

# 保水剂与微生物菌肥配施对黄土高原旱作燕麦生长及水分利用的影响

田露, 刘景辉, 赵宝平, 米俊珍, 李英浩, 费楠

(内蒙古农业大学/内蒙古农业大学杂粮产业协同创新中心, 内蒙古 呼和浩特 010019)

**摘要:** [目的] 分析保水剂与微生物菌肥配施后旱作燕麦生长及水分利用情况, 为黄土高原旱作区农田生产提供一种有效的保水培肥措施, 指导该区域旱作农业生产。[方法] 通过在黄土高原旱作区设不施保水剂和微生物菌肥(CK)、单施保水剂(A)、单施微生物菌肥(M)、保水剂和生物菌肥配施(AM)4个处理, 分析燕麦全生育时期土壤水分变化、关键生育时期生长发育变化、全生育时期耗水量特征、产量构成及水分利用情况。[结果] ①AM处理可促进燕麦生长发育。以灌浆期为例, AM处理可提高株高3.27%~25.96%, 单株叶面积7.94%~23.06%, 地上部干物质积累量11.48%~21.88%。②AM处理可提高0—20 cm土层土壤含水量(5.89%~11.50%), 显著降低燕麦土壤贮水消耗(7.70%~18.76%), 使总耗水量降低0.46%~1.26%。③AM处理可促进燕麦籽粒和生物产量形成, 进而促进水分利用, 使籽粒产量提高8.40%~20.12%, 生物产量提高10.80%~25.09%, 水分利用效率提高12.19%~26.80%。[结论] 保水剂和微生物菌肥配施能够显著促进旱作燕麦生长, 改善农田土壤水分状况, 具有蓄水保墒作用, 实现燕麦产量增加, 提高水分利用效率。

**关键词:** 保水剂; 微生物菌肥; 旱作燕麦; 水分利用

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-288X(2020)03-00317-08

**中图分类号:** S144, TU582.042.6

**文献参数:** 田露, 刘景辉, 赵宝平, 等. 保水剂与微生物菌肥配施对黄土高原旱作燕麦生长及水分利用的影响[J]. 水土保持通报, 2020, 40(3): 317-324. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2020.03.046; Tian Lu, Liu Jinghui, Zhao Baoping, et al. Effects of combined application of super absorbent polymer and microbial fertilizer on oat growth and water utilization in dry farmland of Loess Plateau [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2020, 40(3): 317-324.

## Effects of Combined Application of Super Absorbent Polymer and Microbial Fertilizer on Oat Growth and Water Utilization in Dry Farmland of Loess Plateau

Tian Lu, Liu Jinghui, Zhao Baoping, Mi Junzhen, Li Yinghao, Fei Nan

(Inner Mongolia Agricultural University/Collaborative Innovation Center of

Grain Industry of Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot, Inner Mongolia 010019, China)

**Abstract:** [Objective] The growth and water utilization of dry farmland oats after the combined application of super absorbent polymer and microbial fertilizer were investigated, in order to provide an effective water-retaining and fertilizing measure for the crop production in Inner Mongolia of the Loess Plateau. [Methods] Four treatments, including no application of water retaining agent and microbial fertilizer (CK), single application of water retaining agent (A), single application of microbial fertilizer (M), combination of water retaining agent and microbial fertilizer (AM), were set up in the dryland area of the Loess Plateau, and the changes of soil water content, oat growth conditions, water consumption, yield composition and water use were analyzed. [Results] ① The combined application of super absorbent polymer and microbial fertilizer promoted the growth and development of oats. Taking the filling stage as an example, the plant height was increased by 3.27%—25.96%, the plant leaf-area was increased by 7.94%—23.06%, and the accumulation

收稿日期: 2020-03-12

修回日期: 2020-04-13

资助项目: 内蒙古自治区科技计划项目“燕麦加工技术研究与旱作高产栽培示范推广项目”(201802062); 内蒙古自治区科技成果转化项目“燕麦新品种与绿色种植技术成果转化与应用”(2019CG017); 国家燕麦荞麦产业技术体系项目(CARS-08-B-5); 全国农业科研杰出人才及创新团队项目

第一作者: 田露(1988—), 女(汉族), 山西省朔州市人, 博士研究生, 研究方向为作物栽培学与耕作学研究。Email: tltltl\_hi@126.com。

通讯作者: 刘景辉(1965—), 男(蒙古族), 内蒙古自治区奈曼旗人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事农牧交错区农作制与农业生态系统方面的研究。Email: cauljh@163.com。

of aboveground dry matter was increased by 11.48%—21.88%. ② The combined application of super absorbent polymer and microbial fertilizer increased soil water content of 0—20 cm soil layer by 5.89%—11.50%, compared with no application. It significantly decreased soil water storage consumption by 7.70%—18.76% and reduced the total water consumption by 0.46%—1.26%. ③ The combined application of super absorbent polymer and microbial fertilizer promoted the formation of oat grains and biological yield, and thus promoted water use efficiency. The grain yield increased by 8.40%—20.12%, the biological yield increased by 10.80%—25.09%, and water use efficiency increased by 12.19%—26.80%. [Conclusion] The combined application of super absorbent polymer and microbial fertilizer can significantly promote the growth of oats in dryland, improve soil moisture status, conserve soil and water, and thus increase the yield of oats and improve the water use efficiency.

