

马 玉,徐士璵,张 斌,等. 覆盖栽培对旱地冬小麦土壤肥力及产量的影响[J]. 江苏农业科学,2025,53(1):124-132.

doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2025.01.018

覆盖栽培对旱地冬小麦土壤肥力及产量的影响

马 玉¹,徐士璵¹,张 斌¹,卢杍达¹,王可琳¹,周 静¹,李常成¹,王小平¹,刘梦云^{1,2}

(1.西北农林科技大学资源与环境学院,陕西杨凌 712100; 2.富平现代农业综合试验示范站,陕西富平 711799)

摘要:在土壤表面覆盖秸秆、薄膜等可以控制土壤理化性质,使之朝着增加农作物产出的方向发展。这种种植技术可以有效提高农田利用自然降水的效率,增强保墒能力,演化出多种栽培模式。然而,已有研究未能充分比较多种栽培模式对作物产量的影响,限制了试验结果应用于旱区雨养小麦集雨保墒和高产稳产等方面的研究。以渭北旱塬区雨养小麦为研究对象,设计传统栽培模式(T)、秸秆覆盖(SM)、地膜覆盖(PM)、裸露垄沟(BRF)、垄上覆膜沟内秸秆覆盖(MRF)、绿肥轮作(GM)6种栽培模式的对比试验,以探究农田土壤理化性质及小麦产出对上述栽培模式的响应。结果表明:(1)与传统栽培相比,除 BRF 处理外,各栽培模式均提高了土壤有机碳含量和孔隙度大小,降低了土壤容重,有效提高了土壤酸碱度;其中,SM 模式和 MRF 模式较为突出,前者使硝态氮含量增长了 32.6% (0~10 cm),后者使硝态氮含量增长了 58.5% (>10~20 cm)。(2)产量方面发现 GM 模式>PM 模式>MRF 模式>BRF 模式>SM 模式,冬小麦的产量分别提高了 51.21%、22.04%、19.58%、15.46%、0.13%,水分利用效率分别提高了 54.56%、22.26%、13.73%、11.77% (SM 处理水分利用效率较 T 处理降低);冬小麦产量在不同栽培模式下与水分利用效率(相关系数 $r=0.99$)呈显著正相关关系,说明水分利用效率的变化对冬小麦产量的影响十分显著。因此,绿肥轮作栽培模式在提高冬小麦生产力的同时,也能提升渭北旱地土壤肥力水平,是适宜渭北旱塬区的冬小麦新型增产模式。

关键词:渭北旱塬区;水分利用效率;覆盖栽培;冬小麦产量

中图分类号:S512.1+10.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2025)01-0124-09

旱地农业历史悠久,是世界农业的重要生产方式,其耕地面积和粮食作物生产量分别占世界的 82% 和 60%^[1-2]。渭北旱塬,位于黄土高原南部,是重要的旱作农业区,主要种植冬小麦、春玉米等。

收稿日期:2024-01-05

资助项目:国家重点研发计划(编号:2016YFC0501703);陕西省自然科学基金基础研究计划(编号:2017JZ008);中国科学院重点部署项目(编号:KFZD-SW-306)。

作者简介:马 玉(1999—),女,陕西榆林人,硕士,从事资源利用与植物保护研究。E-mail:ama@nwafu.edu.cn。

通信作者:刘梦云,博士,教授,从事土地生态恢复方面的碳循环、生态系统服务功能评价等方面的研究。E-mail:lm471993@163.com。

该区降水量少,分布不均,容易在冬小麦生育期造成水分亏缺的现象,极大程度上制约该区域冬小麦产量^[3-4]。因此,旱区亟需寻求可提高有限降水利用率和集雨保墒能力的农业生产方案,以稳定并提高小麦产量。

传统栽培模式因地表长期裸露,导致八成以上的农田土壤水分向大气散失,小麦生产始终处在中低水平^[5]。因此,通过改变冬小麦栽培方式来改善土壤性状是增加粮食作物生产的有效手段。地膜覆盖、秸秆杂物覆盖,对土壤理化性质有改善作用,对土壤水热条件有调节作用,对土壤蓄水量、作物

[21]冯 瑜,陈 华,付利波,等. 利用绿肥提高云南抚仙湖径流区烟田土壤养分和烤烟品质[J]. 植物营养与肥科学报,2023,29(11):2083-2094.

[22]Sänger A, Reibe K, Mumme J, et al. Biochar application to sandy soil: effects of different biochars and N fertilization on crop yields in a 3-year field experiment[J]. Archives of Agronomy and Soil Science, 2017, 63(2): 213-229.

[23]Wright A J, Back M A, Stevens M, et al. Evaluating resistant brassica trap crops to manage *Heterodera schachtii* (Schmidt) infestations in eastern England[J]. Pest Management Science,

2019, 75(2): 438-443.

[24]Liu Y B, Li J S, Stewart C N Jr, et al. The effects of the presence of Bt-transgenic oilseed rape in wild mustard populations on the rhizosphere nematode and microbial communities[J]. The Science of the Total Environment, 2015, 530/531: 263-270.

[25]程培军,郝浩浩,张 翔,等. 不同绿肥品种部分替代化肥对烟叶质量及土壤肥力的影响[J]. 山西农业科学, 2021, 49(7): 882-887.

[26]罗 云,杨焕文,王绍坤,等. 轮作与连作对美引品种 NC102 和 NC297 烟叶品质的影响[J]. 安徽农业科学, 2016, 44(27): 15-17.

