

# 不同保墒与土壤结构改良措施对土壤结构及 小麦、玉米水分利用的影响

杨永辉<sup>1,2</sup>, 武继承<sup>1,2</sup>, 赵世伟<sup>3</sup>, 潘晓莹<sup>1,2</sup>,  
张洁梅<sup>1,2</sup>, 高翠民<sup>1,2</sup>, 王越<sup>1,2</sup>, 何方<sup>1,2</sup>

(1. 河南省农业科学院 植物营养与资源环境研究所, 郑州 450002; 2. 农业部作物高效用水原阳科学观测实验站, 河南 原阳 453514; 3. 西北农林科技大学 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100)

**摘 要:**为探明不同保墒与土壤结构改良措施对小麦、玉米水分利用等的作用机理,采用大田试验,研究了秸秆覆盖、地膜覆盖、保水剂及有机肥对小麦—玉米生长、光合生理特征、产量、水分利用效率及土壤结构等。结果表明:地面覆盖和土壤结构改良措施均改善了土壤团粒结构,且促进了土壤有机碳含量的提高。同时,不同措施改善了小麦、玉米不同生育期的光合生理特征,提高了小麦、玉米不同生育期的株高、叶面积及生物量,且成产要素也显著提高,地膜覆盖较其他措施更利于小麦产量的提高,其较普通耕作增产 14.7%。对玉米而言,以秸秆覆盖和地膜覆盖处理增产效果较佳,分别较普通耕作增产 10.4% 和 10.3%。对小麦—玉米周年而言,地膜覆盖的总产量和总水分生产效率均最高,分别较普通耕作提高了 12.5% 和 17.1%。相关分析表明,小麦、玉米周年总产量和总水分生产效率与小麦不同生育期的土壤水分、灌浆期叶面积、小麦单产、玉米大喇叭口期的叶面积以及土壤有机碳含量密切相关。

**关键词:**小麦; 玉米; 地面覆盖; 有机肥; 保水剂; 水分利用

**中图分类号:** S141; S152; S156

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1005-3409(2018)02-0220-08

## Effects of Different Soil Moisture Conservation and Soil Structure Improvement Measures on Soil Structure and Water Use of Wheat and Maize

YANG Yonghui<sup>1,2</sup>, WU Jicheng<sup>1,2</sup>, ZHAO Shiwei<sup>3</sup>, PAN Xiaoying<sup>1,2</sup>,  
ZHANG Jiemei<sup>1,2</sup>, GAO Cuimin<sup>1,2</sup>, WANG Yue<sup>1,2</sup>, HE Fang<sup>1,2</sup>

(1. Institute of Plant Nutrition & Resource Environment, He'nan Academy of Agricultural Sciences, Zhengzhou 450002, China; 2. Yuanyang Experimental Station of Crop Water Use, Ministry of Agriculture, Yuanyang, He'nan 453514, China; 3. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

**Abstract:** To ascertain the mechanism of different soil moisture conservation and soil structure improvement measures on water use of wheat and maize, a field experiment was conducted to determine the growth, photosynthetic physiological characteristics, yields, water use efficiency of water and maize and soil structure under the straw mulching, plastic film mulching, water retaining agent and organic fertilizer. The results showed that the ground cover and soil structure improvement measures effectively improved the soil aggregate structure and increased the content of soil organic carbon. What's more, the different measures improved the photosynthetic characteristics of wheat and maize at different growth stages. The plant height, leaf area and biomass of wheat and maize at different growth stages increased, and the factors on production increased significantly, too. The plastic film mulching was more conducive to the improvement of wheat yield than the other measures, which increased the yield by 14.7% compared with the conventional tillage. For maize, the straw mulching and plastic film mulching treatments were conducive to the improvement of the yield, which increased the yields by 10.4% and 10.3%, respectively, compared with conventional tillage. For the total yields and water use efficiency of wheat and maize, the plastic film mulching treatment was the

highest, increasing yields by 12.5% and 17.1%, respectively, compared with the conventional tillage. Correlation analysis showed that the annual total yields and water use efficiency of wheat and maize were closely related to soil moisture at different growth stages of wheat, leaf area in the filling stage, wheat yield, leaf area in big trumpet period of the maize, and soil organic carbon content.

**Keywords:** wheat; maize; ground cover; organic fertilizer; super absorbent polymer; water use

随着全球气候变暖,干旱程度进一步加剧,农业生产受水分条件的限制逐步加重。而施用有机肥可增加土壤有机质,改善土壤结构,促进土壤蓄水保墒等功能,且有利于作物产量和水分利用率的提高<sup>[1-2]</sup>。同时,农用保水剂也具有改善土壤结构与孔隙状况<sup>[3]</sup>,减少土壤无效蒸发,改善作物生理特征,提高作物抗旱能力等作用<sup>[4-5]</sup>。

作物棵间蒸发是作物生长过程中水分无效损耗的重要途径<sup>[6]</sup>,而采用地面覆盖能有效减少作物棵间蒸发量,提高水分的有效利用,因为地表覆盖改变了表层土壤的理化性质,改善了土壤孔隙状况,促进了水分入渗,提高了土壤储水量,且能够抑制土壤蒸发,减少土壤无效水分损耗<sup>[7]</sup>,从而间接影响土壤水分的再分布过程<sup>[8]</sup>。相关研究表明<sup>[9-11]</sup>,覆盖玉米秸秆较传统耕作更利于水分利用效率的提高,而免耕覆盖玉米的蒸腾量与蒸发量比值远大于常规耕作<sup>[12]</sup>,从而促进了水分的有效利用。麦田秸秆覆盖后,能促进降雨的入渗,抑制土壤水分蒸发,提高深层土壤的水分蓄存,有利于植物根系下扎和利用深层土壤水分<sup>[13]</sup>。而地膜覆盖后切断了土壤水分与大气之间的交换,且地膜覆盖有利于田间微集雨,促进水分汇集到作物根部,同时地膜的反射作用减少了地表对太阳辐射的吸收,使土壤水分和温度相对稳定,有利于作物生长。相关研究<sup>[14-16]</sup>表明,旱作小麦、玉米农田使用地膜覆盖有较好的保墒增产效果。但在降雨较为充足的地区,在小麦、玉米轮作过程中地膜覆盖的作用效果如何,及秸秆覆盖、有机肥、保水剂对小麦的生长过程、光合生理特征及对玉米的后效作用如何,对小麦、玉米周年水分利用特征以及对土壤团粒结构、土壤有机碳的影响和其相互关系如何,却鲜见报道,需要深入研究。

