

# 小麦和苜蓿套作种植对土壤水分及 作物水分利用效率的影响

李恩慧<sup>1</sup>, 穆阳阳<sup>1</sup>, 何亚男<sup>1</sup>, 张晓红<sup>1</sup>, 杨慎骄<sup>2</sup>

(1.山西师范大学 地理科学学院, 山西 临汾 041000;

2.中国农业科学院 农田灌溉研究所 河南商丘农田生态系统国家野外科学观测研究站, 河南 商丘 476000)

**摘 要:**在山西省中南部,为探究小麦单作、苜蓿单作和小麦苜蓿间套作不同作物生长期土壤剖面水分变化,分析了各处理的阶段性土壤剖面耗水状况及其各处理的系统作物水分利用效率的差异。结果表明:3月中旬和10月上旬不同处理平均土壤含水量均高于6月下旬,且不同生长期土壤含水量和土壤储水量大小顺序均为小麦单作>小麦苜蓿间套作>苜蓿单作。在小麦和苜蓿共同生长期(3—6月份)内小麦苜蓿间套作群体生物量(产量)5 742.64 kg/hm<sup>2</sup>比小麦单作提高了17.67%,较苜蓿单作提高了44.07%,且小麦苜蓿间套作系统水分利用效率27.38 kg/(mm·hm<sup>2</sup>)较小麦单作和苜蓿单作水分利用效率分别提高了16.98%和62.38%。在3—10月小麦苜蓿间套作生物量(产量)8 036.17 kg/hm<sup>2</sup>较小麦单作和苜蓿单作生物量(产量)分别提高了41.17%和31.49%,其水分利用效率15.73 kg/(mm·hm<sup>2</sup>)较小麦单作降低了30.80%,但较苜蓿单作提高了30.08%。在苜蓿单独生长期(6—10月份),苜蓿单作生物量(产量)比小麦和苜蓿共同生长期(3—6月份)减少了28.60%,间套作中苜蓿的生物量(产量)比小麦和苜蓿共同生长期(3—6月份)增加了5.11%。研究结果表明小麦和苜蓿间套作种植具有提高阶段性系统水分利用效率的优势。

**关键词:**套作; 土壤水分; 水分利用效率; 小麦; 苜蓿

**中图分类号:**S54; S344.3; S152.7

**文献标识码:**A

**文章编号:**1005-3409(2020)01-0054-05

## Effects of Wheat/Alfalfa Intercropping Systems on Soil Moisture and Water Utilization Efficiency

LI Enhui<sup>1</sup>, MU Yangyang<sup>1</sup>, HE Yanan<sup>1</sup>, ZHANG Xiaohong<sup>1</sup>, YANG Shenjiao<sup>2</sup>

(1.College of Geographical Science, Shanxi Normal University, Linfen, Shanxi 041004, China;

2.Farmland Irrigation Research Institute, Chinese Academy of Agricultural Sciences, National Agro-ecological  
System Observation and Research Station of Shangqiu, Shangqiu, He'nan 476000, China)

**Abstract:** A study on changes in soil moisture and water use efficiency of wheat monoculture, alfalfa monoculture and wheat/alfalfa intercropping system in different growing stages was conducted in mid-southern Shanxi Province in 2017. Meanwhile, the water consumption status and the differences of water use efficiency of systematic crops in different treatments were analyzed. The results showed that the average soil water contents of different treatments in mid-March and early October were higher than those in late June, and the soil moisture contents and the soil water storage in different growth periods decreased in the order: wheat monoculture>wheat/alfalfa intercropping> alfalfa monoculture; in wheat and alfalfa growth period (from March to June), wheat/alfalfa intercropping biomass (5 742.64 kg/hm<sup>2</sup>) increased by 17.67% compared with wheat monoculture, and increased by 44.07% compared with alfalfa monoculture, and the water use efficiency of wheat/alfalfa intercropping [27.38 kg/(mm·hm<sup>2</sup>)] was 16.98% and 62.38% higher than that of wheat monoculture and alfalfa monoculture; from March to October, Compared with biomass of wheat monoculture and alfalfa monoculture, biomass (8 036.17 kg/hm<sup>2</sup>) of wheat/alfalfa intercropping increased by 41.17% and 31.49%, respectively, and the water use efficiency [15.73 kg/(mm·hm<sup>2</sup>)] of wheat/alfalfa

收稿日期:2019-03-04

修回日期:2019-03-13

资助项目:山西省留学回国人员资助项目(0503.02040067);河南商丘农田生态系统国家野外科学观测研究站开放课题“小麦/苜蓿间作农田土壤水分、养分循环规律研究”(CNERN-SQ-2017-10)

