6%,为典型丰水年,其中 4—10 月降雨 579.4 mm。2012 年总降雨量 458.2 mm,比多年平均少 13.3%,为偏旱年份,4—10 月降雨为 442.8 mm。2011 和 2012 年 7—9 月降雨量分别为 431.0 和 303.4 mm,占全年总降雨量的 65.0% 和 66.2%,均高于多年平均值(图 1)。

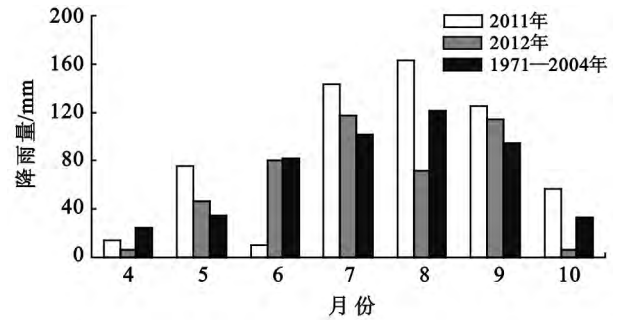
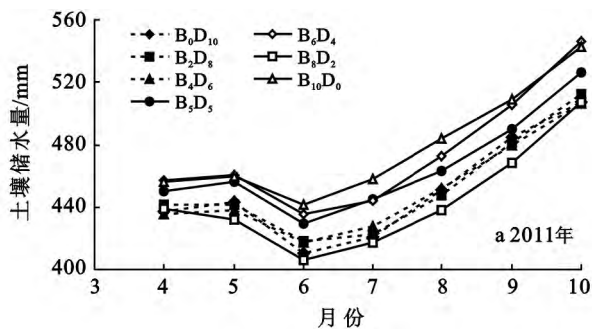


图 1 2011—2012 年生育期降雨量月分布

### 2.2 土壤水分

2.2.1 土壤储水量月动态 2011 和 2012 年的 4—6 月,各组合比例草地 0—380 cm 土壤储水量变化趋势相同,均表现为土壤储水量随时间持续下降。在 7—10 月,2011 年各组合比例草地土壤储水量整体呈持续增加,平均每月增加为  $24.6 \pm 1.7$  mm;2012 年 7—9 月土壤储水量月增加  $6.0 \pm 1.8$  mm,10 月略微减少(图 2)。2011 年,  $B_8D_2$  比例下土壤储水量始终最低,  $B_6D_4$  和  $B_{10}D_0$  比例显著最高 ( $p < 0.05$ ), 4—10 月平均土壤储水量高低顺序为:  $B_{10}D_0$  (478.6 mm)  $> B_6D_4$  (474.6 mm)  $> B_5D_5$  (465.6 mm)  $> B_4D_6$  (452.3 mm)  $> B_2D_8$  (450.8 mm)  $> B_0D_{10}$  (450.6 mm)  $> B_8D_2$  (444.1 mm)。2012 年,土壤储水量最低的比例仍为  $B_8D_2$  (493.7 mm),最高仍为  $B_6D_4$  (531.9 mm) 和  $B_{10}D_0$  (529.6 mm)。

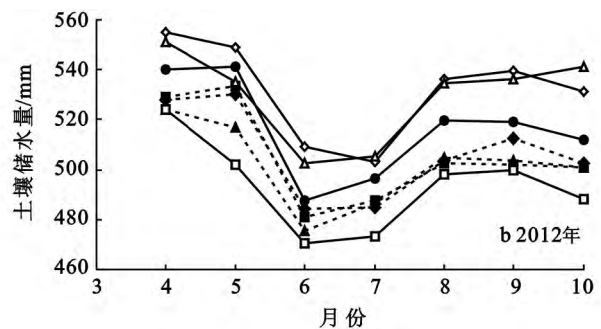


图 2 2011 和 2012 年土壤储水量月动态

2.2.2 土壤含水量剖面分布 除 0—20 cm 土层外,2011 年 10 月生育期结束时各层土壤含水量较生育初期(4 月)均显著提高,而 2012 年整体较低(图 3)。2011 年,各组合比例草地生育期前后平均土壤体积含水量变化趋势基本相同,均表现为土壤表层(0—10 cm)及下层(260—380 cm)无明显变化,20—260 cm 土层土壤体积含水量在 10 月显著高于 4 月,该层生育期内(4—10 月)降雨补充量占 0—380 cm 土层总补充量的 95.1%~99.4%。2012 年各组合比例草地生育期前后 0—20 cm 土层土壤体积含水量无明显变化,