因此,对地膜覆盖、秸秆覆盖、保水剂和有机肥条件下的小麦—玉米周年水分利用进行比较研究,旨在探明不同措施条件下小麦与玉米增产及水分利用的机理,为同类型区小麦玉米轮作过程中,节水增效的措施应用提供依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

本研究在通许现代农业开发基地进行,东经

114.450°,北纬 34.429°,海拔 62 m。研究区多年年均降雨量为 657.9 mm,降雨量主要分布在 6—9 月份,地表径流年份间差异较大,且旱涝并发,而旱灾多于涝灾。该地区土壤为壤质潮土,地势平坦且肥力均匀。耕层土壤有机质含量为 11.4 g/kg,全氮含量为 0.81 g/kg,碱解氮含量为 74.31 mg/kg,速效磷含量为 19.8 mg/kg,速效钾含量为 90.3 mg/kg。

### 1.2 试验设计

本研究共设置 5 个处理,包括:普通耕作(耕作深度为 15 cm)、秸秆覆盖(玉米秸秆粉碎为 1 cm,用量为 4 500 kg/hm<sup>2</sup>)、保水剂(45 kg/hm<sup>2</sup>)、有机肥(干鸡粪,750 kg/hm<sup>2</sup>)、地膜覆盖(小麦和玉米出苗后进行地膜铺设)。每个处理设置 3 个重复,随机区组排列。根据当年降雨和土壤水分状况,分别在小麦拔节期和玉米播种前灌水各 1 次,每次 45 mm,小麦、玉米周年共灌水 90 mm。小麦氮肥用量 180 kg/hm<sup>2</sup>,玉米氮肥用量 270 kg/hm<sup>2</sup>。磷肥为 135 kg/hm<sup>2</sup>,钾肥为 150 kg/hm<sup>2</sup>。小麦施肥方式均为播种前进行撒施翻耕后播种,保水剂也为撒施后翻耕播种耕作方式同对照。待小麦出苗后进行地膜覆盖。小麦收获后,在原有小麦小区中进行玉米免耕播种,玉米出苗后覆膜处理重新进行地膜铺设,田间统一管理。玉米播种时,种肥同播。除地膜处理外,其他处理均为小麦播种时实施。小麦品种为矮抗 58,玉米品种为郑单 958。本试验开始于 2012 年 10 月 22 日,为长期定位试验。本研究时间为 2014 年 10 月—2015 年 10 月。

### 1.3 测定项目与方法

1.3.1 光合参数测定 采用 Li-6400 RT 型光合仪进行光合测定。分别在小麦拔节期(2015 年 3 月 15 日)、抽穗期(2015 年 4 月 24 日)、灌浆期(2015 年 5 月 15 日)和玉米小喇叭口期(2015 年 7 月 19 日)、大喇叭口期(2015 年 8 月 7 日)、灌浆期(2015 年 8 月 28),在晴朗且无风时(9:30—11:00)进行的测定。

在小麦拔节期时测定小麦的最新全展叶,在小麦抽穗期和灌浆期测定小麦的旗叶。在玉米小喇叭口与大喇叭期测定玉米的最新全展叶,到灌浆期测定玉米的穗位叶。

主要测定的光合参数包括:净光合速率  $P_n$  [ $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ]、蒸腾速率  $T_r$  [ $\text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ]。

叶片的水分利用效率  $WUE(\mu\text{mol}/\text{mmol})$  采用计算公式<sup>[17-18]</sup>：

$$WUE = P_n / T_r \tag{1}$$

1.3.2 土壤水分的测定 在小麦和玉米不同生育期采用土钻取土烘干法测定 0—100 cm 土层土壤平均含水率。

1.3.3 株高、叶面积及生物量测定 在小麦、玉米不同生育期进行株高、叶面积及生物量的测定。其中株高采用精确度为 1 mm 的卷尺在相应小区随机采样 5 株进行测定,叶面积采用手持式叶面积仪进行测定,生物量为量得株高和叶面积后的样品进行杀青(105℃)、烘干(80℃)至恒重时进行称量。

1.3.4 小麦、玉米产量测定 于小麦收获时,在每小区收割 4 m<sup>2</sup> 的小麦产量进行记产。玉米采用每小区收取 3 行进行记产。

1.3.5 小麦、玉米水分生产效率计算

作物水分生产效率 $[\text{kg}/(\text{mm} \cdot \text{hm}^2)] = \text{作物籽粒产量}(\text{kg}/\text{hm}^2) / \text{作物生育期耗水量}(\text{mm}) \tag{2}$

作物生育期耗水量 $(\text{mm}) = \text{作物播种前 0—100 cm 土层的土壤储水量}(\text{mm}) + \text{作物生育期内的降雨量}(\text{mm}) + \text{作物生育期内的灌水量}(\text{mm}) - \text{作物收获时 0—100 cm 土层土壤的储水量}(\text{mm}) \tag{3}$

1.3.6 团聚体分级及土壤有机碳测定 水稳性团聚体采用维诺夫法<sup>[19]</sup>(湿筛法)分级测定,土壤有机碳采用改进的外加热重铬酸钾氧化法<sup>[20]</sup>。