第一作者:李恩慧(1994—),女,甘肃白银人,硕士研究生,主要从事农业生态与土壤学方面研究。E-mail:2680743237@qq.com

通信作者:张晓红(1976—),女,河北承德人,博士,副教授,主要从事农业生态与土壤方面研究。E-mail:zhx\_1976@163.com

intercropping reduced by 30.80% compared with wheat monoculture, but increased by 30.08% compared with alfalfa monoculture. In alfalfa growth alone (from June to October), biomass of wheat and alfalfa growth period was 28.6% higher than that of alfalfa monoculture, and the biomass of intercropped alfalfa was 5.11% higher than that of the growing period of wheat monoculture and alfalfa monoculture. It is concluded that wheat/alfalfa intercropping can significantly improve the water use efficiency in the system.

**Keywords:**intercropping; soil moisture; water use efficiency; wheat; alfalfa

水资源短缺是制约农业生产发展最重要的因子之一<sup>[1]</sup>,特别是在干旱或半干旱地区,提高水分利用效率逐渐成为作物生存的关键因素<sup>[2]</sup>,因此,探究如何充分利用有限的水资源,提高作物水分利用效率显得尤为重要。在农业生态系统中,土壤水分作为植物生长过程水分吸收的主要来源,不仅直接影响作物的生长发育,也影响作物的生物量<sup>[3-4]</sup>。而合理的间套作种植模式可改善土壤水分状况,提高农田系统的生产力、农田水分和作物水分利用效率<sup>[5]</sup>。

目前对间套作土壤水分利用效率的研究较多,比如叶林等<sup>[6]</sup>在不同田间配置对玉米土豆带状套作系统水分利用效率研究结果中表明,不同的行距和带宽都会对群体水分利用效率产生影响,尤其是在行距 40—50 cm 时,两种不同带宽的玉米套作提高了群体的水分利用效率;苗庆丰等<sup>[7]</sup>在对小麦和玉米间作的水分利用效率研究中发现,在小麦采用平畦灌溉、玉米采用垄沟灌溉模式下群体总水分利用效率提高到 1.66 kg/m<sup>3</sup>;郝娜<sup>[8]</sup>在莜麦和马铃薯间作系统中,相比莜麦单作水分利用效率(WUE)提高了 33.3%,但同时也增加了莜麦与马铃薯耗水量;牛伊宁等<sup>[9]</sup>的研究结果表明,在不同供水水平下,玉米和豌豆间作相比玉米和豌豆任一单作,不仅提高了土地利用效率和作物产量,也提高了作物的平均水分利用效率。但是综观已有的研究发现,对禾本科与豆科间套作种

植模式的作物水分利用效率研究并不多,尤其是对小麦和苜蓿间套种植的研究更是少见。小麦是重要的谷类作物,在我国华北和西北等地区有着较为广泛的种植。有着“牧草之王”的苜蓿,是典型的豆科草本植物,深根牧草,根系发达,耗水量远远大于粮食作物,但其水分利用更加彻底,作物水分利用效率显著高于粮食作物,是小麦的 2.1~2.8 倍<sup>[10]</sup>,将小麦和苜蓿间套作后不同生长时期土壤剖面水分变化、阶段性水分消耗状况以及系统作物水分利用效率又将如何。本文从小麦和苜蓿间套作的土壤水分状况以及群体生物量、系统水分利用效率出发,探讨小麦和苜蓿这种间套作种植模式下土壤水分的消耗特点和水分利用特性。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验于 2017 年在山西省临汾市中部的尧都区东杜村(东经 111°34',北纬 35°55')进行。试验区属于典型的干旱季风气候,冬冷夏热,多年平均气温 12~12.6℃,夏季最高温度达 35~41.9℃,冬季最低温达 -4~5.6℃,年均降水量 550 mm,无霜期达 203 d。土壤属于典型褐土,土壤容重平均为 1.493 g/cm<sup>3</sup>。试验区土壤养分状况见表 1。试验期(2017 年 3 月—10 月)降水量为 532.4 mm(图 1)。

表 1 试验区土壤养分状况

有机质/ (g·kg <sup>-1</sup> )	pH	全氮/ (g·kg <sup>-1</sup> )	碱解氮/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	全磷/ (g·kg <sup>-1</sup> )	有效磷/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	全钾/ (g·kg <sup>-1</sup> )	速效钾/ (mg·kg <sup>-1</sup> )
21.51	8.05	1.18	53.82	0.60	10.59	20.85	235.55