产量有提高作用^[6-7]。在这里,地膜的应用可以抑制农田中杂草的生长,避免营养成分的流失,降低土壤的水分蒸发,从而推动作物的生长并增加其产量^[8];而秸秆含有丰富的营养元素(比如氮、磷、钾等),秸秆杂物覆盖处理能改良土壤物理性质、提高土壤持水保水能力,进而增加作物收获量^[9-10]。垄沟覆膜条件下,影响土壤理化性质的有关研究表明,相比于传统栽培,垄作栽培可减少膜下土壤板结的现象,改善小麦根际土壤的微生物环境,从而达到增产效果^[11];垄沟覆膜则可改善土壤水分条件,提高水分利用效率^[12]。近年来,垄作覆膜栽培模式通过起垄抑制膜下杂草生长,能减少除草支出,同时缓和粮食增产和农业节水的矛盾,在旱作农业区,是易于推行的农业生产可持续发展途径。绿肥是通过翻压或堆制新鲜植物体实现土壤培肥,以此提供农作物所需养分^[13],是一种养分充足的优质生物肥源。与裸地种植相比,种植绿肥能增加有机物的输入,同时改变土壤微环境,并进一步改善土壤物理性状,增加作物产量^[14]。

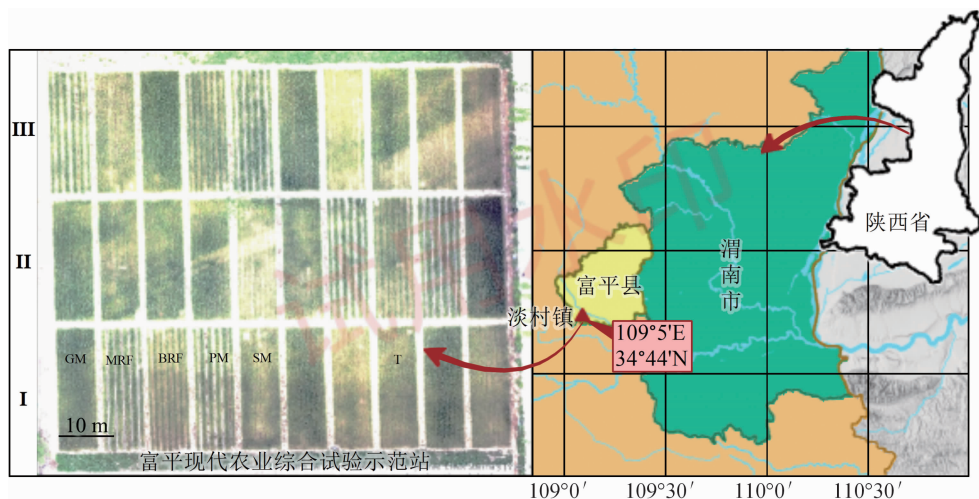
然而,目前大多数研究仅在 2~3 种栽培模式水平下分析作物理化性质及产量的变化趋势,未能充分比较多种栽培模式对作物产量的影响。因此,本研究设计了 6 种栽培模式,分析不同处理在冬小麦

不同生育期内对土壤产生的影响,即 0~10 cm 和 10~20 cm 的土壤温度以及土壤含水量;以及成熟期土壤容重、孔隙度、速效氮($\text{NO}_3^- - \text{N}$ 、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$)、土壤有机碳(SOC)含量及 pH 值,探索适宜当地作物生长的栽培模式,为提高旱地作物产量、农业可持续发展提供理论基础。研究的主要目标包括:对冬小麦农田土壤物理化学性质的影响进行不同栽培模式的分析;在分析冬小麦产量与各指标之间的相关关系的同时,明确不同栽培模式对冬小麦产量及水分利用率的影响。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

本研究的试验点为陕西省渭南市富平现代农业综合试验示范站(34°44'N, 109°5'E, 图 1),位于渭北旱塬东部。试验站处于陕西关中平原和黄土高原的过渡区,位于渭北旱塬东部的陕西省富平县淡村镇,海拔 511 m,属暖温带半湿润半干旱季风气候,四季干湿、光照充足。在冬小麦生长期,降水集中在 9—10 月和第 2 年 5—6 月,平均降水量约为 667 mm,平均温度 11.5~13.6℃(图 2)。试验田为旱地雨养冬小麦长期定位试验田,采用冬小麦—夏休闲模式处理,属典型的旱作农业地区。



左—不同栽培模式;右—富平现代农业综合试验示范站位置

图1 研究区概况

1.2 试验设计

本试验采用人工条播的播种方式,冬小麦的品种为小偃 22。试验于 2021 年秋播开始至 2022 年结束(表 1),采用随机区组设计,小区面积为 90 m² (5 m×18 m),每个模式重复 3 次,试验共设有 6 个

不同模式(表 2)。冬小麦的播种日期为 10 月上旬,生育期所需水分均来源于降水,采收日期为 6 月上中旬。除栽培模式外其他条件均相同,每个小区化肥用量:N 为 1.21 kg, P₂O₅ 为 0.81 kg。

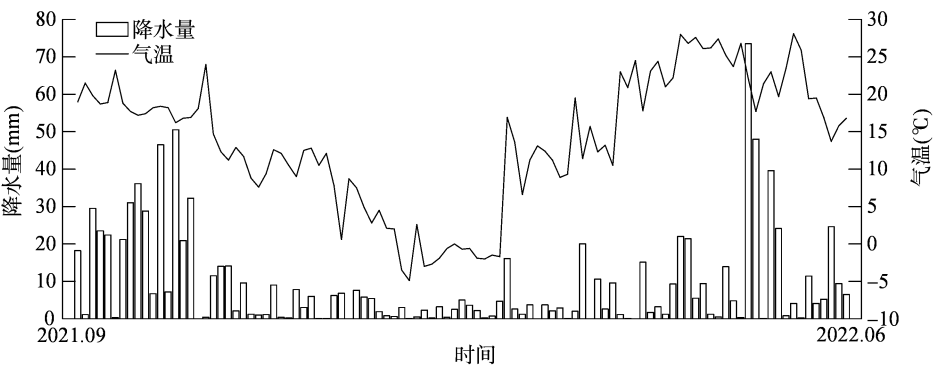


图2 生育期平均气温和降水量

表 1 野外观测时间

生育时期	观测时间(年-月-日)
播种期	2021-09-30
越冬期	2021-11-18
拔节期	2022-04-02
灌浆期	2022-05-08
成熟期	2022-06-01

1.3 土样采集及测定方法

1.3.1 田间土样采样 分别于小麦不同生育时期,用直径 5 cm 的土钻在小区内以“S”形按照 0 ~ 10、>10 ~ 20 cm 2 层取样,样品装入密封袋,带回实验室。在实验室中,将秸秆、植物残留物及夹杂在土样中的石块去除,将其中一部分土样置于 4 ℃ 的冷藏室中保存,另一部分经 1 mm 和 0.25 mm 的筛网分别自然风干保存。