**Keywords:** super absorbent polymer; microbial fertilizer; oat; water use efficiency

黄土高原内蒙古段是中国北方典型旱作农业生产区域。该区域降雨量少且分布不均匀,土壤水分亏缺是制约其农业生产的重要因素<sup>[1]</sup>。如何提高该区域农业生产中对有限降水的利用显得尤为重要。保水剂是近年来研究发现在旱作农业生产中具有较好保水效果的高分子材料,它不溶于水、具有高膨胀性和吸水力,被称为土壤“微型水库”,具有蓄水保墒作用<sup>[2]</sup>。大量研究表明,保水剂在保持旱作农田土壤水分,促进作物生长以及增产上具有明显效果<sup>[3-6]</sup>。目前,保水剂在农业生产中的应用还集中在单施及其与化肥、有机肥等配施方面<sup>[7-8]</sup>。然而,保水剂单施存在功能单一问题,配施化肥、有机肥又存在投入高和利用率低的问题<sup>[9]</sup>。微生物菌肥是一种以添加有效微生物菌来改善土壤环境的有机肥料<sup>[10]</sup>,能够增加土壤肥力,改善土壤结构,增强作物抗逆性,改善作物品质等<sup>[11-12]</sup>,具有培肥地力,提高化肥利用率的效果<sup>[13]</sup>。但微生物菌肥施用受环境条件限制,在不同水分条件、不同肥力条件、不同土壤类型等影响下,效果均表现不一致<sup>[14]</sup>。目前关于微生物菌肥在农业生产中的应用多集中在单施及其与化肥的配施方面<sup>[15-18]</sup>。关于将保水剂与微生物菌肥配施的研究仅见其应用于半干旱区造林中<sup>[19-21]</sup>,未见相关应用于农作物的研究。本研究针对黄土高原旱作区土壤缺水、肥力低的现状,将保水剂与微生物菌肥配施,分析其对旱作燕麦生长、土壤水分保持以及利用的影响,期为黄土高原旱作区农田生产提供一种有效的保水培肥措施,为指导该区域旱作农业生产提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于内蒙古自治区清水河县(111°39'E, 40°6'N),海拔高度为 1 374 m,年平均温度 7.1℃,有效积温 2 370℃,无霜期 140 d,年均降雨量 365 mm,

年蒸发量 2 577 mm,属典型的中温带半干旱大陆性季风气候。试验地 0—20 cm 土层土壤为黄绵土,总孔隙度 43.65%,有机质含量为 10.96 g/kg,碱解氮含量为 37.1 g/kg,速效磷含量为 6.55 mg/kg,速效钾含量为 118.9 mg/kg。

### 1.2 试验材料与试验设计

1.2.1 试验材料 保水剂选用农林保水剂(钾盐型),选购于任丘市鹏宇化工有限公司。微生物菌肥选购于内蒙古阜丰生物科技有限公司,其有效活菌数  $\geq 1.0 \times 10^8$  cfu/g,总养分  $\geq 15\%$ ,总 N  $\geq 12.0\%$ ,有机质  $\geq 20\%$ ,水分  $\leq 3.0\%$ 。燕麦品种为坝苜 18 号。

1.2.2 试验设计 试验于 2019 年 6—10 月进行,设不施保水剂和微生物菌肥(CK)、单施保水剂(A)、单施微生物菌肥(M)、保水剂和生物菌肥配施(AM)4 个处理。其中,保水剂施用量为 22.5 kg/hm<sup>2</sup>,微生物菌肥施用量为 1 500 kg/hm<sup>2</sup>。试验采用随机区组设计,重复 3 次,共计 12 个小区,小区面积 5 m×8 m。保水剂和生物菌肥均在播种前与种肥进行混合,种肥采用磷酸二铵,施用量为 150 kg/hm<sup>2</sup>。燕麦采用机械条播,播种量 150 kg/hm<sup>2</sup>。种植行距 25 cm。肥料均通过分层播种机随播种施入土壤。2019 年 6 月 17 日进行播种,10 月 11 日收获。

### 1.3 测定指标及方法

1.3.1 试验地降雨量 试验地降雨量数据来源于试验地农田气候监测系统。数据由当地农业气象部门提供。

1.3.2 土壤质量含水率 于播种前、燕麦苗期、拔节期、抽穗期、灌浆期、成熟期采用土钻分层(0—20, 20—40, 40—60, 60—80, 80—100 cm)采集 0—100 cm 土壤样品。将采集的土壤样品置于铝盒中,称取鲜重后,置于恒温烘箱中 105℃烘干至恒重后称重。利用下式计算土壤质量含水率。

$$\text{土壤质量含水率} = (\text{土壤鲜质量} - \text{土壤干质量}) / \text{土壤干质量} \times 100\% \quad (1)$$

1.3.3 生育期耗水及水分利用效率计算 参照冯福学<sup>[22]</sup>等人研究中计算方法进行计算,计算公式为:

$$ET_{1-2} = S_i + M + P_0 + K \quad (2)$$

$$CD = ET_{1-2} / D \quad (3)$$

$$CP = ET_{1-2} / ET_a \times 100 \quad (4)$$

$$A = Y_1 / ET_a \quad (5)$$

$$WUE = Y_2 / ET_a \quad (6)$$

式中:  $ET_{1-2}$  为阶段耗水量(mm);  $M$  为阶段内灌水量(mm);  $P_0$  为阶段内降水量(mm);  $K$  为阶段内地下水补给量(mm);  $S_i$  为阶段土壤贮水消耗量,即阶段初和阶段末土壤贮水量之差。本试验中试验期间无灌水( $M=0$ ),地下水埋深在10 m以下。地下水埋深大于2.5 m时  $K$  值可以忽略不计( $K=0$ );  $CD$  为阶段耗水强度(mm/d);  $CP$  为阶段耗水模系数(%);  $D$  为该阶段持续天数(d);  $ET_a$  为全生育期总耗水量(mm);  $A$  为水分产出率[kg/(mm·hm<sup>2</sup>)];  $WUE$  为水分利用效率[kg/(mm·hm<sup>2</sup>)];  $Y_1$  为籽粒产量(kg/hm<sup>2</sup>);  $Y_2$  为生物产量(kg/hm<sup>2</sup>)。