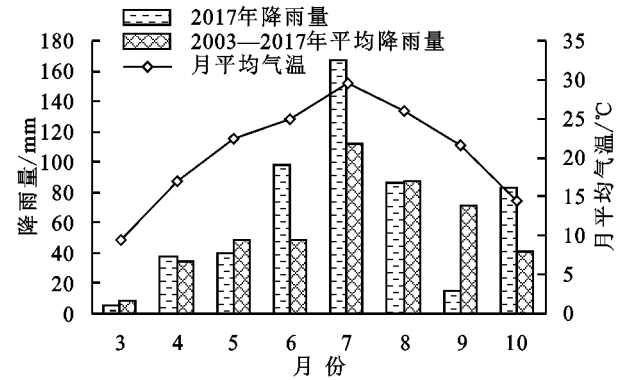


图 1 2017 年试验期间月平均气温与降雨量

1.2 试验材料与试验设计

试验供试小麦品种为冬小麦晋麦 95,千粒重 38 g。苜蓿为当地紫花苜蓿,千粒重 2.255 g。试验共设小麦单播(XD)、苜蓿单播(MD)和小麦苜蓿间套作(XMT)3 个处理。试验小区面积 50 m<sup>2</sup>,三次重复,随机排列。小麦单播自 2014 年起于每年 9 月下旬播种,采用机械播种,间套于苜蓿行间。苜蓿于 2014 年 4 月种植,播种量 18 kg/hm<sup>2</sup>,已有 3 a 的生长周期。小麦苜蓿套作是在两行苜蓿之间套种两行小麦,苜蓿行距为 40 cm,在苜蓿成功建植的基础上机械播种小麦。小

麦单播、苜蓿单播以及小麦苜蓿间套作处理均于小麦播种时统一施肥( $N\ 187.5\ \text{kg}/\text{hm}^2$ ,  $P_2O_5\ 97.5\ \text{kg}/\text{hm}^2$ ,  $K_2O\ 52.5\ \text{kg}/\text{hm}^2$ ), 2017 年春天小麦拔节期进行 2 次追加施肥( $N\ 125\ \text{kg}/\text{hm}^2$ ,  $K_2O\ 37.5\ \text{kg}/\text{hm}^2$ )。

### 1.3 测定项目与计算方法

#### 1.3.1 测定项目

(1) 土壤水分测定: 2017 年 3 月中旬、6 月下旬和 10 月上旬采用土钻法测定 0—200 cm 土层的土壤水分, 小麦和苜蓿单作处理采用行间测定土壤水分, 套作同为小麦和苜蓿行间打钻取样测定土壤水分, 每 10 cm 土层取样, 采用烘干称重法, 在  $105^\circ\text{C}$  恒温干燥箱中烘干 12 h, 计算土壤含水量<sup>[11]</sup>。

(2) 生物量测定: 苜蓿生物量于 5 月 30 日和 8 月 21 日对苜蓿进行齐地刈割, 每个处理取 3 个  $1\ \text{m}^2$  样方称鲜重, 部分鲜样放置  $105^\circ\text{C}$  烘箱内杀青 15 min, 然后温度升高至  $85^\circ\text{C}$  恒温至烘干测干鲜比, 生物量以干重计算。小麦生物量于 5 月 30 日麦收前取样, 测定方法和苜蓿生物量测定方法相同, 生物量亦以干重计算<sup>[12]</sup>。

#### 1.3.2 计算公式

(1) 土壤质量含水量  $\omega = (\text{鲜土重量} - \text{烘干土重}) / \text{烘干土重} \times 100\%$

(2) 土壤分层储水量  $\theta(\text{mm}) = \omega \times \rho \times h$

式中:  $\omega$  为土壤质量含水量;  $\rho$  为土壤容重( $\text{g}/\text{cm}^3$ );  $h$  为土层深度( $\text{cm}$ )<sup>[13]</sup>

(3) 土壤水分支出量  $\beta(\text{mm}) = \text{生长始期土壤储水量} - \text{生长末期土壤储水量}$ <sup>[14]</sup>

(4) 耗水量  $ET(\text{mm}) = \beta + R$

式中:  $\beta$  为土壤水分支出量;  $R$  为生长期降水量( $\text{cm}$ )<sup>[14]</sup>

(5) 水分利用效率  $WUE[\text{kg}/(\text{mm} \cdot \text{hm}^2)] = Y/ET$

式中: 单作  $Y$  为每种作物单位面积生物量、产量( $\text{kg}/\text{hm}^2$ ), 套作  $Y$  为两种作物单位面积生物量产量之和,  $ET$  为耗水量<sup>[6]</sup>。