20 cm 以下普遍降低,但不同比例下变化土层不同,其中  $B_0D_{10}$ ,  $B_2D_8$ ,  $B_4D_6$  和  $B_5D_5$  比例下土壤含水量明显降低的土层为 30—70 和 150—360 cm;  $B_6D_4$  比例下仅 240 cm 以下土层明显减少;  $B_8D_2$  比例下整体减少,幅度最大土层为 160—360 cm;  $B_{10}D_0$  土壤含水量生育期前后无明显变化。

2.2.3 土壤水分消耗与补偿 2011—2012 年生长季期间,各组合比例草地均在 8 月达到土壤水分最大利用深度(表 1)。与 2012 年同期相比,2011 年土壤水分最大利用深度较浅,土壤水分降低量较小(5 月除外)。

2011 年  $B_0D_{10}$ ,  $B_2D_8$  和  $B_8D_2$  组合比例下土壤水分最大利用深度至 170—180 cm,  $B_1D_6$ ,  $B_6D_4$  和  $B_{10}D_0$  比例下最大利用深度较浅, 约为 150 cm。2011 年 5—8 月, 各组合比例土壤储水量降低量大小顺序为:  $B_2D_8$  (52.0 mm) >  $B_0D_{10}$  (50.7 mm) >  $B_8D_2$  (50.6 mm) >  $B_5D_5$  (48.5 mm) >  $B_4D_6$  (47.3 mm) >  $B_6D_4$  (44.8 mm)

>  $B_{10}D_0$  (42.3 mm)。2012 年,  $B_0D_{10}$  和  $B_8D_2$  比例下最大利用深度分别为 220 和 240 cm,  $B_6D_4$  和  $B_{10}D_0$  均为 170 cm, 其他比例均为 190 cm。2012 年 5—8 月各比例土壤储水量降低量大小顺序为:  $B_8D_2$  (80.4 mm) >  $B_2D_8$  (72.7 mm) >  $B_0D_{10}$  (69.4 mm) >  $B_5D_5$  (63.4 mm) >  $B_4D_6$  (58.9 mm) >  $B_{10}D_0$  (58.0 mm) >  $B_6D_4$  (48.2 mm)。