表 2 试验处理描述

栽培方法	代码	栽培方法描述
传统栽培	T	传统平作栽培不起垄不覆膜
秸秆覆盖	SM	将上季秸秆粉碎为 5 ~ 10 cm 的细段于播种后均匀覆盖在各小区土壤
地膜覆盖	PM	地膜行距为 60 cm,宽度为 45 cm,地膜厚度为 0.008 mm
裸露垄沟	BRF	各小区宽度设置为 35 cm 并进行起垄工作,垄上高度为 15 cm,沟内宽度为 60 cm
垄上覆膜 沟内秸秆覆盖	MRF	将上季秸秆粉碎为 5 ~ 10 cm 的细段于播种后均匀覆盖在各小区土壤;分别进行起垄工作,宽度、垄上高度和沟内宽度分别设置为 35、15、60 cm,并且垄上进行地膜覆盖,与地膜覆盖小区尺寸相同
绿肥轮作	GM	将种植的绿肥进行粉碎和翻压(绿肥品种为绿豆),深度约为 20 cm

1.3.2 土壤物理性质 土壤容重(BD)采用环刀法测定;土壤总孔隙度计算公式如下:

$$\text{总孔隙度} = \left(1 - \frac{BD}{P}\right) \times 100\%。 \quad (1)$$

式中: P 为土壤比重(取平均值 2.65 g/cm^3)。

利用曲管式地温计,监测 0 ~ 5、0 ~ 15 cm 处土壤温度。土壤含水量采用烘干法测定,将其放置在 $105 \text{ }^\circ\text{C}$ 的烘箱中烘至恒重后称其重量。

冬小麦生育期耗水量计算见公式(2):

$$ET = P + U \pm \Delta W。 \quad (2)$$

式中: ET 表示冬小麦生育期总耗水量,mm; P 表示冬小麦生育期内的降水量,mm; U 表示地下水补给,mm;由于地下水埋深在 80 m 以下,无法补给,故 $U = 0$; ΔW 表示时段内土壤储水量的变化量,mm^[15]。因此,公式(2)可简化为公式(3):

$$ET = P + \Delta W。 \quad (3)$$

则水分利用效率(WUE)和土壤储水量(SWS)可分别按公式(4)及公式(5)计算:

$$WUE = \frac{Y}{ET}; \quad (4)$$

$$SWS = SWC \times BD \times SD。 \quad (5)$$

式中: Y 表示冬小麦籽粒产量,kg/hm²; SWC 表示土壤含水量,%; SD 为土壤深度,cm。

1.3.3 土壤化学性质 取 0 ~ 10、>10 ~ 20 cm 耕层土壤过筛后开展试验分析。重铬酸钾氧化法测定土壤有机碳含量;硝态氮和铵态氮浸入 0.5 mol/L KCl 后,采用 AA3 连续流动分析仪(德国 SEAL 公司)测定它们的含量;土壤 pH 值采用水土比 5 : 1 浸提后的蒸馏水,用 pH 计测定。

1.3.4 产量 在冬小麦成熟期,分别在各小区(不同栽培模式)内选取 3 行小麦进行人工收割(每个处理重复 3 次)。小麦晒干后带回实验室分类放

置,105 ℃ 高温杀青 0.5 h,在 80 ℃ 条件下烘至恒重,研磨并测定籽粒量,再根据各小区面积干物质产量,计算籽粒量^[3]。

2 结果与分析

2.1 不同栽培模式对冬小麦农田土壤物理性质的影响

2.1.1 不同栽培模式对冬小麦农田土壤容重、孔隙度的影响 土壤容重、孔隙度是评价土壤质量的重要指标。试验结果(表 3)表明,相较于传统栽培模式(T),除 BRF 处理外,其他不同栽培模式对土壤容重均有显著降低的影响。在 0~10 cm 土层中,土

壤容重明显下降的有 MRF、PM、SM、GM、BRF 处理,分别下降 9.77%、7.52%、6.77%、5.26%、3.01%。在 >10~20 cm 土层中,土壤容重明显下降的为 SM、PM、MRF、GM 和 BRF 处理,其降幅分别为 8.7%、7.25%、6.51%、3.62% 和 0.72%,其中 SM 处理降幅高于其他处理。不同栽培措施,对土壤总孔隙度影响差异显著,在 0~10 cm 土层中 MRF 处理高于其他处理;在 >10~20 cm 土层中 SM 处理高于其他处理。因此,与传统栽培模式(T)相比新型栽培模式均降低了土壤容重并且提高了孔隙度。

表 3 不同栽培模式对土壤容重、孔隙度的影响

处理	容重(g/cm ³)		总孔隙度(%)	
	0~10 cm	>10~20 cm	0~10 cm	>10~20 cm
T	1.33±0.01a	1.38±0.01a	50.07d	47.99d
SM	1.24±0.01cd	1.26±0.05d	53.45ab	52.64a
PM	1.23±0.05cd	1.28±0.02cd	53.69ab	51.81ab
BRF	1.29±0.01ab	1.37±0.01ab	51.45cd	48.39cd
MRF	1.20±0.02d	1.29±0.03cd	54.76a	51.26ab
GM	1.26±0.03bc	1.33±0.03bc	52.27bc	49.98bc

注:同列数据后不同小写字母表示在 0.05 水平上差异显著。表 4、表 5 同。

2.1.2 不同栽培模式的冬小麦农田土壤水热变化特征 土壤理化性质和肥力是土壤中重要的因素,均受到土壤水分和温度变化的影响,从而影响作物的生长发育。由图 3 可知,T、SM、PM、BRF、MRF 和 GM 处理在 0~10 cm 土壤含水量变化范围分别为 5.52%~20.10%、6.01%~21.60%、6.52%~20.81%、6.33%~21.19%、7.46%~20.81% 和 5.49%~20.04%,0~10 cm 土壤含水量大小分别为 MRF>SM>PM>BRF>GM>T 处理。在 >10~20 cm 土

层中,T、SM、PM、BRF、MRF 和 GM 处理的土壤含水量变化范围分别 7.01%~20.71%、7.57%~21.24%、7.27%~20.38%、7.55%~20.27%、8.80%~20.59% 和 7.08%~22.76%。土壤含水量大小为 MRF>SM>PM>BRF>GM>T 处理。不同栽培模式下 0~10 cm 和 >10~20 cm 土层土壤含水量变化趋势基本一致,且与当地降水量变化(图 2、图 3)基本一致。