1.4 数据处理

光合数据为 9 次重复的算术平均值,其他数据结果为 3 次重复的算术平均值,所得数据应用 SPSS 软件进行处理与分析。

2 结果与分析

2.1 小麦、玉米生长期降雨量分布特征

小麦、玉米不同生育期内的降雨量见图 1。可以看出,在小麦分蘖到越冬期间无有效降雨,越冬期后降雨逐渐增多,且到孕穗期时降雨量明显增多,之后又逐渐减小,到小麦收获玉米播种时降雨最少,玉米播种后降雨量明显增多,且玉米生育期内降雨量均较高。小麦生育期内总降雨量为 264.5 mm,玉米生育期内降雨量为 439.5 mm,小麦玉米生育期内总降雨量为 704.0 mm,较往年降雨量增加了 40 多 mm,主要集中在玉米生育中后期。

2.2 对小麦的影响

2.2.1 不同措施对土壤水分的影响 小麦不同生育阶段的土壤水分见表 1。在小麦生长过程中,地膜覆盖处理和秸秆覆盖处理的土壤含水量均高于其他处

理,其次为有机肥处理和保水剂处理,普通耕作处理全生育期的土壤含水量均较低。在小麦收获时,土壤含水率以地膜覆盖处理最高,其次为秸秆覆盖处理,有机肥处理及保水剂处理,普通耕作处理最低。

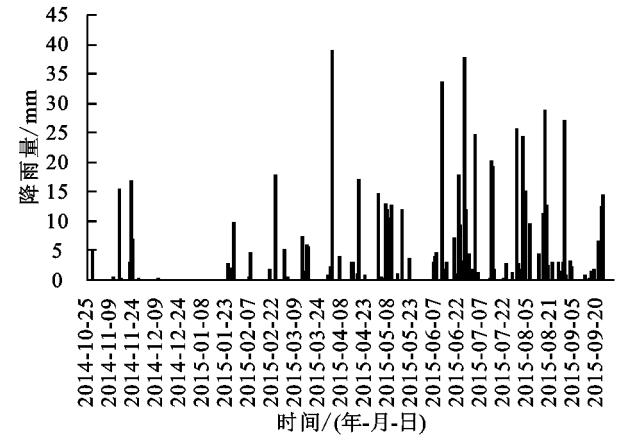


图 1 小麦玉米生育期内降雨分布特征

表 1 不同措施小麦不同生育阶段土壤含水量 %

处 理	分蘖期	越冬期	拔节期	抽穗期	灌浆期	收获期
普通耕作	22.5c	22.8c	13.1d	15.1c	15.2d	6.4d
秸秆覆盖	24.0b	26.8a	19.6a	16.4a	18.4b	10.3b
保水剂	22.4c	25.0b	16.0c	15.7b	18.7b	9.0c
有机肥	24.4b	25.0b	15.5c	16.1ab	16.6c	10.2b
地膜覆盖	26.1a	26.5a	17.3b	15.4bc	19.4a	13.3a

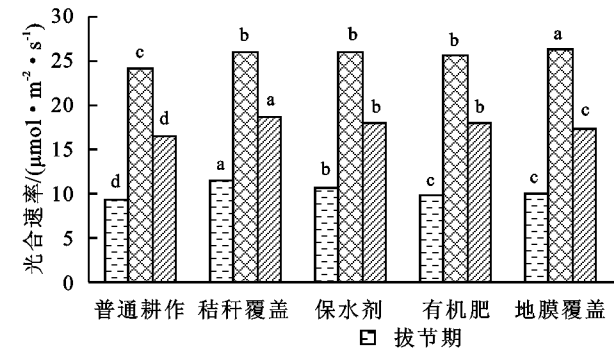
注:同列中不同字母表示不同处理间差异显著( $p < 0.05$ ),下表同。

2.2.2 不同措施下小麦光合生理特征分析 由图 2 可知,不同生育期的光合速率表现为抽穗期>灌浆期>拔节期。不同措施的小麦光合速率明显高于普通耕作。在拔节期,以秸秆覆盖处理的光合速率最高;在抽穗期,以地膜覆盖处理的光合速率较高,其次为秸秆覆盖处理,其他处理居中;到灌浆期,仍以秸秆覆盖处理的光合速率最高,保水剂处理次之,有机肥处理与地膜覆盖处理居中。而对蒸腾速率而言,在小麦拔节期,各处理的蒸腾速率差异较小。在抽穗期,以有机肥处理和地膜覆盖处理的蒸腾速率较低,而以普通耕作处理明显高于其他处理。而到灌浆期,仍以普通耕作处理的蒸腾速率较高,以保水剂处理最低。

由图 3 可知,在小麦拔节期,秸秆覆盖处理的叶片水分利用效率明显高于其他处理;在抽穗期,有机肥处理较其他处理高,地膜覆盖处理次之。到灌浆期,保水剂处理>秸秆覆盖处理>有机肥处理>地膜覆盖处理>普通耕作处理。说明,在小麦生育后期,保水剂处理更利于降低叶片蒸腾,提高叶片的水分利用效率。

2.2.3 不同措施对小麦不同生育期株高和叶面积的影响 由表 2 可知,随小麦生育期的推进,小麦的株高逐渐增大,而叶面积表现为先增加后减小,抽穗期

各处理叶面积最高。在拔节期以地膜覆盖处理株高最高,其次为有机肥处理,而叶面积仍以地膜覆盖最大,其次为有机肥处理。在抽穗期,以有机肥处理的株高最高,其次为地膜覆盖和保水剂处理。而叶面积