### 1.4 数据处理与分析

所得数据采用 Microsoft Excel 2010 进行汇总处理及作图, 数据统计分析采用软件 SPSS 21.0 进行差异显著性检验。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同处理 0—200 cm 深层土壤含水量

图 2 是 2017 年 3 月中旬、6 月下旬和 10 月上旬不同处理 0—200 cm 的土壤含水量。3 月中旬 3 个处理 0—200 cm 土层平均土壤含水量为  $12.1\% \sim 17.2\%$ , 大小顺序为  $XD > XMT > MD$ (图 2A), 这说明在本期试验开始之前  $XD$ ,  $XMT$  和  $MD$  在之前年份的生长消耗已经

显著降低了土壤含水量, 尤其苜蓿是一种强耗水深根植物, 无论单播还是与小麦混播, 三年的生长期导致其 0—200 cm 深的土壤水分含量均较低。6 月下旬在小麦生长期结束之际(图 2B), 3 个处理 0—200 cm 平均土壤含水量为  $10.69\% \sim 13.58\%$ , 均显著低于 3 月份均值, 这是因为这一阶段作物需水大导致土壤水分低于小麦返青时。3 个处理间平均土壤含水量排序为  $MD < XMT < XD$ , 说明在小麦生长期内苜蓿的存在降低了土壤含水量, 进一步凸显了苜蓿总体耗水能力。10 月上旬 3 个处理 0—200 cm 平均土壤含水量均有所增加, 但仍低于 3 月份均值( $13.08\% \sim 16.93\%$ ,  $XD > XMT > MD$ )(图 2C)。

从纵向剖面分布来看, 3 月中旬(图 2A)  $MD$  和  $XMT$  在 20—60 cm 和 160—200 cm 土壤含水量均低于  $XD$ , 其中  $MD$  在 60 cm 达到最低( $9.35\%$ ),  $XMT$  在 20 cm 最低( $10.91\%$ ), 这与作物根系分布以及苜蓿耗水强度有关。6 月下旬(图 2B)  $XD$  在 0—50 cm 土壤含水量迅速减少至最低( $10.77\%$  和  $8.50\%$ ), 表明小麦单播中小麦生长过程对上层土壤含水量的影响较大;  $MD$  分别在 0—20 cm 和 120—180 cm 土壤含水量迅速降低至  $7.82\%$  和  $10.56\%$ , 而  $XMT$  在 0—40 cm 和 120—180 cm 土壤含水量降低至  $8.29\%$  和  $11.23\%$ , 这是由于苜蓿为深根植物, 深层土壤含水量都会被其生长所消耗。10 月上旬(图 2C) 3 个处理 100 cm 深度之上的土壤含水量虽然均呈随深度增加而递减的趋势, 但与 6 月份相比均有所增加; 在此深度之下,  $MD$  和  $XMT$  依然保持这种随深度而下降的趋势,  $XD$  则相反, 这与麦收后不同处理对降雨的反映不同有关,  $XD$  主要是对雨水的收蓄作用, 而  $MD$  和  $XMT$  则由于苜蓿的生长耗水导致其整体土壤含水量显著低于 3 月和 6 月份, 尤其是  $XMT$ , 140 cm 土壤含水量甚至比 6 月份还低, 表明苜蓿继续生长增加了深层土壤水分消耗。

### 2.2 不同处理 0—200 cm 深度的土壤储水量变化与水分消耗特点

从 2 m 深总土壤储水量上来看(图 3), 不同处理 6 月下旬土壤储水量均低于 3 月中旬和 10 月上旬, 主要是因为 6 月下旬降雨量相对较少, 气温高蒸发快, 同时作物生长消耗了大量水分, 而 3 月中旬作物生长刚刚开始, 所消耗的土壤水分较少; 10 月上旬由于苜蓿刚完成刈割土壤水分得到了累积, 同时受到季风气候的影响, 华北地区正值雨季过后, 降雨补给量超过消耗量。从不同处理来看, 不论 3 月中旬、6 月下旬和 10 月上旬土壤储水量均为:  $XD > XMT > MD$ , 表明苜蓿耗水能力强于小麦, 试验区域内苜蓿