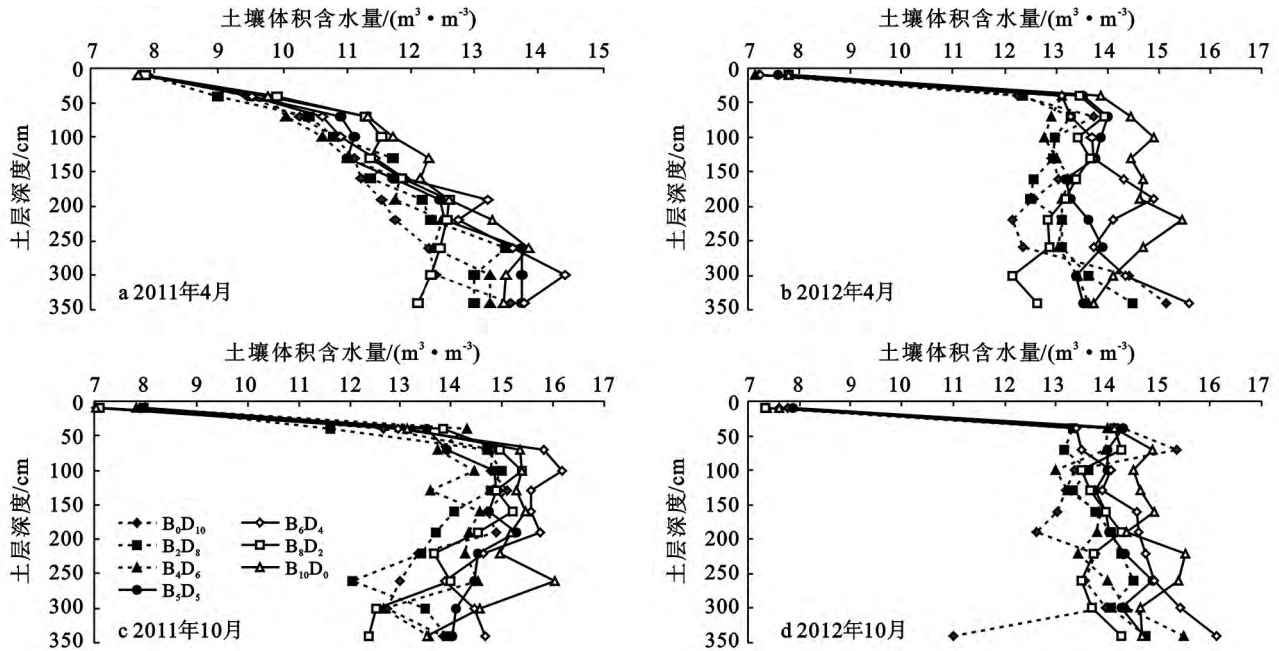


图 3 2011 和 2012 年生长季初期与末期土壤体积含水量剖面分布

表 1 2011 和 2012 年各组合比例草地土壤含水量降低土层与土壤储水量降低量

年份	组合比例	土壤含水量降低土层/cm				土壤储水量降低量/mm			
		5月	6月	7月	8月	5月	6月	7月	8月
2011	$B_0D_{10}$	0—80	0—100	70—150	120—170	13.9	26.0	4.2	6.6
	$B_2D_8$	0—70	0—100	70—140	110—180	13.7	27.5	6.3	4.5
	$B_4D_6$	0—70	0—90	70—130	110—150	15.9	24.2	4.2	3.0
	$B_5D_5$	0—80	0—80	70—140	110—160	14.2	25.0	5.0	4.3
	$B_6D_4$	0—90	0—90	70—130	120—150	14.4	23.5	5.6	1.3
	$B_8D_2$	0—80	0—110	60—130	100—170	13.0	25.8	6.3	5.5
	$B_{10}D_0$	0—80	0—90	80—110	120—150	16.1	20.7	3.1	2.4
2012	$B_0D_{10}$	0—80	0—140	80—170	120—220	12.1	37.4	13.5	6.4
	$B_2D_8$	0—70	0—160	80—170	130—190	7.2	42.8	14.3	8.4
	$B_4D_6$	0—70	0—140	90—160	130—190	8.2	34.8	11.4	4.5
	$B_5D_5$	0—80	0—130	90—140	120—190	8.8	38.9	9.3	6.4
	$B_6D_4$	0—70	0—130	90—150	150—170	4.7	33.8	5.5	4.6
	$B_8D_2$	0—80	0—150	80—180	190—240	13.6	43.2	14.9	8.7
	$B_{10}D_0$	0—70	0—120	80—140	140—170	16.6	26.9	9.7	4.8

2011—2012 年, 各组合比例草地的土壤水分均在 7 月开始得到补偿(图 2), 补偿深度在 10 月达到最大值, 但补偿深度及土壤水分增加量因比例不同存在差异(表 2)。2011 年, 各组合比例草地土壤水分最大

补偿深度顺序为:  $B_8D_2$  (320 cm) >  $B_0D_{10}$  (300 cm) >  $B_2D_8$  (280 cm) >  $B_6D_4$  (280 cm) >  $B_4D_6$  (270 cm) >  $B_5D_5$  (260 cm) >  $B_{10}D_0$  (260 cm), 其中  $B_6D_4$  在 7 和 8 月土壤水分增加量显著最高, 补偿层次分别为 0—70 和 0—110 cm, 而  $B_8D_2$  在 9 和 10 月增加量显著最高,

补偿层次分别为 80—180 和 140—320 cm。2012 年, 至 240 和 260 cm,其他比例间差异不明显。以  $B_8D_2$  和  $B_6D_4$  比例下土壤水分补偿深度最大,分别