注:不同小写字母表示处理间差异显著( $p<0.05$ ),下同。

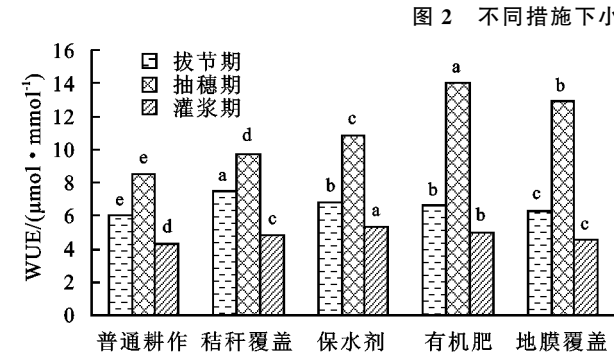


图 3 不同措施下小麦叶片水分利用效率分析

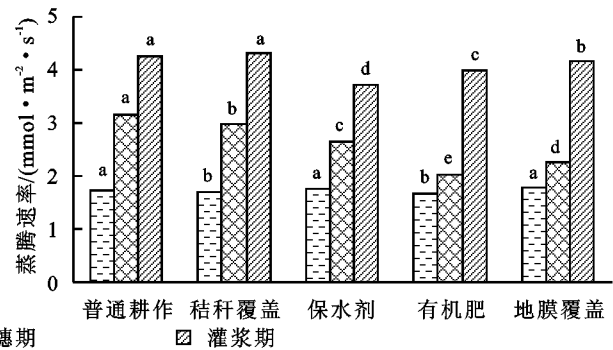
2.2.4 不同措施对小麦不同生育期生物量的影响 由表 3 可知,与普通耕作相比,不同措施均提高了小麦不同生育期生物量,且抽穗期和灌浆期的茎、叶、穗等生物量均较高。分蘖期和返青期均以有机肥和地膜覆

表 3 不同措施下小麦不同生育期生物量分析										
处理	分蘖期/ (10 株·g <sup>-1</sup> )	越冬期/ (10 株·g <sup>-1</sup> )	返青期/ (10 株·g <sup>-1</sup> )	拔节期/ (10 株·g <sup>-1</sup> )	抽穗期/(5 株·g <sup>-1</sup> )			灌浆期/(5 株·g <sup>-1</sup> )		
					茎	叶	穗	茎	叶	穗
普通耕作	0.5c	1.4d	3.1c	8.4c	15.4e	6.4bc	7.6c	7.3e	2.1c	6.5d
秸秆覆盖	0.6b	1.5c	3.1c	6.5d	16.7d	6.4bc	7.3c	12.5cd	2.7b	9.2c
保水剂	0.6b	2.0a	3.9b	13.4b	19.4c	6.6b	6.4d	11.8d	2.4b	9.1c
有机肥	0.8a	1.6b	4.2ab	8.6c	24.0b	6.1c	8.4b	13.7b	2.2bc	11.3b
地膜覆盖	0.7a	2.0a	4.5a	20.5a	37.1a	14.3a	14.6a	42.6a	8.7a	34.6a

2.2.5 不同措施对小麦成产要素及产量的影响 由表 4 可知,不同措施提高了小麦的株高、穗长、小穗数、穗粒数和千粒重,减少了小麦的不孕穗。地膜覆

表 4 不同措施下小麦成产要素及产量分析									
处理	株高/ cm	穗长/ cm	小穗数/ 粒	穗粒数/ 粒	不孕穗/ 个	千粒重/ g	产量/ (kg·hm <sup>-2</sup> )	水分生产效率/ (kg·mm <sup>-1</sup> ·hm <sup>-2</sup> )	
普通耕作	81.3d	7.0d	18.1c	31.9c	4.6a	49.9c	8109.1e	14.9c	
秸秆覆盖	85.3b	8.0c	19.5b	38.0b	4.5a	51.7a	9186.3b	17.1a	
保水剂	82.1c	8.2bc	19.3b	38.6b	4.2a	51.0a	8607.2c	15.5bc	
有机肥	82.9c	8.4b	20.1ab	46.5a	2.4c	50.3b	8577.4d	15.3bc	
地膜覆盖	86.6a	8.6a	20.5a	47.9a	3.4b	51.1a	9306.6a	15.8b	

以地膜覆盖最高。到灌浆期,各处理中以地膜覆盖处理和秸秆覆盖处理的株高明显高于其他处理。而叶面积则表现为以保水剂、秸秆覆盖和地膜覆盖处理明显高于其他处理,普通耕作处理最低。



盖处理小麦生物量较其他处理高。越冬期以后均以地膜覆盖处理生物量最高。且在抽穗期和灌浆期均以地膜覆盖处理的茎、叶和穗的生物量最高,其次为有机肥处理。

表 2 不同措施下小麦不同生育期株高、叶面积分析						
处理	拔节期		抽穗期		灌浆期	
	株高/ cm	叶面积/ cm <sup>2</sup>	株高/ cm	叶面积/ cm <sup>2</sup>	株高/ cm	叶面积/ cm <sup>2</sup>
普通耕作	24.6d	8.0c	70.0d	16.3c	80.8d	10.0c
秸秆覆盖	25.6c	8.2c	75.3c	15.0d	83.1a	14.6a
保水剂	26.3c	9.9b	76.5b	17.5b	82.7b	14.7a
有机肥	27.4b	10.7b	79.8a	12.5e	81.4c	12.2b
地膜覆盖	33.1a	13.2a	77.2b	22.3a	83.9a	14.1a

盖较其他措施更利于小麦产量的提高,其较普通耕作增产 14.7%。而水分生产效率以秸秆覆盖处理最高,地膜覆盖等处理次之,普通耕作处理仍最低。

### 2.3 对玉米的影响

2.3.1 对玉米光合生理特征的影响 从图 4 中可知,在小喇叭口期,秸秆覆盖处理的光合速率最高,有机肥处理次之,再者为保水剂处理,而普通耕作处理大于地膜覆盖处理。在大喇叭口期,保水剂处理>秸秆覆盖处理>地膜覆盖处理>有机肥处理>普通耕作处理。到灌浆期,地膜覆盖处理>秸秆覆盖处理>

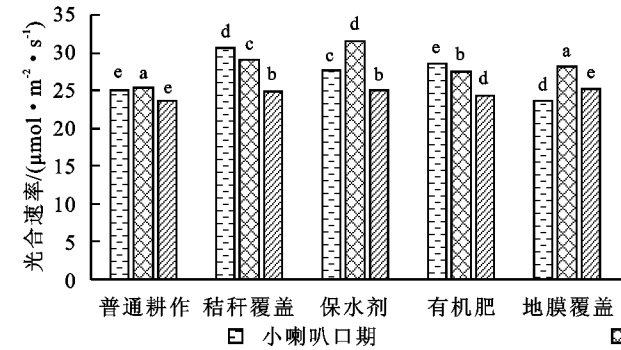


图 4 不同措施下玉米光合速率和玉米蒸腾速率分析

从图 5 中可知,随玉米生育期的推进,其叶片水分利用效率基本呈下降趋势。在小喇叭口期,保水剂处理>地膜覆盖处理>有机肥处理>普通耕作处理>秸秆覆盖处理较低。在大喇叭口期,以秸秆覆盖处理最高,而地膜覆盖处理最低。而到灌浆期,仍以秸秆覆盖处理的水分利用效率最高,其次为普通耕作处理、有机肥处理及地膜覆盖处理,保水剂处理最低。