生长三年导致了土壤储水量总体上较低。

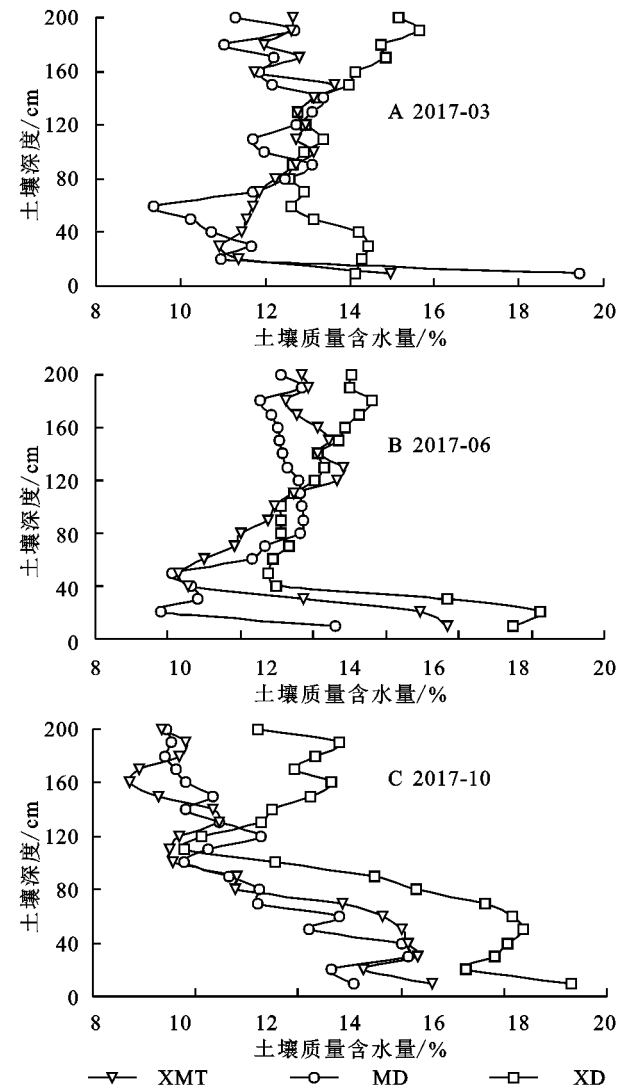


图 2 不同处理 0—200 cm 土层的土壤含水量

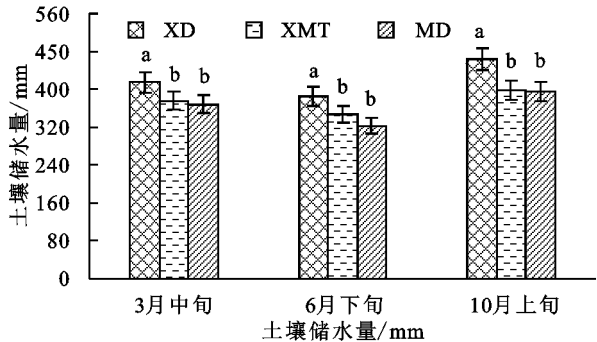


图 3 不同处理 0—2 m 深土壤总储水量

在 3—6 月份小麦生育期内(表 2),3 个处理 0—200 cm 土层土壤水分支出量基本上均为正值(XD 和 XMT 的 0—40 cm 除外),表明不同处理在该时期土壤水分均有支出,但不同处理的支出量及各层次的支出比例不同。3 个处理中 XD 和 XMT 0—200 cm 土壤水分支出总量相差无几,且两者 0—40 cm 的上层土壤水分支出均为负值,但 XD 的上层水分负支出(收蓄)量高于 XMT,40—200 cm 的支出比例分配也较为均匀,而 XMT 在 40—80 cm 深度土壤水分支出量占了总量的一半。MD 0—200 cm 土壤水分支出总量(46 mm)高于 XD (29 mm)和 XMT(30 mm),50%出现在 0—40 cm,120—160 cm 的支出也较多(20%)。

6—10 月份麦收后苜蓿单独生长期内,各处理 0—200 cm 土壤水分支出量基本上为负值,说明期间土壤对雨水的收蓄量多于作物耗水蒸散量。其中 XD 和 MD 土壤水分支出总量较为接近,且两者 80 cm 以上的土壤水分增加(收蓄)量占了 70%~80%。XMT 的土壤水分收蓄量低于 XD 和 MD,且绝大部分在 80 cm 之上,其 120 cm 之下的土壤储水量不增反降。

表 2 不同处理 0—200 cm 分层土壤储水量支出情况

深度/cm	XD				XMT				MD			
	3—6 月储水量		6—10 月		3—6 月储水量		6—10 月		3—6 月储水量		6—10 月	
	支出/mm	百分比/%	储水量支出/mm	百分比/%	支出/mm	百分比/%	储水量支出/mm	百分比/%	支出/mm	百分比/%	储水量支出/mm	百分比/%
0—40	-8	-28	-15	19	-3	-10	-20	40	23	50	-36	50
40—80	11	38	-39	49	15	50	-33	66	5	11	-22	31
80—120	9	31	-11	4	9	30	-2	4	4	9	-5	7
120—160	6	21	-9	11	3	10	4	-8	9	20	-6	8
160—200	11	38	-5	6	6	20	1	-2	5	11	-3	4
0—200	29	100	-79	100	30	100	-50	100	46	100	-72	100