1.3.4 燕麦株高、单株叶面积、干物质 株高于燕麦出苗稳定后在田间采取定位标记方法,每小区定株标记燕麦植株15株,待燕麦拔节期、抽穗期、灌浆期分别用卷尺自地面向上至植株最高部位进行测量。单株叶面积采用长宽系数法。于燕麦拔节期、抽穗期、灌浆期在每小区取生长均匀的燕麦15株进行测定,测量单株燕麦所有叶片的长和宽。

$$\text{单株叶面积} = \text{叶长} \times \text{叶宽} \times 0.73^{[23]} \quad (7)$$

于燕麦拔节期、抽穗期、灌浆期在每小区取30 cm长样段,自根部去除,将地上部分带回实验室用烘干法测定干物质,105℃杀青30 min后,80℃烘干至质量恒定。

1.3.5 燕麦产量指标 燕麦成熟后,于每小区选取生育期内未取样的1 m<sup>2</sup>样点3个,晒干,带回实验室进行测产和考种(包括收获期穗数、穗粒数、单穗粒重、千粒重)。

## 1.4 数据处理与分析

采用Excel进行数据计算、处理,并制图,采用SPASS 17.0软件进行统计分析,采用LSD最小显著性差异法进行显著性分析( $p < 0.05$ )。

## 2 结果与分析

### 2.1 试验期间试验地降雨量分析

试验期间试验地降雨量如图1所示。燕麦全生育期(播种期—收获期),降雨量为255.3 mm。燕麦播种期—收获期降雨量呈现先增加后降低趋势,播种前7 d降雨量仅为17.1 mm。播种期—苗期,历时

24 d,降雨量为30 mm,日平均降雨量为1.25 mm,严重影响出苗。苗期—拔节期,历时20 d,降雨量为47.2 mm,日平均降雨量2.36 mm。拔节期后,降雨量增加,到拔节期—抽穗期,历时27 d,降雨量为72.9 mm,日平均降雨量为1.97 mm。抽穗期后,降雨量减少。抽穗期—灌浆期历时16 d,降雨量为53.5 mm,日平均降雨量3.34 mm。灌浆期后,由于进入秋季,降雨量增加。灌浆期—收获期历时31 d,降雨量为51.7 mm,日平均降雨量为1.67 mm。燕麦全生育时期试验地日平均降雨量均较低,影响燕麦生长及产量形成,如何在有限降水下实现保水蓄水显得尤为重要。

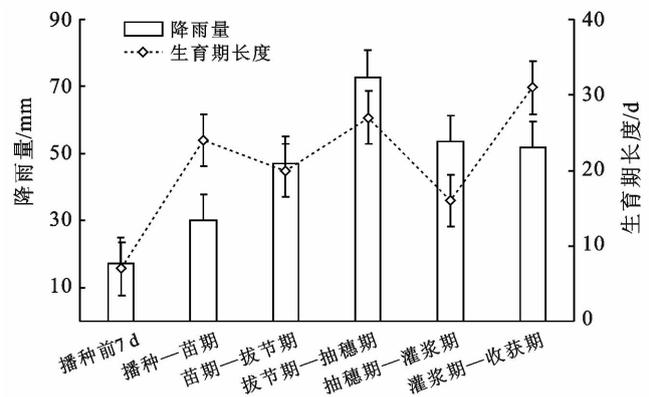


图1 试验期间试验地降雨量

### 2.2 不同处理对燕麦生长的影响

随着生育时期的推进,燕麦株高、单株叶面积以及地上部干物质均呈增长趋势。施用保水剂、微生物菌肥以及配施均能不同程度改善燕麦生长,促进其株高、单株叶面积以及地上部干物质积累(见表1)。拔节期各处理表现为:AM>A>M>CK,抽穗期和灌浆期表现为:AM>M>A>CK。与CK和A,M处理相比,AM处理在3个时期均能显著提高燕麦株高、单株叶面积和地上部干物质积累;处理A在促进燕麦株高和单株叶面积形成上具有显著效果,但其对于地上部干物质积累仅在抽穗期表现显著;处理M生育前期(拔节期)在各指标上均表现不显著,随着生育期推进,其促进生长效果逐渐发挥。到灌浆期其在燕麦株高、单株叶面积和地上部干物质积累上均表现显著,但2个单施处理之间(A,M)差异不显著。以灌浆期为例,处理A,M,AM分别较CK株高提高了16.45%,22.26%,25.96%;单株叶面积分别提高了10.72%,13.95%,23.06%;地上部干物质分别提高了6.35%,9.33%,21.88%;处理AM较处理A和M株高提高8.17%和3.02%;单株叶面积提高11.15%和7.99%;地上部干物质提高14.60%和

11.48%。可见,单施保水剂利于燕麦前期生长,但后期作用不及单施微生物菌肥,这与试验地降雨以及土壤条件有一定关系,结合对试验期间降雨量分析得知,试验前期降雨量较少,土壤水分有限,保水剂能够将有限水分进行固持,供燕麦生长,且燕麦生长前期水分对其影响远大于肥料<sup>[24]</sup>,而微生物菌肥施用后在有限水分条件下具有适应过程。随着生育期推进,自拔节期以后,试验地降雨增多,土壤水分条件得到改善,微生物菌肥适应土壤环境,同时燕麦生长后期需肥量增多,单施微生物菌肥的作用逐渐发挥。但将其配施后,在燕麦全生育时期均表现较好,能够较好地克服两者在该区域的作用局限。