表 2 2011 和 2012 年各组合比例草地土壤含水量增加土层与土壤储水量增加量

年份	组合比例	土壤含水量增加土层/cm				土壤储水量增加量/mm			
		7 月	8 月	9 月	10 月	7 月	8 月	9 月	10 月
2011	$B_0D_{10}$	0—60	0—110	90—160	130—300	6.2	30.1	32.9	27.4
	$B_2D_8$	0—60	0—100	80—150	130—280	5.8	36.2	35.1	24.2
	$B_4D_6$	0—60	0—100	80—170	160—270	7.5	35.7	26.0	20.4
	$B_5D_5$	0—60	0—100	80—170	140—270	7.8	37.6	33.7	22.6
	$B_6D_4$	0—70	0—110	90—170	100—280	12.3	35.2	31.5	25.7
	$B_8D_2$	0—60	0—90	80—180	140—320	5.7	41.9	35.3	29.6
	$B_{10}D_0$	0—70	0—110	100—190	150—260	12.7	36.9	29.6	22.1
2012	$B_0D_{10}$	0—70	0—110	70—140	120—220	19.1	26.5	11.0	7.2
	$B_2D_8$	0—70	0—100	70—130	120—220	22.2	23.1	9.9	8.7
	$B_4D_6$	0—80	0—120	60—130	140—190	22.2	26.0	9.0	5.4
	$B_5D_5$	0—80	0—110	90—140	140—220	22.7	33.4	8.9	5.5
	$B_6D_4$	0—80	0—140	80—140	130—240	24.9	32.2	10.2	10.3
	$B_8D_2$	0—70	0—120	60—140	120—260	22.3	29.2	9.7	6.7
	$B_{10}D_0$	0—110	0—130	70—130	140—220	38.6	33.3	10.0	10.3

### 2.3 水分利用效率

2011—2012 年,除  $B_0D_{10}$  和  $B_2D_8$  比例间草地上生物量相对较小且随年份变化出现显著差异外,其他比例下草地上生物量年份间无显著性差异(表 3)。草地耗水量总体以 2011 年显著高于 2012 年,但

水分利用效率相反。2 a 间,水分利用效率较高的比例均为  $B_6D_4$ ,  $B_8D_2$  和  $B_{10}D_0$ ,较低的比例均为  $B_2D_8$  和  $B_0D_{10}$ 。整体而言, $B_6D_4$  和  $B_8D_2$  比例具有高生物量、高耗水量以及高水分利用效率(表 3)。

表 3 2011 和 2012 年不同组合比例下草地上部生物量、耗水量与水分利用效率

组合比例	地上部生物量/( $10^3 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ )		耗水量/mm		水分利用效率/( $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{mm}^{-1}$ )	
	2011 年	2012 年	2011 年	2012 年	2011 年	2012 年
$B_0D_{10}$	4.7bc(a)	3.77c(b)	509.3a(a)	467.5bc(b)	9.21b(a)	8.17c(a)
$B_2D_8$	3.82c(b)	4.42b(a)	508.6a(a)	470.2b(b)	7.45c(b)	9.46c(a)
$B_4D_6$	4.4bc(a)	4.81b(a)	508.0a(a)	465.0bc(b)	8.78b(b)	10.39b(a)
$B_5D_5$	5.65a(a)	5.85a(a)	503.5ab(a)	470.0b(b)	11.15ab(b)	12.46ab(a)
$B_6D_4$	6.02a(a)	6.50a(a)	490.0b(a)	465.5bc(b)	12.27a(b)	14.08a(a)
$B_8D_2$	6.40a(a)	6.51a(a)	511.0a(a)	477.7a(b)	12.51a(b)	13.64a(a)
$B_{10}D_0$	5.83a(a)	6.01a(a)	493.5b(a)	451.9c(b)	11.30ab(b)	13.36a(a)

注:同列数字后不同小写字母表示比例间差异显著( $p < 0.05$ );括号内不同字母表示年份间差异显著( $p < 0.05$ )。

## 3 结论

在半干旱黄土高原地区,土壤水分主要受降雨、土壤蒸发和植物蒸腾等因素影响,表现出较明显的季节动态和年份差异<sup>[16-17]</sup>。大气降水作为土壤水分的主要来源,直接影响土壤水分含量的高低和时空变化特征<sup>[18]</sup>。2011 与 2012 年由于降雨季节性分布的差异,造成植被同一生育期的耗水量存在明显差异:2011 年植被各生育期耗水呈单峰曲线,耗水高峰出现在 8 月,而 2012 年植被耗水曲线呈“M”型,耗水高峰