2.3 不同处理的生物量与水分利用效率

与单播作物种植模式相比,为了更加准确衡量间套作模式下作物生物量与用水量之间的关系,进一步计算了水分利用效率(表 3)。不同处理的生物量和水分利用效率均有显著差异。从单因素方差分析的多重比较结果来看,在小麦和苜蓿共同生长期(3—6 月份)内,XMT 作物生物量(产量)和系统水分利用效率高于 MD( $p <$

0.05),其中 XMT 生物量(产量)较 MD 增加了 44.07%,系统水分利用效率提高了 62.38%,表明相比苜蓿单播,小麦苜蓿间套作大大增加了其生物量(产量),同时耗水量明显降低,总体上改善了作物系统土壤水分状况,提高系统水分利用效率。相比 XD,XMT 生物量(产量)增加了 17.67%,系统水分利用效率亦略有提高(16.98%),这与小麦生物量(产量)的增加有关。



表 3 不同处理的水分利用效率

处理	时期	生物量/ (kg·hm <sup>-2</sup> )	耗水量/ mm (kg·hm <sup>-2</sup> ·mm <sup>-1</sup> )	WUE/
XD		4727.71bc	210.43	22.73ab
XMT-X <sup>(1)</sup>		2530.51d	209.75	12.06c
MD	3—6 月	3212.12cd	226.22	10.30c
XMT-M <sup>(2)</sup>		2159.90d	209.75	14.20bc
XMT		5742.64b	209.75	27.38a
MD	6—10 月	2293.53d	279.79	8.20c
XMT-M		2276.20d	300.02	7.58c
XD		4727.71bc	483.37	22.73ab
MD	3—10 月	5505.65b	506.01	10.88c
XMT		8036.17a	510.77	15.73bc

注：(1)表示小麦苜蓿间套作中小麦经济产量。(2)表示小麦苜蓿间套作中苜蓿生物量。同列不同小写字母表示同一指标不同处理间差异显著( $p<0.05$ )。

在苜蓿单独生长期(6—10 月份),MD 生物量(产量)(2 293.53 kg/hm<sup>2</sup>)比小麦和苜蓿共同生长期(3—6 月份)(3 212.12 kg/hm<sup>2</sup>)减少了 28.6%,间套作苜蓿(XMT-M)生物量(产量)(2 276.20 kg/hm<sup>2</sup>)比小麦和苜蓿共同生长期(3—6 月份)(2 159.90 kg/hm<sup>2</sup>)增加了 5.11%,表明对于苜蓿单作而言,小麦和苜蓿共同生长期(3—6 月份)更有利于生物量(产量)积累,而在间套作苜蓿(XMT-M)中,苜蓿单独生长期(6—10 月份)生物量(产量)容易积累。苜蓿单独生长期(6—10 月份)由于降雨量明显增加,作物耗水量远远高于小麦和苜蓿共同生长期(3—6 月份),进而使得苜蓿单作(MD)和间套作苜蓿(XMT-M)6—10 月平均水分利用效率 8.20 kg/(mm·hm<sup>2</sup>),7.58 kg/(mm·hm<sup>2</sup>)低于 3—6 月份 14.20 kg/(mm·hm<sup>2</sup>),10.30 kg/(mm·hm<sup>2</sup>)。

从整个生长期(3—10 月)来看,XMT 生物量(产量)和水分利用效率均高于 XD 和 MD,其中 XMT 生物量(产量)较 XD 增加了 41.17%,水分利用效率降低了 30.80%,较 MD 生物量(产量)增加了 31.49%,水分利用效率提高了 9.19%,说明间套作能够显著增加作物生物量(产量),提高系统水分利用效率。

3 结论与讨论

从作物生长的不同时期来看,3 月中旬、6 月下旬和 10 月上旬各处理的平均土壤含水量分别为 12.1%~17.2%,10.69%~13.58%和 13.08%~16.93%,且 3 月中旬和 10 月上旬不同处理的平均土壤含水量均高于 6 月下旬,这种结果与作物生长需水量有关,6 月下旬不论是单作还是间套作土壤水分明显减少。李巍等<sup>[15]</sup>在对不同种植系统土壤水分消耗研究中指出小麦土壤水分减少最多的是 5 月、6 月和 7 月份,苜蓿土壤水分减少最多的是 6 月或 8 月,土壤水分变化