2.3.2 对玉米不同生育期株高、茎粗及叶面积的影响 从表 5 中可知,不同措施提高了玉米不同生育期的株高、茎粗及叶面积。地膜覆盖对于玉米中后期的叶片数的提高有显著作用。各处理中,在玉米大喇叭

保水剂处理>有机肥处理>普通耕作处理。对蒸腾速率而言,在小喇叭口期,除了秸秆覆盖处理的蒸腾速率最高外,其他处理均低于普通耕作处理。在大喇叭口期,以地膜覆盖处理最高,保水剂处理、普通耕作处理和有机肥处理次之,秸秆覆盖处理最低。而到灌浆期,保水剂处理>地膜覆盖处理>有机肥处理>秸秆覆盖处理>普通耕作处理。

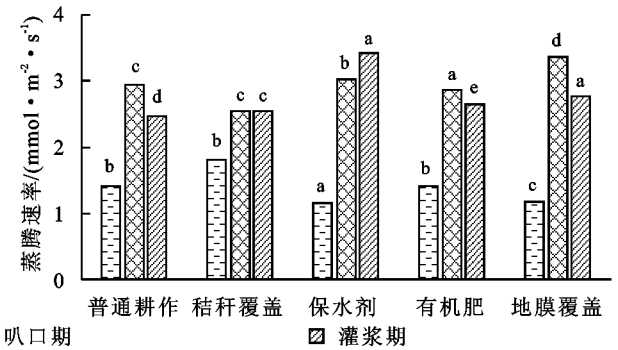


图 5 不同措施下玉米叶片水分利用效率分析

表 5 不同措施下玉米株高、茎粗及叶面积分析

处理	小喇叭口期			大喇叭口期				灌浆期			
	株高/	叶片数/	茎粗/	株高/	叶片数/	茎粗/	叶面积/	株高/	叶片数/	茎粗/	叶面积/
	cm	片	cm	cm	片	cm	cm <sup>2</sup>	cm	片	cm	cm <sup>2</sup>
普通耕作	85.0 d	8 b	2.0 a	211.0	13 d	2.8 b	530.6 d	220.0 b	14 c	3.5 b	552.9 e
秸秆覆盖	98.3 b	9 a	2.4 a	217.5	14 c	3.4 a	669.1 a	228.8 a	14 c	4.4 a	680.4 a
保水剂	101.3 a	8 b	2.1 a	210.0	15 b	2.9 b	629.6 b	218.4 b	15 b	3.5 b	630.6 d
有机肥	93.0 c	9 a	2.1 a	215.0	13 d	2.7 b	583.2 c	219.5 b	13 d	3.3 b	644.8 c
地膜覆盖	99.0 b	9 a	2.0 a	222.5	16 a	2.9 b	634.0 b	228.7 a	16 a	3.6 b	675.8 b

2.3.3 对玉米成产要素及产量的影响 从表 6 中可知,不同措施提高了玉米的株高、穗位、行数、行粒数、穗粗、有效穗长及产量。各处理中,秸秆覆盖和地膜覆盖处理增产效果较其他处理更显著,其次为有机肥和保水剂处理,分别较普通耕作增产 10.4%,10.3%,5.7%,2.4%。而对于玉米水分生产效率而言,地膜覆盖处理明显高于其他处理,有机肥处理次之,再者为保水剂处理与秸秆覆盖处理,分别较普通耕作处理提高 43.9%,37.1%,33.7%,14.8%。

2.3.4 小麦—玉米复合效应 对小麦—玉米周年效应而言(表 7),地膜覆盖的总产量最高,其次为秸秆覆盖处理、有机肥处理和保水剂处理,分别较普通耕作增产 12.5%,11.7%,5.4%和 4.2%。总耗水量以普通耕作处理最高,其次为秸秆覆盖处理、地膜覆盖处理、有机肥处理和保水剂处理。而小麦—玉米总水分生产效率表现为:地膜覆盖处理>秸秆覆盖处理>保水剂处理>有机肥处理>普通耕作,分别较普通耕作处理提高了 17.0%,14.4%,13.9%,12.4%。

表 6 不同措施下玉米成产要素及产量分析

处理	株高/ cm	穗位/ cm	茎粗/ cm	行数/ 行	两行 粒数/粒	穗粗 (周长)/cm	有效 穗长/cm	产量/ (kg·hm <sup>-2</sup> )	水分生产效率/ (kg·mm <sup>-1</sup> ·hm <sup>-2</sup> )
普通耕作	224.3	96.7b	2.7a	14b	69.5e	15.0d	16.0c	8976.0d	26.4e
秸秆覆盖	229.5	93.7c	2.7a	14b	79.6c	17.1b	16.3c	9901.5a	30.3d
保水剂	220.5	95.7b	2.8a	16a	83.8a	18.2a	19.4a	9192.0c	36.2b
有机肥	223.5	97.0b	2.6a	16a	76.0d	16.8b	17.6b	9489.0b	35.3c
地膜覆盖	229.0	102.7a	2.7a	14b	81.0b	15.9c	17.5b	9910.5a	38.0a

表 7 不同措施下小麦—玉米周年产量及水分利用分析

处理	小麦—玉米总产量/ (kg·hm <sup>-2</sup> )	总耗水量/ mm	总水分生产效率/ (kg·mm <sup>-1</sup> ·hm <sup>-2</sup> )
普通耕作	17085.0e	880.7a	19.4c
秸秆覆盖	19087.5b	859.8b	22.2a
保水剂	17799.0d	805.4d	22.1ab
有机肥	18066.0c	828.7c	21.8b
地膜覆盖	19216.5a	846.5b	22.7a