在 7 和 9 月出现,趋势与降雨分布基本相同(图 1),即植被生育期耗水量与同期降水量呈显著正相关<sup>[15]</sup>。在降雨、土壤蒸发和植物蒸腾等因素的综合影响下,各组合比例土壤水分季节动态可分为水分相对稳定期(4—5 月),水分消耗期(5—6 月)和水分补给和波动期(7—10 月)。这种变化是 2011—2012 年降雨量与季节分配差异以及两混播草地植物的生长节律的结果:在降雨相对较少的 4—6 月,随着植物返青后快速生长,耗水量增大,气温上升导致地表蒸发增加等,使得该阶段土壤储水量呈缓慢降低;在降雨集中的

7—9 月,虽然植物均处生长旺期,耗水量大,但各比例下草地土壤水分均得到不同程度补充。在降水较丰富的 2011 年,各组合比例草地雨季期间土壤水分都以补充为主,其中以  $B_8D_2$  和  $B_0D_{10}$  补充深度最大;在降雨较少的 2012 年,各组合比例草地的土壤水分也得到一定补充,但总体仍低于生育期开始时土壤储水量。

在不同降水年型下,土壤水分能否得到补给以及补给程度取决于年降水量的大小和分布,其中雨季是半干旱地区土壤水分的主要补给期,但降水入渗深度一般不超过 300 cm<sup>[13]</sup>。2011 年,各组合比例下生育期末各比例 20—260 cm 土壤水分补偿量占 0—380 cm 总补偿量的 95% 以上,因此雨季富余水分主要下渗补充到 20—260 cm 土层,各比例间土壤水分的差异低于 2012 年,出现一致性的变化趋势,主要是由于充沛的降雨补偿减小了土壤水分的空间变异<sup>[19]</sup>。

植物对土壤水分的利用深度往往与其根系的分布深度相一致<sup>[4-5]</sup>。在混播草地群落中,土壤含水量剖面分布与混播植物的水分生理生态特征及根系分布密切相关<sup>[20]</sup>。有研究表明,在豆禾混播体系中,豆科植物通过生物固氮可促进禾本科植物根系生长,加之相互间的竞争等会扩大根系利用水分的空间,促进植物对下层土壤水分的利用<sup>[21]</sup>。白羊草为  $C_4$  须根系禾本科植物,其根系主要分布在 0—30 cm<sup>[22]</sup>;达乌里胡枝子为  $C_3$  直根系豆科植物,根系可达 140 cm<sup>[23]</sup>。在相同生长环境条件下,白羊草的水分利用效率要高于达乌里胡枝子<sup>[24]</sup>。本试验结果显示,单播白羊草 ( $B_{10}D_0$ ) 土壤储水量显著高于单播达乌里胡枝子(即  $B_0D_{10}$ )。各混播比例中随着达乌里胡枝子比例的增加,土壤耗水深度和耗水量增加,这与达乌里胡枝子根系分布深度和耗水量大有关。除  $B_8D_2$  土壤储水量相对较低外(图 2),其他各混播群落均表现为白羊草所占比例越大其土壤储水量越高。

王淑芬等<sup>[25]</sup>比较研究不同降水年型冬小麦水分利用效率得出,丰水年里随着耗水量增加,水分利用效率反而下降。本研究中,各组合比例 2012 年的水分利用效率均要显著性高于 2011 年,这主要由于 2011 年耗水量显著较高,而生物量与 2012 年无显著差异有关。2 a 内白羊草所占比例较高的混播草地水分利用效率较高。前期的研究表明,盆栽条件下白羊草和达乌里胡枝子虽然表现出激烈的种间竞争,但二者混播仍有明显的互补效应,其中白羊草与达乌里胡枝子在 10:2 混播下具有显著最高的生物量和水分利用效率<sup>[26]</sup>。自然条件下对混播草地中白羊草光合日变化测定发现, $B_6D_4$  与  $B_8D_2$  比例下其光合速率和