表 1 不同处理燕麦生长状况

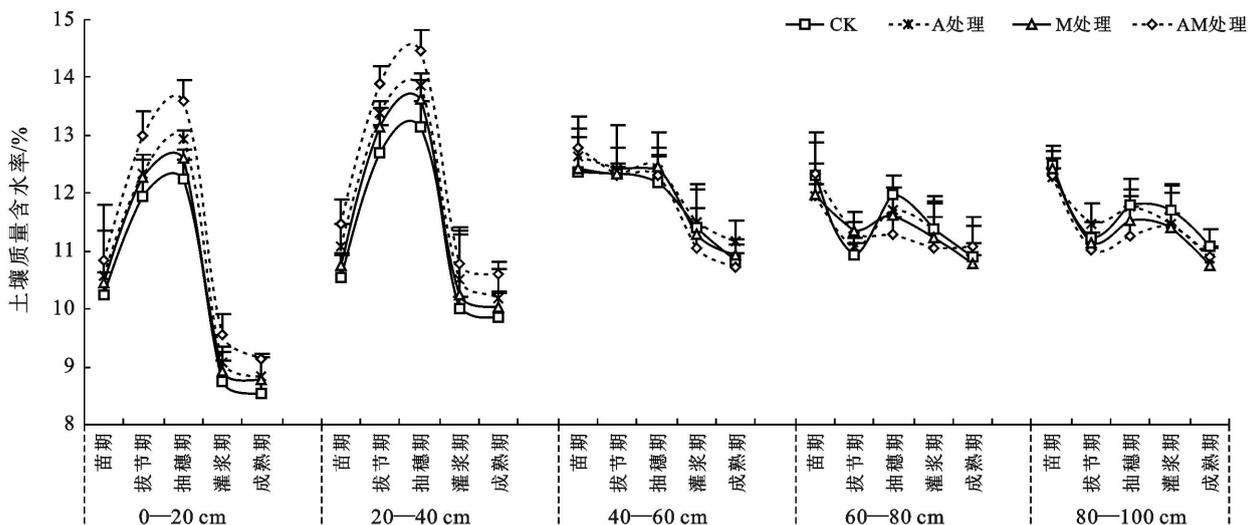
农艺性状	生育期	CK	处理 A	处理 M	处理 AM
株高/cm	拔节期	50.14 <sup>c</sup>	58.67 <sup>b</sup>	52.17 <sup>c</sup>	63.62 <sup>a</sup>
	抽穗期	94.12 <sup>c</sup>	106.49 <sup>b</sup>	108.23 <sup>b</sup>	121.96 <sup>a</sup>
	灌浆期	105.73 <sup>c</sup>	123.12 <sup>b</sup>	129.27 <sup>ab</sup>	133.18 <sup>a</sup>
单株叶面积/cm <sup>2</sup>	拔节期	49.83 <sup>c</sup>	56.88 <sup>b</sup>	53.64 <sup>bc</sup>	63.72 <sup>a</sup>
	抽穗期	101.65 <sup>b</sup>	109.60 <sup>b</sup>	110.35 <sup>b</sup>	122.28 <sup>a</sup>
	灌浆期	108.67 <sup>c</sup>	120.32 <sup>b</sup>	123.83 <sup>ab</sup>	133.73 <sup>a</sup>
地上干物质积累量/(kg·hm <sup>-2</sup> )	拔节期	2 428.44 <sup>b</sup>	2 657.72 <sup>b</sup>	2 479.57 <sup>b</sup>	3 773.55 <sup>a</sup>
	抽穗期	7 442.52 <sup>c</sup>	8 242.73 <sup>b</sup>	8 287.29 <sup>b</sup>	9 289.18 <sup>a</sup>
	灌浆期	9 126.88 <sup>c</sup>	9 706.41 <sup>bc</sup>	9 978.04 <sup>b</sup>	11 233.99 <sup>a</sup>

注:表中同一行不同小写字母表示差异达 0.05 显著水平。下同。

### 2.3 不同处理对燕麦生育期内土壤水分的影响

随着燕麦生育时期的推进,0—60 cm 土层土壤含水量均呈现先增高后降低的趋势(见图 2),这是由燕麦生长以及降雨情况共同造成的。结合试验期间

降雨量分析可知,在拔节期,试验地降雨较多,使得土壤含水量增加,到抽穗期达到最大,之后降雨减少,燕麦生长需水增多,导致后期土壤含水量下降。60—100 cm 土层土壤含水量在燕麦全生育时期变化幅度较小,且各处理在该范围土层之间无明显规律性变化。不同处理间,以 0—20,20—40 cm 土层土壤含水量差异较明显,对 40—60 cm 土层土壤含水量影响较小,这可能是由于保水剂、微生物菌肥均施入 15—20 cm 土层,对近施入层的土壤含水量的影响较大。不同处理间 0—20,20—40 cm 土层土壤含水量在全生育时期整体表现为:AM>A>M>CK。苗期处理 AM 与其余处理差异较明显,0—20 cm 土层较 CK 土壤含水量提高 5.89%,20—40 cm 土层提高 9.22%。处理 A,M,CK 间整体差异不大,说明单施保水剂和微生物菌肥,在土壤水分条件有限的条件下对土壤水分作用不明显,而将 2 者配施能够更好地促进两种材料作用在有限土壤水分条件下的发挥。随着生育期的推进以及降雨量的增加,拔节期、抽穗期,各处理土壤含水量均较苗期有所增加,且处理间差异也逐渐明显。各处理差异最大表现在抽穗期,与 CK 相比,处理 A,M,AM 在 0—20 cm 和 20—40 cm 土层土壤含水量分别提高了 5.85%和 5.78%,3.01%和 3.96%,11.50%和 10.44%;全生育时期,处理 AM 0—20 cm 土层土壤含水量,与处理 CK,A,M 相比提高幅度分别为 5.89%~11.50%,2.66%~5.62%,3.79%~8.24%;在 20—40 cm 土层分别为 8.03%~10.44%,2.83%~4.40%,5.52%~6.97%。可见配施处理在全生育时期土壤水分保持效果优于两个单施处理,且单施保水剂的效果优于单施微生物菌肥。



注:CK 为不施保水剂和微生物菌肥处理;A 为单施保水剂处理;M 为单施微生物菌肥处理;AM 为保水剂和生物菌肥配施处理

图 2 不同处理燕麦生育期内土壤水分动态变化

## 2.4 不同处理对燕麦不同生育阶段耗水特征的影响

随着生育阶段的推进,燕麦耗水量、阶段耗水强度、耗水模系数均呈现先增加后降低的趋势,但不同生育阶段耗水量、耗水强度、耗水模系数处理间变化不一致(见表2)。从播种到苗期,燕麦生长需水较少,该阶段耗水量主要由田间蒸发造成,处理间表现为:CK>M>A>AM,且处理AM显著低于CK和处理M,但与处理A间差异不显著。可见在该时期保水剂和微生物菌肥单施、配施均具有一定保水作用,以配施效果最好,与不施用相比降低17.60%,与单施保水剂相比降低12.41%,与单施微生物菌肥相比降低16.78%。耗水强度、耗水模系数处理间表现与耗水量基本一致;苗期—拔节期温度不断升高,农田蒸发增大,燕麦对水分的需求增大,耗水量、耗水强度、耗水模系数各处理均表现为:CK>AM>M>A,且各处理间差异不显著。这说明该阶段配施处理(AM)燕麦生长较快,需水高于2个单施处理,但此阶段农田耗水主要决定因素仍为农田蒸发,因此CK处理由于保水性差,耗水量仍最大。拔节期—抽穗期、抽穗期—灌浆期耗水量、耗水强度、耗水模系数处理间表现一致。这两个阶段耗水模系数达到50%左右,为燕麦生长需水最大时期,各处理间差异最为明显,其整