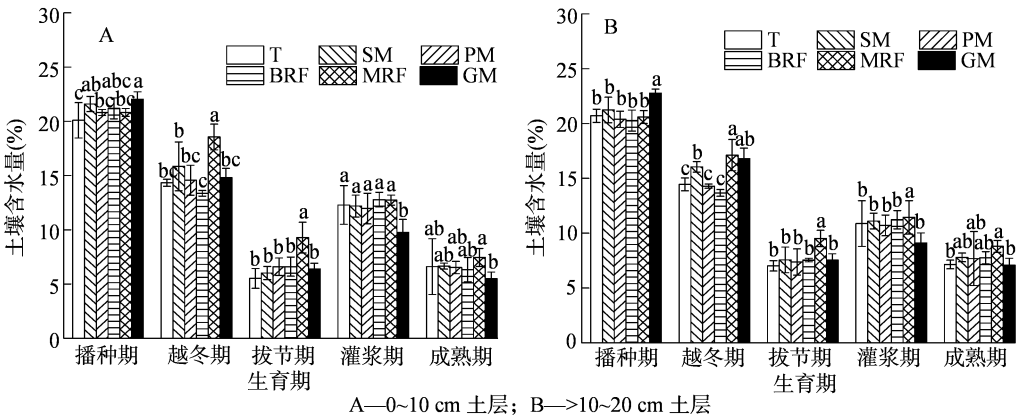


图3 生育期土壤含水量变化

由图 4 可知,不同栽培模式下 T、SM、PM、BRF、MRF 和 GM 处理在 0~5 cm 土壤下温度变化范围分

别为 11.87~32.70、13.57~33.83、14.43~34.03、13.57~33.70、12.73~31.73、12.17~29.77 ℃,在

0 ~ 15 cm 土壤下温度变化范围分别为 7.77 ~ 24.47、8.23 ~ 25.13、9.00 ~ 25.07、8.10 ~ 24.47、9.17 ~ 24.83、8.13 ~ 22.97 ℃。不同栽培模式下播种期和越冬期土壤温度无明显差异;拔节期 PM 处理温度上升最快,温度最高,为 22.20 ℃,GM 处理最低,为 12.57 ℃;灌浆期 T 处理温度最高,为

26.73 ℃,高于其他处理,GM 处理最低,为 23.33 ℃;成熟期 PM 处理最高,为 34.03 ℃,GM 处理最低,为 29.77 ℃,各处理差异显著。在冬小麦各生育期,不同栽培模式下 0 ~ 5 cm 土层土壤温度均高于 0 ~ 15 cm 土层。

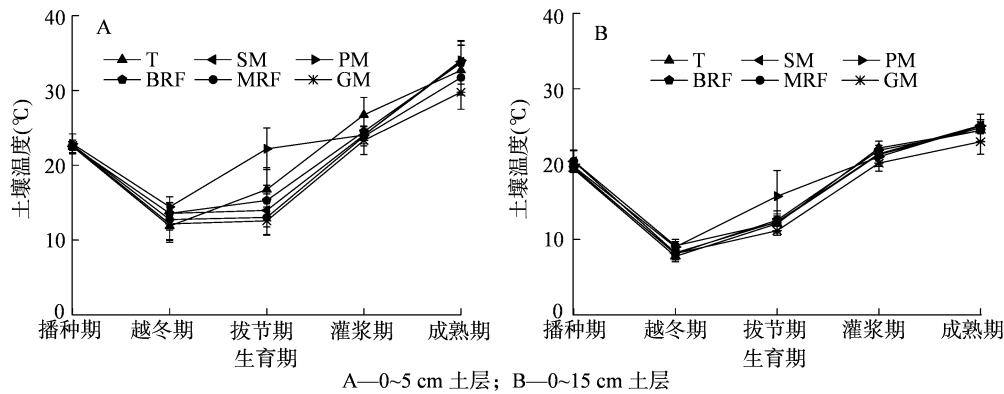


图4 生育期土壤温度变化

2.2 不同栽培模式对冬小麦农田土壤化学性质的影响

性质良好的土壤与土壤有效性养分是密切相关的^[16]。由表 4 可知,0 ~ 10 cm 和 > 10 ~ 20 cm 土层中,BRF 处理有机碳含量最低,SM 处理有机碳含量最高,BRF 与 SM 处理差异均达到显著水平;0 ~ 10 cm 土层中,不同栽培模式下土壤有机碳含量大小顺序为 SM > MRF > GM > PM > T > BRF 处理,除 BRF 处理降低了 9.80%,其他处理分别比 T 处理高 20.83%、17.28%、11.27% 和 7.84%; > 10 ~ 20 cm 土壤有机碳含量顺序为 SM > GM > MRF > PM > T > BRF 处理。0 ~ 10 cm 土层,SM 处理硝态氮含量最高,PM 处理含量最低,不同栽培模式间无显著差

异,与 T 相比 SM、MRF、GM 处理均提高了硝态氮含量。> 10 ~ 20 cm 土层不同栽培模式下,MRF 处理硝态氮含量最高,PM 处理含量最低,MRF 和 SM 处理与 PM 处理差异达到显著水平。0 ~ 10 cm 土壤,铵态氮含量以 T 处理最高,PM 处理含量最低,PM 与 T 处理差异达到显著水平;各处理与 T 处理相比分别降低了 17.58%、25.80%、17.12%、10.73% 和 6.39%; > 10 ~ 20 cm 土壤铵态氮含量 T 处理最高,PM 处理含量最低,与 T 处理相比分别降低了 15.99%、23.42%、16.89%、4.73% 和 5.86%,不同栽培模式间差异无显著性。不同栽培模式下 0 ~ 10 cm 和 > 10 ~ 20 cm 土壤 pH 值无显著差异,与 T 处理相比,其他处理均降低了 pH 值。