2.3.5 不同措施对土壤结构和有机碳含量的影响

从图 6 中可知,随粒级的减小,土壤团聚体含量表现为先降低再增加的趋势。保水剂更利于>2 mm 粒级团聚体含量的提高,其次为秸秆覆盖处理;而在 2~1 mm 粒级,秸秆覆盖处理最高;在 1~0.5 mm 和 0.5~0.25 mm 粒级,秸秆覆盖和地膜覆盖处理的团聚体含量明显高于其他处理;>0.25 mm 水稳性团聚体含量表征了土壤结构稳定性大小,各处理中以秸秆覆盖处理的>0.25 mm 水稳性团聚体含量较高,其次为地膜覆盖处理,这可能与秸秆和地膜很好地防止了雨滴的打击而使团粒结构不易分散所致。其次为保水剂和有机肥处理,普通耕作处理最低。

土壤结构的改善与其有机碳含量有关。各处理中,以地膜覆盖处理的有机碳含量最高,其次为秸秆覆盖、保水剂和有机肥处理,普通耕作处理最低。说明,进行表土覆盖、施用农用保水剂与增施有机肥均有利于土壤有机碳含量的提高,促进大团粒(>0.25 mm)结构的形成,提高土壤结构的稳定性。

2.3.6 小麦玉米周年产量、水分生产效率与小麦、玉米不同生育期生理、形态指标、土壤团粒结构及有机碳的相关性

通过对小麦、玉米周年产量及周年水分生产效率与小麦、玉米不同生育阶段的各指标及土壤物理性质等进行相关分析,与总产量和总水分生产效

率的相关性均不显著的指标未在表 8 中列出。

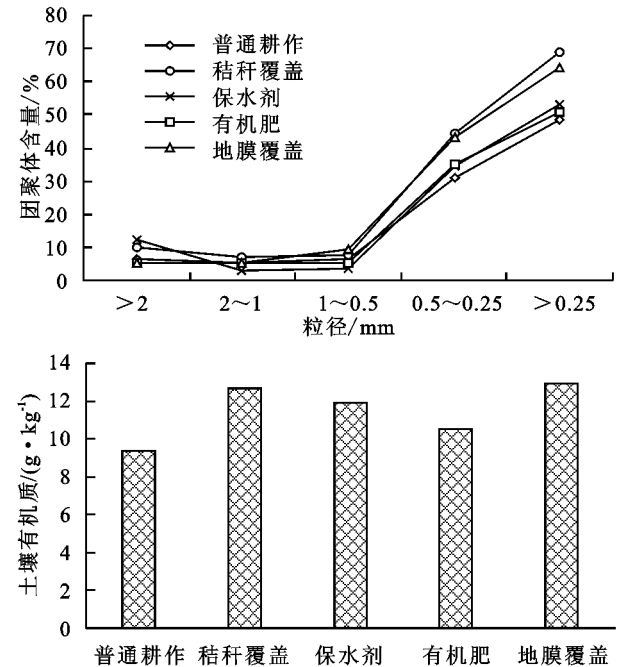


图 6 不同措施对土壤结构和土壤有机碳的影响

可以看出,小麦、玉米总产量与小麦灌浆期株高、返青期、拔节期和收获期土壤水分、收获时株高、小麦单产、玉米小喇叭口叶片数、大喇叭口(灌浆期)株高、大喇叭口(灌浆期)叶面积、玉米单产、0.5~0.25 mm 及>0.25 mm 水稳性团聚体含量、土壤有机碳呈显著或极显著正相关,而与<0.25 mm 水稳性团聚体呈极显著负相关。

小麦、玉米总水分生产效率与小麦灌浆期株高、叶面积、抽穗期光合速率、返青期水分、关键期水分、收获期水分、小麦收获期穗长、小穗数、产量、玉米小喇叭口期株高、大喇叭口期叶面积、灌浆期期叶面积、玉米行粒数、水分生产效率、灌浆期期光合速率、有机碳含量等呈显著或极显著正相关。

表 8 小麦玉米总产量与总水分生产效率与小麦、玉米不同生育期生理及形态指标、土壤团粒结构及有机碳的相关性分析

相关 系数	灌浆期	灌浆期	小麦抽穗期光合速率		小麦生育期土壤水分				小麦收获期				小喇叭口期		大喇叭口期		灌浆期		玉米	玉米收获期		水稳性团聚体含量					
	株高	叶面积			返青期	拔节期	灌浆期	收获期	株高	穗长	小穗数	产量	小麦水分生产效率	株高	叶片数	株高	叶面积	株高	叶面积	灌浆期光合速率	行粒数	产量	水分生产效率	0.5~0.25 mm	<0.25 mm	>0.25 mm	有机碳
总产量	0.87*	0.73	0.69	0.97**	0.90*	0.79	0.90*	0.92*	0.72	0.78	0.99**	0.79	0.67	0.82*	0.89**	0.84*	0.89*	0.94**	0.78	0.60	0.99**	0.49	0.98**	-0.92**	0.92**	0.90*	
水分生产效率	0.85*	0.91*	0.99**	0.92*	0.79	0.91*	0.88*	0.70	0.95**	0.89*	0.86*	0.58	0.92*	0.63	0.61	0.87*	0.49	0.95**	0.93**	0.89*	0.78	0.83*	0.75	-0.65	0.65	0.89*	