体表现为:AM>M>A>CK。此阶段燕麦生长较快,燕麦冠层增大,光合蒸腾耗水增加,农田耗水主要来源于燕麦生长需水。与CK相比,在拔节期—抽穗期和抽穗期—灌浆期单施保水剂(A)、单施微生物菌肥(M)、配施(AM)耗水量分别增加0.95%和2.24%,2.46%和2.26%,3.52%和3.26%;阶段耗水强度分别增加0.95%和2.22%,2.52%和2.00%,3.48%和3.11%;耗水模系数增加1.80%和3.38%,2.53%和2.44%,4.91%和4.92%。灌浆期—成熟期,随着大气温度的降低,农田蒸发减少,且燕麦生长需水也较之前有所降低,使得各处理农田耗水量、耗水强度、耗水模系数均降低,处理间差异均不显著。各处理全生育时期耗水量表现为:CK>M>A>AM,且差异不显著。配施与不施用相比,全生育时期耗水量降低1.26%,与单施保水剂相比降低0.46%,与单施微生物菌肥相比降低1.16%。可见,保水剂、微生物菌肥单施及配施均能一定程度影响燕麦生育期农田耗水量,尤其表现在生育前期,在燕麦生长需水较少时,能够保持土壤水分,显著降低农田耗水量。随着燕麦生长发育,农田耗水量提高,但全生育时期3个处理耗水量均低于CK,说明施用保水剂、微生物菌肥和配施均能实现用较少的水分促进燕麦生长,其中以配施效果最优。

表2 不同处理下燕麦不同生育阶段耗水量特征

生育阶段	耗水特征	CK	处理 A	处理 M	处理 AM
播种期—苗期	耗水量/mm	29.27 <sup>a</sup>	27.54 <sup>ab</sup>	28.99 <sup>a</sup>	24.12 <sup>b</sup>
	耗水强度/(mm·d <sup>-1</sup> )	1.08 <sup>a</sup>	1.02 <sup>ab</sup>	1.07 <sup>a</sup>	0.89 <sup>b</sup>
	耗水模系数/%	11.43 <sup>a</sup>	10.95 <sup>ab</sup>	11.43 <sup>ab</sup>	9.53 <sup>b</sup>
苗期—拔节期	耗水量/mm	43.78 <sup>a</sup>	41.14 <sup>a</sup>	40.97 <sup>a</sup>	42.25 <sup>a</sup>
	耗水强度/(mm·d <sup>-1</sup> )	2.74 <sup>a</sup>	2.57 <sup>a</sup>	2.56 <sup>a</sup>	2.64 <sup>a</sup>
	耗水模系数/%	17.08 <sup>a</sup>	16.20 <sup>a</sup>	16.01 <sup>a</sup>	16.72 <sup>a</sup>
拔节期—抽穗期	耗水量/mm	66.71 <sup>b</sup>	67.34 <sup>b</sup>	68.35 <sup>ab</sup>	69.06 <sup>a</sup>
	耗水强度/(mm·d <sup>-1</sup> )	3.34 <sup>b</sup>	3.37 <sup>b</sup>	3.42 <sup>ab</sup>	3.45 <sup>a</sup>
	耗水模系数/%	26.04 <sup>a</sup>	26.51 <sup>ab</sup>	26.70 <sup>a</sup>	27.32 <sup>b</sup>
抽穗期—灌浆期	耗水量/mm	76.44 <sup>b</sup>	78.15 <sup>ab</sup>	78.17 <sup>ab</sup>	78.93 <sup>a</sup>
	耗水强度/(mm·d <sup>-1</sup> )	4.50 <sup>b</sup>	4.60 <sup>ab</sup>	3.42 <sup>ab</sup>	4.64 <sup>a</sup>
	耗水模系数/%	27.94 <sup>a</sup>	28.78 <sup>a</sup>	24.99 <sup>a</sup>	29.21 <sup>a</sup>
灌浆期—成熟期	耗水量/mm	57.52 <sup>a</sup>	57.34 <sup>a</sup>	57.17 <sup>a</sup>	55.91 <sup>a</sup>
	耗水强度/(mm·d <sup>-1</sup> )	1.60 <sup>a</sup>	1.59 <sup>a</sup>	1.59 <sup>a</sup>	1.55 <sup>a</sup>
	耗水模系数/%	22.44 <sup>a</sup>	22.58 <sup>a</sup>	22.33 <sup>a</sup>	22.12 <sup>a</sup>
全生育时期	耗水量/mm	273.74 <sup>a</sup>	271.53 <sup>a</sup>	273.44 <sup>a</sup>	270.288 <sup>a</sup>

## 2.5 不同处理对燕麦产量构成的影响

产量构成因素除千粒重外,收获穗数、穗粒数、单穗粒重各处理均表现为:AM>A>M>CK,千粒重表现为:AM>M>A>CK。与CK相比,仅有处理

AM可以同时显著提高收获穗数、穗粒数和单穗粒重。处理A、M仅能显著提高穗粒数。与处理A相比,处理AM仅可以显著提高收获穗数。与处理M相比,处理AM可以显著提高收获穗数和穗粒数。以