表 4 不同栽培模式对土壤各养分含量的影响

土层深度 (cm)	处理	有机碳含量 (g/kg)	硝态氮含量 (mg/kg)	铵态氮含量 (mg/kg)	pH 值
0 ~ 10	T	8.16 ± 0.70ab	4.08 ± 0.69a	4.38 ± 0.98a	8.38 ± 0.06a
	SM	9.86 ± 0.56a	5.41 ± 2.40a	3.61 ± 0.80ab	8.31 ± 0.02a
	PM	8.80 ± 1.38ab	3.36 ± 0.57a	3.25 ± 0.65b	8.37 ± 0.03a
	BRF	7.36 ± 0.27b	3.93 ± 0.66a	3.63 ± 0.48ab	8.36 ± 0.05a
	MRF	9.57 ± 1.45a	4.54 ± 2.41a	3.91 ± 0.97ab	8.34 ± 0.06a
	GM	9.08 ± 1.16ab	4.41 ± 1.25a	4.10 ± 0.92ab	8.33 ± 0.08a
> 10 ~ 20	T	7.88 ± 0.60ab	3.06 ± 0.63b	4.44 ± 1.41a	8.44 ± 0.12a
	SM	9.51 ± 0.70a	4.35 ± 1.42a	3.73 ± 0.85a	8.35 ± 0.07a
	PM	8.04 ± 1.37ab	3.04 ± 0.38b	3.43 ± 0.76a	8.37 ± 0.05a
	BRF	7.54 ± 0.16b	3.86 ± 0.67ab	3.69 ± 0.53a	8.38 ± 0.03a
	MRF	8.37 ± 1.47ab	4.85 ± 1.11a	4.23 ± 0.45a	8.35 ± 0.04a
	GM	9.15 ± 0.20ab	3.83 ± 0.56ab	4.18 ± 1.57a	8.29 ± 0.13a

2.3 不同栽培模式对冬小麦产量的影响

旱作农业区衡量自然降水利用程度的重要指标是冬小麦生长期的水分消耗和利用效率。由表 5 可知,T、SM、PM、BRF、MRF 和 GM 处理的小麦籽产量分别为 4 070.37、4 075.56、4 967.41、4 699.57、4 867.16、6 154.82 kg/hm²。SM、PM、BRF、MRF 和 GM 5 种栽培模式均对冬小麦籽产量有促进作用,GM 处理小麦籽产量最高,PM 与 GM 处理差异达到显著水平,SM 与 PM 处理差异达到显著水平,T 处理小麦籽产量最低,相较于传统栽培 T 处理,SM 处理籽产量增加 0.13%,PM 籽产量增加 22.04%,BRF 籽产量增加 15.46%,MRF 籽产量增加 19.58%,GM 籽产量增加 51.21%。生育期耗水量表现为 MRF > BRF > SM > T > PM > GM 处理,MRF 显著高于其他处理。除 SM 处理外,PM、BRF、MRF 和 GM 处理显著提高了水分利用效率,分别比 T 处理提高了 22.26%、11.77%、13.73%、54.56%,与 T 处理相比,除 SM 处理外,其他不同栽培模式均提高了水分利用效率,同时提高了冬小麦产量。

表 5 不同栽培模式对冬小麦产量与水分利用率的影响

处理	产量 (kg/hm ²)	生育期总耗水量 (mL)	水分利用效率 (kg/kg)
T	4 070.37 ± 143.7c	469.68 ± 1.60c	8.67 ± 0.28c
SM	4 075.56 ± 394.45c	474.10 ± 4.32c	8.60 ± 0.86c
PM	4 967.41 ± 278.85b	468.92 ± 3.30c	10.60 ± 0.66b
BRF	4 699.57 ± 297.82b	484.97 ± 0.45b	9.69 ± 0.62b
MRF	4 867.16 ± 166.03b	493.58 ± 8.33a	9.86 ± 0.25b
GM	6 154.82 ± 166.33a	460.42 ± 4.33d	13.40 ± 0.48a

2.4 冬小麦产量与理化性质的关系

作物产量形成与土壤养分的供应过程有关,分析冬小麦产量与理化性质的关系,发现冬小麦产量与各养分指标之间,存在显著或极显著相关关系。不同栽培模式下,冬小麦产量与土壤理化性质的各指标相关性分析见图 5。冬小麦产量与 SOC、NO₃⁻-N、NH₄⁺-N 和 WUE 呈正相关关系,其中与 WUE 呈显著正相关关系($r=0.99$),WUE 的变化显著地影响着冬小麦的产量,同时产量与土壤 SOC 之间具有较弱的正相关关系($r=0.21$),说明提高水分利用效率,可以增加冬小麦产量。

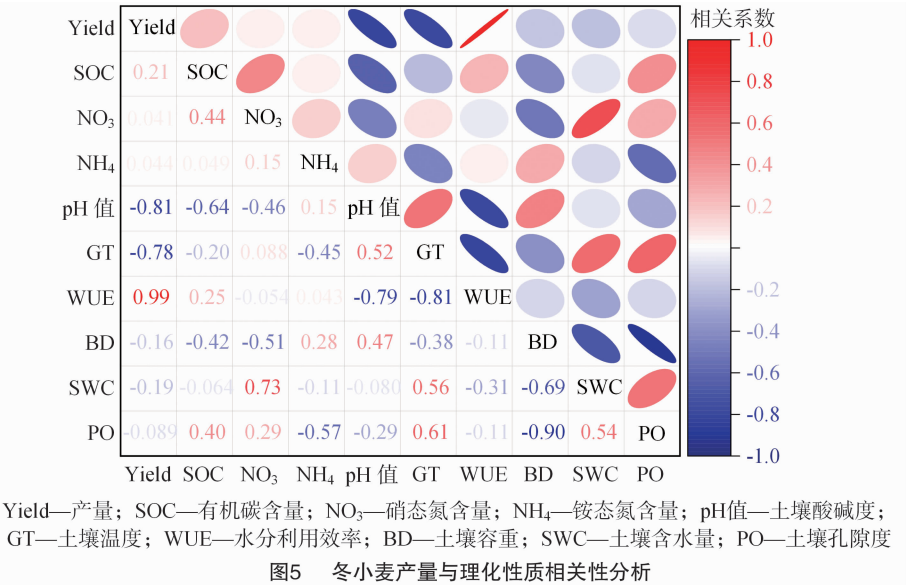


图5 冬小麦产量与理化性质相关性分析

3 讨论与结论

3.1 不同栽培模式对土壤物理性质的影响

土壤容重是评价土壤肥力水平过程中,一个不可缺少的重要物理指标^[17]。前人研究表明,土壤容重越低,土壤结构越疏松,可以促进土壤中的气体交换并且有助于保持土壤水分^[18]。本研究发现,与传统栽培相比,5 种栽培模式在不同土层都可以降低土壤容重和提高土壤孔隙度,且 0~10 cm 土层容