叶片水分利用效率相对较高<sup>[27]</sup>。本研究结果表明,白羊草与达乌里胡枝子混播草地土壤水分消耗和补充与混播比例密切相关,但主要受年度降雨量及其季节分配的影响。不同降雨量年份里,白羊草和达乌里胡枝子在  $B_6D_4$  与  $B_8D_2$  两混播比例下的地上生物量和水分利用效率均显著较高。

#### [参 考 文 献]

- [1] 郭忠升. 半干旱区柠条林利用土壤水分深度和耗水量[J]. 水土保持通报, 2009, 29(5): 69-72.
- [2] 杨维西. 试论我国北方地区人工植被的土壤干化问题[J]. 林业科学, 1996, 32(1): 78-84.
- [3] 李耀林, 郭忠升. 平茬对半干旱黄土丘陵区柠条林地土壤水分的影响[J]. 生态学报, 2011, 31(10): 2727-2736.
- [4] 程积民, 万惠娥, 王静, 等. 黄土丘陵区沙打旺草地土壤水分过耗与恢复[J]. 生态学报, 2004, 24(12): 2979-2983.
- [5] 程积民, 万惠娥, 王静. 黄土丘陵区紫花苜蓿生长与土壤水分变化[J]. 应用生态学报, 2005, 16(3): 435-438.
- [6] 徐炳成, 山仑, 陈云明. 黄土高原半干旱区植被建设的土壤水分效应及其影响因素[J]. 中国水土保持科学, 2003, 1(4): 32-35.
- [7] 张晓红, 徐炳成, 李凤民. 黄土塬区三种豆科牧草的土壤养分剖面分布特征与平衡[J]. 中国生态农业学报, 2008, 16(4): 810-817.
- [8] 王旭, 曾昭海, 胡跃高, 等. 豆科与禾本科牧草混播效应研究进展[J]. 中国草地学报, 2007, 29(4): 92-99.
- [9] 郑伟, 朱进忠, 库尔班, 等. 不同混播方式下豆禾混播草地种间竞争动态研究[J]. 草地学报, 2010, 18(4): 568-575.
- [10] 石永红, 符义坤, 李阳春. 半荒漠地区绿洲混播牧草群落稳定性与调控研究[J]. 草业学报, 2000, 9(3): 1-7.
- [11] 徐炳成, 山仑, 李凤民. 黄土丘陵半干旱区引种禾草柳枝稷的生物量与水分利用效率[J]. 生态学报, 2005, 25(9): 2206-2213.
- [12] 郭忠升, 邵明安. 半干旱区人工林草地土壤旱化与土壤水分植被承载力[J]. 生态学报[J], 2003, 23(8): 1640-1647.
- [13] 张雷明, 上官周平. 黄土高原土壤水分与植被生产力的关系[J]. 干旱区研究, 2002, 19(4): 59-63.
- [14] 张正栋. 黄土高原半干旱区农田土壤水分动态及其调控: 以甘肃为例[J]. 西北师范大学学报: 自然科学版, 1997, 33(2): 69-74.
- [15] 姚玉璧. 高原亚寒带湿润草甸区植被生育期耗水量与耗水规律研究[J]. 中国农业气象, 2000, 21(1): 20-22.
- [16] Qiu Yang, Fu Bojie, Wang Jun, et al. Spatial variability of soil moisture content and its relation to environmental indices in a semi-arid gully catchment of the Loess Plateau, China[J]. Journal of Arid Environments,