收获穗数为例,处理 AM 较 A,M 和 CK 分别提高了 11.53%,12.68%和 18.27%。分析籽粒产量和生物产量可以发现,籽粒产量表现为:AM>A>M>CK,生物产量表现:AM>M>A>CK。处理 AM 可同时显著提高燕麦籽粒产量和生物产量。处理 A 仅可显著提高燕麦籽粒产量,处理 M 仅可显著提高燕麦生物

产量,且处理 A 和 M 在籽粒和生物产量间差异均不显著。处理 AM 较 A,M,CK 在籽粒产量和生物产量上分别提高 8.40%和 15.81%,11.69%和 10.80%,20.12%和 25.09%。可见相对于其余 3 个处理,保水剂和微生物菌肥配施在显著提高籽粒产量上主要是显著提高了收获穗数(详见表 3)。

表 3 不同处理下燕麦产量构成

处理	收获穗数/ ( $10^4 \cdot \text{hm}^{-2}$ )	穗粒数/ 个	单穗粒重/ g	千粒重/ g	籽粒产量/ ( $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ )	生物产量/ ( $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ )
CK	215.44 <sup>b</sup>	56.42 <sup>c</sup>	1.41 <sup>b</sup>	23.39 <sup>a</sup>	2 671.54 <sup>c</sup>	9 571.45 <sup>c</sup>
A	228.45 <sup>b</sup>	79.22 <sup>a</sup>	1.79 <sup>ab</sup>	23.79 <sup>a</sup>	2 960.42 <sup>b</sup>	10 338.50 <sup>bc</sup>
M	226.11 <sup>b</sup>	71.60 <sup>b</sup>	1.54 <sup>ab</sup>	23.99 <sup>a</sup>	2 873.35 <sup>bc</sup>	10 805.40 <sup>b</sup>
AM	254.79 <sup>a</sup>	81.30 <sup>a</sup>	1.87 <sup>a</sup>	24.58 <sup>a</sup>	3 209.17 <sup>a</sup>	11 972.65 <sup>a</sup>

## 2.6 不同处理对燕麦水分利用的影响

生育期内总耗水量、土壤贮水消耗处理间整体表现为:CK>M>A>AM。保水剂、微生物菌肥单施(A,M)和配施(AM)对生育期内耗水量无显著影响,但单施保水剂(A)和配施(AM)可以显著降低土壤贮水消耗,单施微生物菌肥(M)与不施用(CK)间差异不显著,与处理 A,M,CK 相比,处理 AM 土壤贮水消耗量上分别降低了 7.70%,17.51%,18.76%。水

分利用效率各处理表现为:AM>M>A>CK,水分产出率表现为:AM>A>M>CK。处理 AM 可同时显著提高水分利用效率和水分产出率,处理 A 仅可显著提高水分产出率,处理 M 仅可显著提高水分利用效率,且处理 A 和 M 在水分利用率和水分产出率之间差异不显著。处理 AM 较处理 A,M,CK 在水分利用效率和水分产出率上分别提高了 16.38%和 8.94%,12.19%和 13.08%,26.80%和 21.77%(详见表 4)。

表 4 不同处理下燕麦水分利用情况

处理	总耗水量/ mm	降水/ mm	土壤贮水消耗/ mm	水分利用效率/ ( $\text{kg} \cdot \text{mm}^{-1} \cdot \text{hm}^{-2}$ )	水分产出率/ ( $\text{kg} \cdot \text{mm}^{-1} \cdot \text{hm}^{-2}$ )
CK	273.74 <sup>a</sup>	255.30	18.44 <sup>a</sup>	37.35 <sup>c</sup>	10.43 <sup>c</sup>
A	271.53 <sup>a</sup>	255.30	16.23 <sup>bc</sup>	40.70 <sup>bc</sup>	11.65 <sup>b</sup>
M	273.46 <sup>a</sup>	255.30	18.16 <sup>ab</sup>	42.22 <sup>b</sup>	11.23 <sup>bc</sup>
AM	270.28 <sup>a</sup>	255.30	14.98 <sup>c</sup>	47.36 <sup>a</sup>	12.70 <sup>a</sup>

## 3 讨论与结论

前人研究表明,保水剂由于其特殊的分子结构,能够将土壤中有效的水分进行固持,施用当年就具有提高土壤水分保持能力效果<sup>[25-26]</sup>;微生物菌肥在发挥功效过程中,其疏松多孔的结构和较大的比表面积使其具有高吸附性能,能够储存大量水分,从而提高土壤含水量<sup>[27]</sup>。本研究表明保水剂、微生物菌肥单施和二者配施均能改善土壤水分状况,尤其以配施表现较好,且不论单施、配施均对 0—20,20—40 cm 土层影响显著,且随着降雨的增多,土壤水分条件的改善,处理间差异较大。这与前人研究结果一致,同时二者配施后能在短时间满足微生物菌肥生存环境要求,同时发挥保水剂和微生物菌肥功效,更好地促进了土壤水分的保持。宋双双等<sup>[20]</sup>研究表明,保水剂和微生物

菌肥混施改善了樟子松生长土壤固持水分的能力,这与本研究结果一致。

关于保水剂对作物耗水量影响的研究结果不尽一致,杨永辉等<sup>[28]</sup>研究表明施用保水剂能够显著降低小麦各生育阶段耗水量。杜社妮等<sup>[29]</sup>研究表明施用保水剂与不施用相比全生育时期玉米耗水量无显著差异。本研究表明单施保水剂、单施微生物菌肥虽然能够影响燕麦各生育阶段耗水特征,但其与 CK 处理基本无显著性差异,将保水剂和微生物菌肥配施后,对燕麦部分阶段耗水量有显著影响。在播种期—苗期,耗水量显著降低,拔节期—抽穗期和抽穗期—灌浆期,耗水量显著升高,说明在燕麦生长需水不作为关键耗水因素时,配施能够有效减少土壤水分无效散失,保水作用较好,但随着燕麦生长及农田环境变化,生长后期,作物生长需水起到关键作用,使保水