重降幅高于 10~20 cm 土层。MRF、PM 和 SM 处理对土壤具有保温性并减少了外界环境的干扰,这是由于 MRF 处理增强了集水作用,为作物生长提供了一个良好的环境^[19];SM 处理由于秸秆还田输入的有机物可以增强团聚体的稳定性,提高了不同土层土壤孔隙度^[20];PM 处理由于形成良好的环境条件提高了地下生物量,从而造成土壤容重的降低^[21];GM 处理 0~10 cm 和 10~20 cm 土壤容重分别比 T 处理低 5.26% 和 3.62%,这与单燕在陕西的研究结

果^[22]相一致。

旱地雨养区土壤水分缺乏是限制农作物生长的主要条件,更多的降水进入土壤储存并且被种植作物吸收利用可以提高作物产量,渭北地区大部分降水集中在 7—9 月^[23],与冬小麦夏闲期重叠,为冬小麦蓄水保墒和改善土壤的水分状况提供良机^[19]。该季小麦含水量主要集中在播种期以及越冬期,各处理间也有显著差异。SM 处理可以通过秸秆覆盖具有较好的保水性和增加地表糙度,也在一定程度上抑制土壤水分蒸发,进而有效地提高作物水分利用效率^[24]。使用地膜覆盖后,地膜会在空气和土壤之间形成一个密闭的空间,导致该区域土壤再次吸收汽化的土壤水分,从而在地膜覆盖下形成一个小的内循环,减少水分蒸发;其次,耕层土壤温度和深层梯度增加,减少了地表裸露,同时促进土壤毛细管水分的上行运动,在播种期前为冬小麦播种蓄水保墒,保证了土壤的湿润;其次,土壤墒情改善^[19],使作物增产。MRF 处理结合了地膜与秸秆覆盖的优点,其含水量在 0~10 cm 和 10~20 cm 不同土层中除播种期和 0~10 cm 土层灌浆期外均高于其他处理,是由于其垄上覆膜会降低水分蒸发,垄沟内秸秆覆盖对土壤有一定的保水性,两者结合可加倍保持土壤含水量^[25]。

适宜的土壤温度能促进作物根系生长良好,保证作物生长发育,从而提高作物产量,土壤温度对作物生长具有十分重要的意义。本研究中,小麦生育期内不同栽培模式下土壤温度随着当地气温的变化先降低后升高,其中 PM 处理对土壤温度影响最大,其温度范围在不同土层分别为 14.43~34.03、9.00~25.07℃。与 T 处理相比,该处理有效地增加了土壤温度,使用地膜覆盖可减弱土壤与外界之间的水热交换,同时稳固土壤热通量,从而提高土壤温度^[26]。此外,由于使用数量较多的塑料薄膜,可能会增强地膜覆盖的增温效果。有研究指出,种植绿肥会降低土壤蒸散量,明显降低土壤温度^[27],本研究的结果也证实了这一观点。

3.2 不同栽培模式对土壤化学性质的影响

土壤养分的含量和有效性影响供肥能力强弱、土壤环境好坏及作物产量高低^[28]。土壤有机碳含量是维持碳库平衡的重要部分,土壤有机碳含量受环境条件、土壤质地及耕作措施等方式的影响^[3]。本研究发现在不同土层下,与 T 处理相比,除 BRP 处理外,其他栽培模式都提高了土壤有机碳含量。

其中除 GM 处理外,其余处理均表现为 0~10 cm 土层有机碳含量高于 10~20 cm,可能因为种植的豆类作物具有养地作用^[29],导致深层土壤有机碳含量更高。SM、MRF 和 GM 处理有机碳含量均提高。长期秸秆还田可以显著提高土壤有机质^[30],SM 处理提高了土壤有机碳含量,说明秸秆的保水稳定性有利于土壤微生物生存,进而使农田土壤有机碳积累^[31];MRF 处理土壤水分及温度条件良好,可以提供更有利于土壤微生物代谢、活动、生存的环境^[32],丁午阳等研究指出,垄沟覆膜秸秆还田处理较传统栽培处理土壤养分提高 38.41%~40.23%^[33],本研究结果与之一致。GM 处理也增加了土壤有机碳含量,这可能是因为相较于小麦单作体系,在小麦绿肥轮作体系下的土壤有机碳固持潜力高。PM 处理相较于 T 处理而言,有机碳含量增加并不显著,可能是由于地膜覆盖对土壤温度水分的显著影响^[34],在一定程度上,加速了土壤有机质的分解,使土壤有机碳含量降低^[35-36]。本研究发现 BRP 处理对土壤有机碳含量并没有显著影响,并且在一定程度减少了有机碳含量,这可能因为该处理中地表裸露而缺乏保护,使得土壤养分易在降水等侵蚀条件下流失。

速效氮含量根据冬小麦不同栽培模式在不同土层发生了变化,在干旱雨养农业区,硝态氮的淋溶会累积在土壤上层^[37],会因为水分含量的变化导致上移或下移。Zhang 等秸秆覆盖还田速效氮含量相比不还田增加了 27.5%,垄沟覆膜种植明显增加了速效氮含量^[24,33],本研究结果与之一致;结果发现相对于 T 处理,GM 处理增加了土壤硝态氮含量,栽种绿肥增加了土壤表层硝态氮的储存,可能是翻压绿肥腐解使氮素释放,增加土壤表层的硝态氮含量,这与前人研究结果一致。与硝态氮含量相比,本研究中的不同栽培模式间铵态氮含量差异较小,土壤铵态氮相对于传统栽培含量降低^[38-39],因为旱地农田土壤通气良好,一部分铵态氮可能被作物吸收,另一部分可能被硝化细菌转化为硝态氮,或者以氨的形式挥发到空气中^[39]。