在时间上与本研究基本一致,都是在作物生长旺盛期土壤含水量最低。从不同处理来看,在小麦和苜蓿共同生长期(3—6 月份)土壤含水量大小顺序为:XD>XMT>MD,何亚男等<sup>[16]</sup>在苜蓿间套作冬小麦对土壤水分的前期研究中,3 月中旬不同处理土壤剖面质量含水量与本研究结果基本相同,而 6 月下旬的结果与本研究有很大差异,这可能与当季降雨量多少有关。本研究在此基础上又分析了 10 月上旬的土壤含水量,得到的结果仍是 XD>XMT>MD,这表明小麦和苜蓿间套作确实能改善苜蓿土壤储水量低的状态,这可能与苜蓿自身生长导致储水量高有关。

小麦和苜蓿间套作生物量(产量)不论是在 3—6 月小麦和苜蓿共同生长期(4 727.71 kg/hm<sup>2</sup>)还是 3—10 月整个生长期(8 036.17 kg/hm<sup>2</sup>)均高于苜蓿单作,这与袁锐明等<sup>[17]</sup>苜蓿套种小麦能有效抑制杂草生长,对后茬苜蓿生长发育有良好作用结果一致。在本研究中 3—6 月份小麦苜蓿间套作生物量(产量)高于小麦单作,甚至整个生长期生物量(产量)远远高于小麦单作,并且农民更多的是关注小麦籽粒产量,秸秆只用于还田,故从收获产物多样化角度来说在小麦中间套苜蓿存在较大的研究价值。在小麦和苜蓿共同生长期(3—6 月)小麦苜蓿间套作水分利用效率 27.38 kg/(mm·hm<sup>2</sup>)较小麦单作增加了 16.98%,比苜蓿单作提高了 62.38%;从整个生长期(3—10 月)来看,小麦苜蓿间套作水分利用效率为 15.73 kg/(mm·hm<sup>2</sup>),较小麦单作虽低了 30.80%,但比苜蓿单作水分利用效率提高了 30.83%。本研究结果表明小麦苜蓿间套作具有显著提高系统水分利用效率的优势,这与已有的相似研究<sup>[18]</sup>结果基本相同。任继周等<sup>[19]</sup>在对甘肃省草地农业可持续发展的研究中也指出利用牧草间作粮食作物能够提高苜蓿生物量(产量),进一步证实了禾本科与豆科间套作能够更好地发挥间套作的优势<sup>[20]</sup>。在本研究中由于每个处理间没有物理间隔设置,使得深层苜蓿根系会向邻近单播小麦“争水”,导致在本试验研究阶段一开始单播小麦的土壤水分含量较低,但其结果表明小麦苜蓿间套作具有阶段性显著提高系统水分利用效率的优势。

参考文献：

[1] Xu D, Gong S H, Li Y N, et al. Overview of recent study on improvement approaches and methods for crop water productivity [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2010,41(6):631-639.

[2] 侯慧芝,张绪成,汤瑛芳,等.半干旱区全膜覆盖垄沟种植马铃薯/蚕豆间作的产量和水分效应[J].草业学报, 2016,25(6):71-80.

壤团聚体对酶活性的影响[J].生态学报,2015,35(5):1422-1433.

[12] 朱姝,窦森,关松,等.秸秆深还对土壤团聚体中胡敏素结构特征的影响[J].土壤学报,2016,53(1):127-136.

[13] 邱晓蕾,宗良纲,刘一凡,等.不同种植模式对土壤团聚体及有机碳组分的影响[J].环境科学,2015,36(3):1045-1052.

[14] 杨宁,邹冬生,付美云,等.紫色土丘陵坡地恢复中土壤团聚体特征及其与土壤性质的关系[J].生态学杂志,2016,35(9):2361-2368.

[15] 王甜,徐姗,赵梦颖,等.内蒙古不同类型草原土壤团聚体含量的分配及其稳定性[J].植物生态学报,2017,41(11):1168-1176.

[16] 孙娇,赵发珠,韩新辉,等.不同林龄刺槐林土壤团聚体化学计量特征及其与土壤养分的关系[J].生态学报,2016,36(21):6879-6888.

[17] 王甜,徐姗,赵梦颖,等.内蒙古不同类型草原土壤团聚体含量的分配及其稳定性[J].植物生态学报,2017,41(11):1168-1176.