注:\*代表  $p<0.05$ ,\*\*代表  $p<0.01$ 。

### 3 讨论

地膜覆盖、秸秆覆盖是旱地蓄水保墒,提高作物产量的有效措施<sup>[21-23]</sup>。地面覆盖可有效降低土体的无效蒸发<sup>[24]</sup>,秸秆覆盖能够增加对降雨的拦蓄,促进水分就地入渗<sup>[25]</sup>,地膜覆盖能够促进下层水分向上移动,提高土壤水分的利用率。秸秆覆盖可稳定土壤温度,使土壤微生物数量及活性提高,从而提高养分的有效性,并能有效改善土壤理化性状,促进作物对水分养分的吸收与利用<sup>[26-27]</sup>。有机肥和保水剂均具有改善土壤结构,减少土壤无效蒸发,蓄水保墒等作用<sup>[2-3]</sup>。本研究发现,在降雨较为充沛的豫东地区,采用地膜覆盖、秸秆覆盖、保水剂及有机肥等措施均改善了土壤团粒结构,提高了土壤的有机碳含量,有利于蓄水保墒,而地膜覆盖和秸秆覆盖处理效果更为显著。

土壤含水率与叶片的净光合速率呈显著正相关<sup>[28-29]</sup>,而合理的技术措施能够缓解作物的受旱程度,促进作物光合能力的提高<sup>[30]</sup>,减少水分的无效损失,促进作物的水分利用。本研究发现,不同保墒与土壤结构改良措施均提高了小麦生长过程的土壤含水率,且地膜覆盖和秸秆覆盖处理效果更佳。不同措施的小麦和玉米的光合速率和叶片水分利用效率也均明显高于普通耕作。随小麦生育期的推进,其叶片水分利用效率表现为先增加再降低的趋势,而玉米的叶片水分利用效率随其生育期的推进,表现为逐渐减低的趋势。这可能与小麦、玉米的不同生育期生理特点及土壤含水率之间的相互关系有关,有待进一步研究。

长期连续覆盖或在作物生长过程均进行覆膜会导致作物水分利用率降低,甚至减产<sup>[31]</sup>。而增施有机肥可促进作物根系活力增强,延缓根系衰老<sup>[32]</sup>,且地膜覆盖结合有机肥能减缓或缓解作物早衰<sup>[33]</sup>。本研究发现,不同保墒与土壤结构改良措施改善了小麦、玉米不同生育期的形态指标,且以地膜覆盖处理效果较佳,而秸秆覆盖处理在小麦抽穗期后效果较为显著。与其他处理相比,地膜覆盖更利于小麦产量的提高。这是因为虽然地膜覆盖会导致小麦生长过旺而消耗水分过快,但其具有较强的减少地面无效蒸发的作用,加之小麦生育中后期降水较多,不会因后期降雨不足而导致严重缺水,因此增产效果显著。这与陈玉华等<sup>[33]</sup>研究结果一致。而玉米的增产效果以秸秆覆盖处理和地膜覆盖处理为佳,且水分生产效率仍以地膜覆盖处理最高,可能是因为地膜覆盖减少了水分无效蒸发,而促进了植株蒸腾,使有效耗水比率提高<sup>[10]</sup>。

不同保墒与土壤结构改良措施通过改善土壤水分环境与生理特性,从而促进小麦、玉米周年产量及

水分利用能力的提高。本研究发现,不同处理中,地膜覆盖处理更利于小麦、玉米周年总产量和总水分生产效率的提高。说明,在降雨量较为丰富的豫东地区,地膜覆盖的增产和节水效果仍十分显著。这与张保军<sup>[34]</sup>和王有宁<sup>[35]</sup>等研究结果一致,而与薛少平<sup>[31]</sup>和张冬梅<sup>[36]</sup>等研究结果相反,这可能与土壤类型或降雨量有关,有待进一步深入研究。

### 4 结论

不同耕作与土壤结构改良措施提高了小麦不同生育期的土壤含水率。在小麦不同生育时期,地膜覆盖和秸秆覆盖均更利于提高土壤的含水率。同时,不同措施改善了作物不同生育时期的生理特征。在小麦拔节期和灌浆期,秸秆覆盖更利于小麦光合速率的提高,而在抽穗期,地膜覆盖处理明显高于其他处理。对小麦的叶片水分利用效率而言,在拔节期,以秸秆覆盖处理最高;在抽穗期,有机肥和地膜覆盖处理较其他处理高。但到灌浆期,以保水剂处理最高,其次为秸秆覆盖、有机肥和地膜覆盖处理,普通耕作最低。对后茬玉米而言,在小喇叭口期、大喇叭口期和灌浆期,分别以秸秆覆盖处理、保水剂处理和地膜覆盖处理在相应生育期的光合速率较其他处理高。对玉米叶片水分利用效率而言,在小喇叭口期,以保水剂处理的最高,说明保水剂在玉米生长前期的后效作用较为显著,其次为地膜覆盖和有机肥处理。在大喇叭口期和灌浆期,均以秸秆覆盖处理叶片水分利用效率最高。

此外,地膜覆盖处理更利于增加玉米中后期的叶片数,这有助于作物对光能的利用而合成更多的有机物质。在玉米大喇叭口期以后,秸秆覆盖处理更利于提高玉米茎粗和叶面积,其次为地膜覆盖处理。最终,地膜覆盖更利于提高小麦的产量,较普通耕作增产14.7%。而玉米的增产和水分生产效率均以地膜覆盖处理为佳,其水分生产效率较普通耕作处理提高了43.9%,对于小麦、玉米周年效应而言,地膜覆盖处理的周年总产量和总水分生产效率明显高于其他处理,分别较普通耕作提高了12.5%和17.1%。

相关分析表明,小麦不同生育期的土壤水分、灌浆期叶面积、小麦单产、玉米大喇叭口期的叶面积以及土壤有机碳含量均对小麦、玉米周年总产量和总水分生产效率的提高具有积极作用。而地膜覆盖和秸秆覆盖对于以上相关指标的改善优于其他措施,因此利于了小麦、玉米周年增产和增效。但地膜覆盖或秸秆覆盖与有机肥或保水剂相结合的效果如何,有待下一步研究。