此外,本研究发现不同栽培处理与 T 处理相比均降低了土壤 pH 值,这与土壤的酸碱性有关,但在各处理之间差异不显著,与其他学者结论^[40]不一致。这可能是由于土壤具备较强的缓冲能力,使不同栽培处理对土壤 pH 值变化的影响有限,故难以在本研究的时间尺度内捕捉到变化。值得注意的

是,在当前农业“减施增效”要求的背景下,种植绿肥可以改善土壤质量、土壤的理化性质,从而减少水、土、肥的流失,是目前实现农田生态环境系统可持续发展较有前景的栽培模式。在旱作农业区,研究种植豆科绿肥作物对土壤肥力的影响,祁琛等指出,绿肥翻压处理能够提高土壤贮水量、速效氮和有机碳含量,降低土壤 pH 值^[41]。

3.3 不同栽培处理对冬小麦产量及水分利用率的影响

作物生产和水分利用集中体现了土地品质水平和农业产品特性。本研究结果表明,虽然 SM 处理比 T 处理增加了冬小麦产量,但差异并不显著,主要是由于秸秆还田对翌年播种作物病虫害的作用,也主要是由于增加了作物上各种病害的发生率,从而影响了粮食作物的正常生产^[6];也可能是由于秸秆在腐熟过程中会造成作物根部缺血,从而妨碍根部生长发育,最后才会造成产量损失^[40]。和 T 处理比较,GM、PM、MRF 和 BRF 处理明显提高了冬小麦产量以及 WUE,GM 处理在促进各种生物化学过程发生的同时,由于绿肥投入对土壤的强烈扰动,提高了各种微生物的活性;绿肥作物生物量的增加也促使毛管孔隙度和总孔隙度的增加,同时绿肥的腐解也为创造适宜土壤环境的土壤微生物提供了能源物质^[42];PM 处理促进作物吸收水分,促进作物生长发育,提高土壤水分利用效率;能提高土地肥力,使土壤保持温湿度适宜,对冬小麦提产^[43]更有利。MRF 处理具有蓄水保墒作用,降雨后地表径流损失较少,且沟槽覆盖秸秆对土面蒸发作用能起到明显的抑制作用,使作物吸收利用土壤水分的能力相应提高,从而提高产量。

3.4 结论

本研究以渭北旱塬区雨养小麦为研究对象,设置 6 种栽培模式,研究不同栽培模式对冬小麦产量及土壤理化性质的影响,得到主要结论如下:

不同栽培模式对冬小麦农田土壤物理性质产生了显著影响。与传统栽培模式相比,不同栽培模式均提高了土壤有机碳含量及孔隙度大小,降低了土壤容重、铵态氮含量和 pH 值。特别是 SM 处理使硝态氮含量增长了 32.60% (0 ~ 10 cm),MRF 处理使硝态氮含量增长了 58.50% (> 10 ~ 20 cm)。

GM 处理对冬小麦产量和水分利用率具有显著影响。与传统栽培模式相比,GM 处理增加了冬小麦产量 (6 154.82 kg/hm²) 和水分利用效率

(13.40 kg/kg)。不同栽培模式其增幅顺序为 GM > PM > MRF > BRF > SM 处理,冬小麦的产量分别提高 51.21%、22.04%、19.58%、15.46%、0.13%,水分利用效率分别提高了 54.56%、22.26%、13.73%、11.77% (SM 处理水分利用效率较 T 处理降低)。冬小麦产量在不同栽培模式下与水分利用效率呈显著正相关,其相关系数 $r = 0.99$,表明 WUE 变化对冬小麦产量的影响十分显著。

综上,绿肥轮作模式结合产量及其理化性质指标,是适宜渭北旱塬地区的一种新型冬小麦增产模式,对提高渭北旱田土壤肥力水平和冬小麦生产力效果显著。

参考文献:

- [1] Wani S P, Rockstrom J, Sahrawat K L. Policies and institutions for increasing benefits of integrated watershed management programs [M]//Integrated watershed management in rainfed agriculture. Boca Raton: CRC Press, 2011: 153 - 182.
- [2] Micronesia F. Food and agriculture organization of the united nations [J]. Biodiversity, 2008, 9(1/2): 116.
- [3] 刘高远, 杨 玥, 张 齐, 等. 覆盖栽培对渭北旱地冬小麦生产力及土壤肥力的影响 [J]. 植物营养与肥料学报, 2018, 24(4): 857 - 868.
- [4] 王 芳, 张金水, 高鹏程, 等. 不同有机物料培肥对渭北旱塬土壤微生物学特性及土壤肥力的影响 [J]. 植物营养与肥料学报, 2011, 17(3): 702 - 709.
- [5] 陈 姣, 张 池, 陈玉佩, 等. 不同绿肥和覆膜措施对渭北旱塬冬小麦产量和土壤水分动态的影响 [J]. 植物营养与肥料学报, 2021, 27(12): 2136 - 2148.
- [6] 黄婷苗, 郑险峰, 侯仰毅, 等. 秸秆还田对冬小麦产量和氮、磷、钾吸收利用的影响 [J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(4): 853 - 863.
- [7] 李红星, 高 飞, 任佰朝, 等. 夏玉米秸秆还田量和施氮量对冬小麦产量和氮素利用的影响 [J]. 植物营养与肥料学报, 2022, 28(7): 1260 - 1270.
- [8] 李尚中, 樊廷录, 赵 晖, 等. 不同地膜覆盖栽培模式对玉米产量、水分利用效率和品质的影响 [J]. 草业学报, 2020, 29(10): 182 - 191.
- [9] 王秋菊, 常本超, 张劲松, 等. 长期秸秆还田对白浆土物理性质及水稻产量的影响 [J]. 中国农业科学, 2017, 50(14): 2748 - 2757.
- [10] Yin W, Guo Y, Hu F L, et al. Wheat - maize intercropping with reduced tillage and straw retention: a step towards enhancing economic and environmental benefits in arid areas [J]. Frontiers in Plant Science, 2018, 9: 1328.
- [11] 上官宇先, 师日鹏, 韩 坤, 等. 垄沟覆膜栽培冬小麦田的土壤呼吸 [J]. 生态学报, 2012, 32(18): 5729 - 5737.
- [12] 刘俊明, 高 阳, 司转运, 等. 栽培方式对冬小麦耗水量、产量及水分利用效率的影响 [J]. 水土保持学报, 2020, 34(1): 210 -