剂、微生物菌肥单施和配施耗水量均较高,全生育时期耗水量虽表现为:配施<单施保水剂<单施微生物菌肥<不施用,但差异不显著。同时本研究得出,保水剂和微生物菌肥配施能够显著降低作物生长对农田土壤原贮水的消耗,说明它能充分利用有限降水,这与杨永辉等<sup>[28]</sup>关于保水剂作用研究结果不一致,与杜社妮等<sup>[29]</sup>关于保水剂研究结果一致,这可能是由于旱作区域影响阶段耗水关键因素为降雨,研究区域降雨分布和土壤条件不一致造成的。

关于保水剂、微生物菌肥单施对作物生长及产量形成的研究均表明保水剂施用能够实现作物育苗<sup>[30]</sup>,促进作物生长发育<sup>[1,3]</sup>,最终实现作物增产<sup>[31]</sup>,提高水分利用效率<sup>[32]</sup>。微生物菌肥能够改善土壤性状<sup>[33-34]</sup>,促进作物生长发育,实现作物增产<sup>[16-17]</sup>。本研究得出单施保水剂和微生物菌肥具有促进作物生长以及提高水分利用的效果,这与前人研究结果一致。将二者配施后,能够在全生育时期显著促进燕麦生长,实现燕麦增产,提高水分利用效率,其作用效果显著优于单施保水剂和微生物菌肥,弥补了保水剂和微生物菌肥单施存在的问题<sup>[35-36]</sup>,这是由于微生物菌肥的作用需要良好的水分条件<sup>[14,37]</sup>,保水剂在生育前期将土壤中的水分进行贮存,给微生物菌肥进入土壤的适应环境和菌种繁殖提供了良好的水分条件,同时微生物菌肥在菌种繁殖、肥力发挥作用的同时,其含有的功能微生物产生大量的代谢产物,这些代谢产物会使土壤结构变松散,达到改善土壤结构的效果<sup>[30,38]</sup>。良好的土壤结构又为保水剂的长效发挥提供了基础。部分研究表明,保水剂在不同土壤结构中效果表现不一致<sup>[39-40]</sup>,在良好的土壤结构中能够较好地发挥其保水蓄水功能<sup>[41-42]</sup>,同时微生物菌肥能够增加土壤中养分含量。保水剂在锁住水分的同时也可以锁住养分,为旱作区作物生长提供较好的水肥水平,从而促进了旱作燕麦生长及产量形成,提高了水分利用效率。

综上所述,保水剂、微生物菌肥单施和配施均能在一定程度上改善燕麦生长发育,促进农田蓄水保墒,促进燕麦产量形成和水分利用率提高。其中,施用效果表现为:配施>保水剂单施>微生物菌肥单施。保水剂和微生物菌肥配施能够显著提高燕麦关键生育时期株高、单株叶面积和地上部干物质积累量,提高幅度分别为3.27%~25.96%,7.94%~23.06%和11.48%~21.88%;能够较好地实现农田蓄水保墒,提高农田土壤含水量(提高幅度为5.89%~11.50%),降低燕麦对土壤贮水的消耗(降低幅度为7.70%~18.76%);能够实现燕麦收获穗数、穗粒数的显著

增加,进而实现籽粒产量增加(提高幅度为8.40%~20.12%),有效促进生物产量形成(提高幅度为10.80%~25.09%),提高水分利用效率(提高幅度为12.19%~26.80%)和水分生产率(提高幅度为8.94%~21.77%)。本研究针对黄土高原旱作区农业生产现状,结合当前农业措施存在的问题,提出保水剂和微生物菌肥配施应用于作物生产;但本研究仅选取两种材料推荐用量进行配施,未对用量进行深入研究,因此下一步研究拟结合作物生产区域特点,进行用量配比研究,以期为黄土高原旱作区农业生产提供有效的蓄水保墒栽培措施。

#### [ 参 考 文 献 ]

- [1] 郭晓霞,刘景辉,田露,等.免耕轮作对内蒙古地区农田贮水特性和作物产量的影响[J].作物学报,2012,38(8):504-512.
- [2] 董英,郭绍辉,詹亚力.聚丙烯酰胺的土壤改良效应[J].高分子通报,2004(5):83-87.
- [3] 杜社妮,白岗栓,赵世伟,等.沃特和PAM保水剂对土壤水分及马铃薯生长的影响研究[J].农业工程学报,2007,23(8):72-79.
- [4] 杨永辉,吴普特,武继承,等.保水剂对冬小麦不同生育阶段土壤水分及利用的影响[J].农业工程学报,2010,26(12):19-26.
- [5] 杜社妮,白岗栓,赵世伟,等.沃特和PAM施用方式对土壤水分及玉米生长的影响[J].农业工程学报,2008,24(11):30-35.
- [6] 程闯胜,任树梅,杨培岭,等.保水剂对大田雨养玉米水肥利用效率影响的试验研究[J].灌溉排水学报,2014,33(6):141-144.
- [7] 石正海,刘文辉,张永超,等.增磷减氮配合保水剂可提高多年生西北羊茅种子产量[J].植物营养与肥料学报,2019,25(11):1967-1976.
- [8] 蒋美佳,刘晓林,冯钰梅,等.有机肥配施保水剂对紫色土水分入渗及氮素淋溶的影响[J].水土保持学报,2019,33(5):99-104.
- [9] 陆文聪,刘聪.化肥污染对粮食作物生产的环境惩罚效应[J].中国环境科学,2017,37(5):1988-1994.
- [10] 张瑞福,颜春荣,张楠,等.微生物肥料研究及其在耕地质量提升中的应用前景[J].中国农业科技导报,2013,15(5):8-16.
- [11] Hayat R, Ali S, Amara U, et al. Soil beneficial bacteria and their role in plant growth promotion: A review [J]. Annals of Microbiology, 2010,60(4):579-598.
- [12] 李俊,姜昕,李力,等.微生物肥料的发展与土壤生物肥力的维持[J].中国土壤与肥料,2006(4):1-5.
- [13] Beneduzi A, Ambrosin A, Passaglia L M P. Plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR): Their potential as antagonists and biocontrol agents [J]. Genetics