[18] 毛霞丽,陆扣萍,何丽芝,等.长期施肥对浙江稻田土壤团聚体及其有机碳分布的影响[J].土壤学报,2015,52(4):828-838.

[19] 朱姝,窦森,陈丽珍.秸秆深还对土壤团聚体中胡敏酸结构特征的影响[J].土壤学报,2015,52(4):747-758.

[20] 杨飞霞,曹广超,于东升,等.引黄灌溉耕作对土壤团聚体有机碳的影响[J].水土保持学报,2018,32(4):190-196.

[21] 李玮,郑子成,李廷轩.不同植茶年限土壤团聚体碳氮磷生态化学计量学特征[J].应用生态学报,2015,26(1):9-16.

[22] 余林,徐海宁,肖复明,等.不同类型毛竹林土壤团聚体有机碳特征研究[J].江西农业大学学报,2017,39(4):713-720.

[23] 黄天颖,高唤唤,康宏樟.黄浦江上游水源涵养林土壤团聚体组成及其碳、氮分布特征[J].上海交通大学学报》(农业科学版),2017,6(3):1-7.

[24] 褚冰杰,余光辉,刘飞飞,等.土壤微团聚体中矿物—有机复合体特征[J].土壤学报,2017,54(6):1451-1458.

[25] 赵然然,张志国,李晓军,等.基于粒度的土壤团聚体中砷的形态分布特征[J].生态环境学报,2016,25(2):327-332.

[26] 李景,吴会军,武雪萍,等.长期保护性耕作提高土壤大团聚体含量及团聚体有机碳的作用[J].植物营养与肥料学报,2015,21(2):378-386.

[27] 张翰林,郑宪清,何七勇,等.不同秸秆还田年限对稻麦轮作土壤团聚体和有机碳的影响[J].水土保持学报,2016,30(4):216-220.



(上接第 58 页)

[3] 王菊芬,吴伯志.间套作系统中土壤水分研究进展[J].云南农业大学学报:自然科学,2009,24(2):286-291.

[4] 刘英超,郑毅,汤利.间套作作物对土壤水分的利用效率研究[C]//面向未来的土壤科学,2012.

[5] 董宛麟,张立祯,于洋,等.向日葵和马铃薯间作模式的生产力及水分利用[J].农业工程学报,2012,28(18):127-133.

[6] 叶林,杨峰,苏本营,等.不同田间配置对玉豆带状套作系统水分分布及水分利用率的影响[J].干旱地区农业研究,2015,33(4):000041-48.

[7] 苗庆丰,史海滨,李瑞平,等.河套灌区畦—沟分灌水分利用效率及节水效果试验研究[J].干旱区资源与环境,2015,29(10):135-139.

[8] 郝娜.内蒙古农牧交错带 4 种典型间作系统生产力和水分利用研究[D].长春:吉林农业大学,2017.

[9] 牛伊宁,刘冬梅,罗珠珠,等.不同供水水平对玉米/豌豆间作系统作物耗水特征的影响[J].干旱地区农业研究,2018,36(1):83-88,101.

[10] 潘幸来.试论苜蓿—小麦生态系统[J].山西农业科学,1983(8):18-19.

[11] 周健民.土壤学大辞典[M].北京:科学出版社,2013.

[12] 南京农业大学.土壤农化分析[M].南京:农业出版社,1990.

[13] 王浩,王淑兰,徐宗贵,等.耕作与施肥对旱地玉米田土壤耗水量和水分利用效率的影响[J].中国生态农业学报,2017,25(6):856-864.

[14] 张晓红,徐炳成,李凤民.密度对 3 种豆科牧草生产力和水分利用率的影响[J].草地学报,2007,15(6):593-598.

[15] 李巍,郝明德,王学春.黄土高原沟壑区不同种植系统土壤水分消耗和恢复[J].农业工程学报,2010,26(3):99-105.

[16] 何亚男.间套作苜蓿对冬小麦土壤养分、水分和土地经济效益的影响[D].山西临汾:山西师范大学,2017.

[17] 袁锐明.不翻耕苜蓿地套种冬小麦、谷子试验报告[J].陕西农业科学,1957(4):14-18.

[18] Morris R A, Garrity D P. Resource capture and utilization in intercropping: water[J]. Field Crops Research, 1993,34(3):303-317.

[19] 任继周,林慧龙,未丽.草地农业是甘肃农业可持续发展的重要途径[J].草地学报,2009,17(4):405-412.

[20] 肖靖秀.小麦//蚕豆的根系分泌物特征及其对蚕豆枯萎病菌的响应研究[D].昆明:云南农业大学,2013.