- 2001,49(4):723-750.
- [17] 李洪建,王孟本,柴宝峰. 黄土高原土壤水分变化的时空特征分析[J]. 应用生态学报,2003,14(4):515-519.
- [18] 李锋瑞,赵松岭. 陇东黄土旱塬不同降水年型作物土壤水分的时空分异特征[J]. 兰州大学学报:自然科学版,1996(2):99-108.
- [19] Chen Hongsong, Shao Mingan, Li Yuyuan. The characteristics of soil water cycle and water balance on steep grassland under natural and simulated rainfall conditions in the Loess Plateau of China[J]. Journal of Hydrology, 2008,360(1):242-251.
- [20] 王满意,梁宗锁,杨超,等. 陕北丘陵沟壑区不同立地白羊草水分特征及群落生物量研究[J]. 西北农林科技大学学报:自然科学版,2008,36(1):93-100.
- [21] 邹文秀,韩晓增,江恒,等. 东北黑土区降水特征及其对土壤水分的影响[J]. 农业工程学报,2011,27(9):196-202.
- [22] 王会梅,徐炳成,李凤民,等. 黄土丘陵区白羊草和柳枝稷适应性生长的比较[J]. 干旱地区农业研究,2005,23(5):35-40.
- [23] 孙启忠,韩建国,桂荣. 科尔沁沙地达乌里胡枝子生物量研究[J]. 中国草地,2001,23(4):21-26.
- [24] 徐炳成,山仑,李凤民. 半干旱黄土丘陵区五种植物的生理生态特征比较[J]. 应用生态学报,2007,18(5):990-996.
- [25] 王淑芬,张喜英,裴冬. 不同供水条件对冬小麦根系分布、产量及水分利用效率的影响[J]. 农业工程学报,2006,22(2):27-32.
- [26] Xu Bingcheng, Xu Weizhou, Huang Jin, et al. Biomass production and relative competitiveness of a  $C_3$  legume and a  $C_4$  grass co-dominant in the semiarid Loess Plateau of China[J]. Plant and Soil, 2011,347(1/2):25-39.
- [27] 王京,徐炳成,高志娟,等. 黄土丘陵区白羊草与达乌里胡枝子混播的光合生理日变化研究[J]. 草地学报,2012,20(4):692-698.

(上接第49页)

- [14] 李建军,邵生俊,杨扶银,等. 防渗墙粗粒土槽孔泥皮的抗渗性试验研究[J]. 岩土力学,2012,33(4):1087-1093.
- [15] 王盼,朱首军,马宁,等. 重粉质壤土区泥浆浓度对筑坝泥浆性能的影响[J]. 土壤通报,2013,44(3):543-550.
- [16] 谢颀,王海宁,马良军. 高黏粒黄土地区水坠坝应用聚乙烯微孔波纹管技术研究[J]. 青海科技,2001,8(3):40-43.
- [17] 王启睿,史海荣,梁振科,等. 聚乙烯微孔波纹管在堡子沟水坠坝排渗中的应用及效果[J]. 中国水土保持,1994(3):25-27,32.
- [18] 汤茗辉,曹善和,刘振声,等. 阳洼水坠坝聚乙烯微孔波纹管排渗试验研究[J]. 中国水土保持,1992(5):22-28.
- [19] 孟庆山,汪稔,雷学文,等. 动力排水固结法加固饱和软土地基效果研究[C]//全国岩土与工程学术大会论文集:下册. 2003.
- [20] 韩尚宇,洪宝宁,李红. 排水固结法处理软土路基的质量改善措施优选分析[J]. 武汉理工大学学报:交通科学与工程版,2009,33(2):223-226.

(上接第68页)

- [7] 杨佐涛. 戈壁与绿洲内的风向风速关系:以新疆策勒县为例[J]. 中国沙漠,1990,10(3):33-39.
- [8] 刘铭庭. 新疆策勒县绿洲外围固沙植物带的建设[J]. 中国沙漠,1994,14(2):74-77.
- [9] 陈智,麻硕士,赵永来,等. 保护性耕作农田地表风沙流特性[J]. 农业工程学报,2010,26(1):118-121.
- [10] 刘目兴,刘连友. 农田休闲期作物留茬对近地表风场的影响[J]. 农业工程学报,2009,25(9):295-299.
- [11] 赵哈林,赵学勇,张铜会. 我国北方农牧交错带沙漠化的成因、过程和防治对策[J]. 中国沙漠,2000,20(S):22-28.
- [12] 张春民,吴文奇,奈民夫. 半干旱区沙质农田土壤风蚀防治的效应研究[J]. 内蒙古林业科技,2009,35(1):9-12.
- [13] 何文清,赵彩霞,高旺盛,等. 不同土地利用方式下土壤风蚀主要影响因子研究:以内蒙古武川县为例[J]. 应用生态学报,2005,16(11):2092-2096.
- [14] 赵永来,陈智,孙越超,等. 作物残茬覆盖农田地表土壤防风蚀效应实验[J]. 农业机械学报,2011,42(6):38-42.
- [15] 唐玉龙,安志山,张克存,等. 不同结构单排林带防风效应的风洞模拟[J]. 中国沙漠,2012,32(3):647-654.