- and Molecular Biology, 2012, 35(4):1044-1051.
- [14] 许景钢, 孙涛, 李嵩. 我国微生物肥料的研发及其在农业生产中的应用[J]. 作物杂志, 2016(1):1-6.
- [15] 李鹏程, 苏学德, 王晶晶, 等. 腐植酸肥与菌肥配施对果园土壤性质及葡萄产量、品质的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2018(1):121-126.
- [16] 边巴卓玛, 马瑞萍, 卓玛. 不同施氮量下生物菌肥对西藏荞麦生长和土壤养分的影响[J]. 中国农学通报, 2019, 35(32):79-83.
- [17] 李琦, 姚拓, 杨晓玫, 等. 半干旱地区不同剂型微生物菌肥替代部分化肥对燕麦生长和品质的影响[J]. 干旱区资源与环境, 2020, 34(3):159-165.
- [18] 梁利宝, 许剑敏, 张小红, 等. 菌肥与有机无机肥配施对北方石灰性土壤物理性质的影响[J]. 灌溉排水学报, 2014, 33(6):105-108.
- [19] 武毅, 孙保平, 张建锋, 等. 微生物菌肥和保水剂对干旱区土壤肥力的影响研究[C]//中国环境科学学会科学技术年会论文集. 北京:中国环境科学学会, 2019.
- [20] 宋双双, 孙保平, 张建锋. 保水剂和微生物菌肥对半干旱区造林和土壤改良的影响[J]. 水土保持学报, 2018, 32(3):334-339.
- [21] 宋双双, 孙保平, 张建锋, 等. 保水剂与微生物菌剂对土壤水分、养分的影响[J]. 干旱区研究, 2018, 35(4):761-767.
- [22] 冯福学, 慕平, 赵桂琴, 等. 西北绿洲灌区水氮耦合对燕麦品种陇燕3号耗水特性及产量的影响[J]. 作物学报, 2017, 43(9):1370-1380.
- [23] 李雁鸣. 燕麦叶面积测定方法的初步研究[J]. 河北农业大学学报, 1993, 16(1):25-28.
- [24] 刘慧军, 刘景辉, 于健, 等. 土壤改良剂对燕麦土壤理化性状及微生物量碳的影响[J]. 水土保持学报, 2012, 26(5):68-72, 77.
- [25] Yazdani F, Allahdadi I, Akbari G A. Impact of super-absorbent polymer on yield and growth analysis of soybean(*Glycine max* L.) under drought stress condition [J]. Pakistan Journal of Biological Sciences, 2007, 10(23):4190-4196.
- [26] Islam M R, Hu Y G, Fei C, et al. Application of superabsorbent polymer: A new approach for wheat (*Triticum aestivum* L.) production in drought-affected areas of northern China [J]. Journal of Food, Agriculture & Environment, 2011, 9(1):304-309.
- [27] Han Yuguo, Yu Xinxiao, Yang Peiling, et al. Dynamic study on water diffusivity of soil with super absorbent polymer application[J]. Environmental Earth Sciences, 2013, 69(1):289-296.
- [28] 杨永辉, 吴普特, 武继承, 等. 保水剂对冬小麦不同生育阶段土壤水分及利用的影响[J]. 农业工程学报, 2010, 26(12):19-26.
- [29] 杜社妮, 耿桂俊, 于健, 等. 保水剂施用方式对河套灌区土壤水热条件及玉米生长的影响[J]. 水土保持通报, 2011, 32(5):270-276.
- [30] 田露, 李立军, 郭晓霞, 等. 不同保水材料对内蒙古黄土高原旱作玉米幼苗生长及土壤贮水特性的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2013, 31(5):54-60, 68.
- [31] 李倩, 刘景辉, 张磊, 等. 适当保水剂施用和覆盖促进旱作马铃薯生长发育和产量提高[J]. 农业工程学报, 2013, 29(7):83-90.
- [32] 田露, 刘景辉, 郭晓霞, 等. 抗旱保水材料在内蒙古黄土高原旱作区的蓄水保墒增产效应研究[J]. 节水灌溉, 2013(2):21-25, 28.
- [33] 姚延轩, 接伟光, 胡崑, 等. 微生物菌肥对大豆生长发育及根际土壤性质的影响综述[J]. 湖北农业科学, 2019, 58(20):21-24, 38.
- [34] 罗俊, 林兆里, 李诗燕, 等. 不同土壤改良措施对机械压实酸化蔗地土壤理化性质及微生物群落结构的影响[J]. 作物学报, 2020, 46(4):596-613.
- [35] 庄文化, 冯浩, 吴普特. 高分子保水剂农业应用研究进展[J]. 农业工程学报, 2007, 23(6):265-270.
- [36] 缙晶毅, 索升州, 姚丹, 等. 微生物肥料研究进展及其在农业生产中的应用[J]. 安徽农业科学, 2019, 47(11):13-17.
- [37] 彭飞, 黄敦元, 余江帆, 等. 生物菌肥对于油茶的应用前景以及施用条件和方法初探[J]. 江西林业科技, 2013(1):39-42.
- [38] 关菁, 史利平. 复合微生物肥和生物有机肥对不同土壤改良作用的机理探究[J]. 现代农业, 2016(1):28-29.
- [39] 李沼鹑, 师庆东, 韩舒, 等. 三种不同保水剂在不同土壤质地和埋深条件下保水性能的比较[J]. 节水灌溉, 2018(1):28-34.
- [40] 杨永辉, 赵世伟, 吴普特, 等. PAA 对不同土壤保水和蒸发性质的影响[J]. 灌溉排水学报, 2009, 28(5):119-122.
- [41] 谢伯承, 薛绪掌, 王纪华, 等. 保水剂对土壤持水性质的影响[J]. 水土保持通报, 2003, 23(6):44-46.
- [42] 张富仓, 李继成, 雷艳, 等. 保水剂对土壤保水持肥特性的影响研究[J]. 应用基础与工程科学学报, 2010, 18(1):120-128.