## 参考文献:

- [1] Bolan N S, Adriano D C. Effects of organic amendments on the reduction and phytoavailability of chromate in mineral soil [J]. *J. Environ. Qual.*, 2003, 32(1):120-128.
- [2] Pagliai M, Vignozzi N, Pellegrini S. Soil structure and the effect of management practices[J]. *Soil Till. Res.*, 2004, 79(2):131-143.
- [3] 杨永辉,武继承,韩庆元,等.保水剂对土壤孔隙影响的定量分析[J].*中国水土保持科学*,2011,9(6):88-93.
- [4] 杨永辉,吴普特,武继承,等.保水剂对冬小麦土壤水分和光合生理特征的影响[J].*中国水土保持科学*,2010,8(5):36-41.
- [5] 杨永辉,吴普特,武继承,等.复水前后冬小麦光合参数对保水剂用量的响应[J].*农业机械学报*,2011,42(7):116-123.
- [6] 王健,蔡焕杰,陈凤,等.夏玉米田蒸发蒸腾量与棵间蒸发的试验研究[J].*水利学报*,2004(11):108-113.
- [7] 复鑫,彭文英,张科利,等.北京保护性耕作条件下土壤水分动态变化研究[J].*土壤通报*,2009(1):28-33.
- [8] 常春丽,刘丽平,张立峰,等.保护性耕作的发展研究现状及评述[J].*中国农学通报*,2008,24(2):167-172.
- [9] 晋凡生,张宝林.免耕覆盖玉米秸秆对旱原地土壤环境的影响[J].*生态农业研究*,2000,8(3):47-50.
- [10] 赵聚宝,梅旭荣,薛红军,等.秸秆覆盖对旱地作物水分利用效率的影响[J].*中国农业科学*,1996,29(2):59-66.
- [11] 钟兆站,赵聚宝,梅旭荣.旱地春玉米草纤维膜覆盖的农田生态效应[J].*生态农业研究*,1998,6(3):25-29.
- [12] Phillips R E, Phillips S H. No-tillage Agriculture Principles and practices[M]. Van Nostrand Reinhold Company, 1984.
- [13] Lal R. No-tillage effects on soil properties under different crops in western Nigenia [J]. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 1976, 40:762-768.
- [14] 宋淑亚,刘文兆,王俊,等.覆盖方式对玉米农田土壤水分、作物产量及水分利用效率的影响[J].*水土保持研究*,2012,19(2):210-212,217.
- [15] 慕松,司马兰兰,辛少仙.玉米覆膜沟穴播综合栽培技术对产量和水分利用效率效应的试验研究[J].*干旱地区农业研究*,2000,18(4):13-18.
- [16] 梁勇,杨彩霞.临潭县旱区地膜春小麦覆膜方式对比试验初报[J].*干旱地区农业研究*,2001,19(2):25-30.
- [17] Fischer R A, Turner N C. Plant production in the arid and semiarid zones[J]. *Annual Review of Plant Physiology*, 1978, 29:277-317.
- [18] Powel S B. Photo inhibition of photosynthesis induced by visible light [J]. *Annual Review of Plant Physiology*, 1984, 35:15-44.
- [19] 中国科学院土壤研究所.土壤物理性质测定方法[M].北京:科学出版社,1978.
- [20] 林心雄,文启孝,徐宁.广州地区土壤中植物残体的分解速率[J].*土壤学报*,1985,22(1):47-55.
- [21] 李华,王朝辉,李生秀.旱地小麦地表覆盖对土壤水分硝态氮累积分布影响[J].*农业环境科学学报*,2011,30(7):1371-1377.
- [22] Li F M, Guo A H, Wei H. Effects of clear plastic film mulch on yield of spring wheat. [J]. *Field Crops Research*, 1999, 63(1):79-86.
- [23] Niu J Y, Gan Y T, Zhang J W, et al. Postanthesis dry matter accumulation and redistribution in spring wheat mulched with plastic film [J]. *Crop Sci.*, 1998, 38:1562-1568.
- [24] 许翠平,刘洪禄,车建明,等.秸秆覆盖对冬小麦耗水特征及水分生产率的影响[J].*灌溉排水*,2002,21(3):24-27.
- [25] 张秋英,李发东,欧国强,等.土壤水对降水和地表覆盖的响应[J].*北京林业大学学报*,2005,27(5):37-41.
- [26] 陈素英,张喜英,裴冬,等.玉米秸秆覆盖对麦田土壤温度和土壤蒸发的影响[J].*农业工程学报*,2005,21(10):171-173.
- [27] 蔡太义,贾志宽,黄耀威,等.中国旱作农区不同量秸秆覆盖综合效应研究进展 I. 不同量秸秆覆盖的农田生态环境效应[J].*干旱地区农业研究*,2011,29(5):63-68,74.
- [28] 高飞,贾志宽,路文涛,等.秸秆不同还田量对宁南旱区土壤水分、玉米生长及光合特性的影响[J].*生态学报*,2011,31(3):777-783.
- [29] 杨永辉,武继承,李学军,等.耕作和保墒措施对冬小麦生育时期光合特征及水分利用的影响[J].*中国生态农业学报*,2014,22(5):534-542.
- [30] 王靖,林琪,倪永君,等.旱地保护性耕作对冬小麦光合特性及产量的影响[J].*麦类作物学报*,2009,29(3):480-483.
- [31] 薛少平,朱琳,姚万生,等.麦草覆盖与地膜覆盖对旱地可持续利用的影响[J].*农业工程学报*,2002,18(6):71-73.
- [32] 张永清,苗果园.水分胁迫条件下有机肥对小麦根苗生长的影响[J].*作物学报*,2006,32(6):811-816.
- [33] 陈玉华,张岁岐,田海,等.地膜覆盖及施用有机肥对地温及冬小麦水分利用的影响[J].*土壤通报*,2010,3(3):59-63.
- [34] 张保军,韩海,朱芬萌,等.地膜小麦土壤温度动态变化研究[J].*水土保持研究*,2000,7(1):59-62.
- [35] 王有宁,王荣堂,董秀荣.地膜覆盖棉花、玉米、大豆地的降温效应研究[J].*中国农业气象*,2003,24(4):45-47.
- [36] 张冬梅,池宝亮,黄学芳.地膜覆盖导致旱地玉米减产的负面影响[J].*农业工程学报*,2008,24(4):99-102.