- 216.
- [13]李婧,张达斌,王峥,等. 施肥和绿肥翻压方式对旱地冬小麦生长及土壤水分利用的影响[J]. 干旱地区农业研究,2012,30(3):136-142.
- [14]李超,王俊,温萌萌,等. 绿肥填闲种植对旱作冬小麦农田土壤团聚体有机碳含量的影响[J]. 干旱地区农业研究,2023,41(3):210-217.
- [15]付威,樊军,胡雨彤,等. 施肥和地膜覆盖对黄土旱塬土壤理化性质和冬小麦产量的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2017,23(5):1158-1167.
- [16]Saiya - Cork K R, Sinsabaugh R L, Zak D R. The effects of long term nitrogen deposition on extracellular enzyme activity in an *Acer saccharum* forest soil[J]. Soil Biology and Biochemistry,2002,34(9):1309-1315.
- [17]Zhou X Q, Chen C R, Wang Y F, et al. Soil extractable carbon and nitrogen, microbial biomass and microbial metabolic activity in response to warming and increased precipitation in a semiarid Inner Mongolian grassland[J]. Geoderma,2013,206:24-31.
- [18]Faheem S M, Muhammad I, Javaid A, et al. Residual effect of cover crops and conservation tillage on soil physical properties and wheat yield grown after direct seeded rice[J]. International Journal of Agriculture and Biology,2020,24(5):1265-1272.
- [19]Li F M, Song Q H, Jjemba P K, et al. Dynamics of soil microbial biomass C and soil fertility in cropland mulched with plastic film in a semiarid agro - ecosystem[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2004,36(11):1893-1902.
- [20]Mulumba L N, Lal R. Mulching effects on selected soil physical properties[J]. Soil and Tillage Research,2008,98(1):106-111.
- [21]Liu G Y, Zuo Y H, Zhang Q, et al. Ridge - furrow with plastic film and straw mulch increases water availability and wheat production on the Loess Plateau[J]. Scientific Reports,2018,8(1):6503.
- [22]单燕. 陕西农田土壤肥力现状与旱地土壤培肥技术研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2016.
- [23]He G, Wang Z H, Li F C, et al. Soil water storage and winter wheat productivity affected by soil surface management and precipitation in dryland of the Loess Plateau, China [J]. Agricultural Water Management,2016,171:1-9.
- [24]Zhang P, Wei T, Wang H X, et al. Effects of straw mulch on soil water and winter wheat production in dryland farming[J]. Scientific Reports,2015,5:10725.
- [25]刘高远. 保护性耕作及优化施肥对渭北旱地土壤肥力的影响[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2018.
- [26]王磊,樊廷录,闫妍,等. 不同覆盖栽培对旱作冬小麦土壤水分、产量和品质的影响[J]. 水土保持学报,2023,37(3):248-257.
- [27]杨露,毛云飞,胡艳丽,等. 生草改善果园土壤肥力和苹果树体营养的效果[J]. 植物营养与肥料学报,2020,26(2):325-337.
- [28]Delgado - Baquerizo M, Maestre F T, Gallardo A, et al. Decoupling of soil nutrient cycles as a function of aridity in global drylands[J]. Nature,2013,502(7473):672-676.
- [29]杨晶,沈禹颖,南志标,等. 保护性耕作对黄土高原玉米—小麦—大豆轮作系统产量及表层土壤碳管理指数的影响[J]. 草业学报,2010,19(1):75-82.
- [30]宋朝玉,王圣健,宫明波,等. 小麦—玉米周年秸秆还田模式下氮肥利用特征的分析[J]. 山东农业科学,2020,52(10):113-118.
- [31]郑顺安,刘代丽,章明奎,等. 长期秸秆还田对污染农田土壤与农产品重金属的影响[J]. 水土保持学报,2020,34(2):354-359.
- [32]Gan Y T, Siddique K H M, Turner N C, et al. Ridge - furrow mulching systems - an innovative technique for boosting crop productivity in semiarid rain - fed environments[M]//Advances in agronomy. Amsterdam;Elsevier,2013:429-476.
- [33]丁午阳,李援农,郭俊文,等. 不同种植模式对冬小麦土壤养分及水肥利用效率的影响[J]. 节水灌溉,2021(12):8-13.
- [34]Gan Y T, Liang C, Chai Q, et al. Improving farming practices reduces the carbon footprint of spring wheat production[J]. Nature Communications,2014,5:5012.
- [35]Li R, Hou X Q, Jia Z K, et al. Effects of rainfall harvesting and mulching technologies on soil water, temperature, and maize yield in Loess Plateau region of China [J]. Soil Research, 2012, 50(2):105.
- [36]张燕,李亮生,陈帅伟,等. 小麦秸秆及其生物炭对植烟土壤养分、酶活性及细菌群落结构的影响[J]. 江苏农业科学, 2023,51(7):213-220.
- [37]周顺利,张福锁,王兴仁. 土壤硝态氮时空变异与土壤氮素表现盈亏Ⅱ·夏玉米[J]. 生态学报,2002,22(1):48-53.
- [38]李恩慧,王玉慧,杨慎骄,等. 晋西南褐土上小麦苜蓿套作对土壤氮素及植物吸氮的影响[J]. 中国土壤与肥料,2020(6):114-121.
- [39]王学敏,刘兴,郝丽英,等. 秸秆还田结合氮肥减施对玉米产量和土壤性质的影响[J]. 生态学杂志,2020,39(2):507-516.
- [40]叶元生,黄彩霞. 西北旱地秸秆覆盖对小麦产量及农田生态效应的影响[J]. 农业工程,2020,10(8):106-113.
- [41]祁琛,吴林甲,闫秋艳,等. 夏闲期复播绿肥对旱地麦田土壤团聚体碳氮含量的影响[J]. 水土保持学报,2023,37(4):304-312.
- [42]张达斌,姚鹏伟,李婧,等. 豆科绿肥及施氮量对旱地麦田土壤主要肥力性状的影响[J]. 生态学报,2013,33(7):2272-2281.
- [43]薛澄,王朝辉,李富翠,等. 渭北旱塬不同施肥与覆盖栽培对冬小麦产量形成及土壤水分利用的影响[J]. 中国农业科学, 2011,44(21):4395-4405.