

不同种植方式对高寒旱区地膜小麦 耗水特征和产量的影响

刘风¹, 王红丽²

(1. 甘肃省农业科学院, 甘肃 兰州 730070; 2. 甘肃省农业科学院旱地农业研究所, 甘肃 兰州 730070)

摘要:于2019—2022年在陇中高寒旱区以裸地条播为对照(CK),设置全膜覆土穴播(FM)和膜侧沟播(FS)两种覆盖方式,研究不同覆盖种植方式对冬小麦耗水特性、生长发育及产量的影响。结果表明:与CK相比,FM和FS处理播种期~拔节期0~20 cm土层土壤温度分别平均提高3.1°C和2.1°C,灌浆期分别降低0.6°C和1.0°C。覆盖能不同程度提高冬小麦各生育期0~200 cm土层土壤含水量,其中出苗期、返青期、拔节期和灌浆期提高幅度均高于20%。与CK相比,FM处理返青后冬小麦耗水量平均显著提高29.2%,返青前显著降低42.4%;FS处理返青期~灌浆期耗水量提高12.6%,返青前降低25.7%。各处理冬小麦基本苗、分蘖数、公顷穗数、穗粒数、千粒重和产量均表现为FM>FS>CK,处理间差异显著,其中FM和FS处理产量分别较CK平均提高74.7%和45.4%;处理间耗水量差异不显著;FM处理水分利用效率最大,较CK平均提高67.3%,FS次之,较CK平均提高46.1%。综上,地膜覆盖可调节土壤水分状况,改善冬小麦生长发育和成穗情况,显著提高产量和水分利用效率,其中全膜覆土穴播调节效应优于膜侧沟播,是适宜在高寒旱区地膜小麦生产中推广应用的种植方式。

关键词:全膜覆土穴播;膜侧沟播;耗水特征;冬小麦;生长发育;产量

中图分类号:S512.1⁺1 **文献标志码:**A

Effects of whole field soil-plastic mulching on winter wheat water consumption characteristics, growth and yield

LIU Feng¹, WANG Hongli²

(1. Gansu Academy of Agricultural Science, Lanzhou, Gansu 730070, China;

2. Institute of Dryland Farming, Gansu Academy of Agricultural Science, Lanzhou, Gansu 730070, China)

Abstract: To study the effect of different planting methods on winter wheat water consumption characteristics, growth and yield, the treatments of whole soil plastic mulching and bunch seeded (FM), furrow sowing on side of film mulch (FS) and bare soil and strip sowing (CK) were set up. The results showed that compared with CK, soil average temperature at 0~20 cm soil layer of FM and FS increased by 3.1°C and 2.1°C during the sowing stage-jointing stage and decreased by 0.6°C and 1.0°C for FM and FS in the filling stage, respectively. Mulching can increase the soil water content of 0~200 cm in each growth period of winter wheat, among them, the increase of seedling stage, regreening stage, jointing stage and filling stage was more than 20%, and the drier, the more increasing. The water consumption of FM was 29.2% higher than that of CK after resuming growth, 42.4% lower before resuming growth, and the difference was significant. The water consumption of FS was 12.6% higher than that of CK after resuming growth, 25.7% lower before resuming growth. Under the effect of increasing the soil temperature in the early growth stage, the soil water content in the dry stage, and the water consumption after resuming growth, the number of basic seedlings and tillers of PM and FS were significantly higher than that of CK. The number of ears per hectare, number of ears, thousand-grain weight and yield are all shown as follows: FM>FS>CK, and the difference was significant. The yield of FM and FS was 74.7% and 45.4% higher than that of CK. The

difference in water consumption among treatments was not significant, therefore, water use efficiency FM was the largest, 67.3% higher than CK, FS was the second, 46.1% higher than CK. CK was the smallest, and the difference reached a significant level. It can be seen that for winter wheat production in high altitude and cold regions, plastic film mulching regulated soil water temperature, improved the matching degree of winter wheat water consumption and soil water supply, and retained more water for use after regreening in the stage which less water demand, so as to improve the growth and development of winter wheat and spike formation, and significantly increase winter wheat yield and water use efficiency. The adjustment effect of whole soil plastic mulching and bunch seeded (FM) was better than that of furrow sowing on side of film mulch (FS). The whole soil plastic mulching and bunch seeded (FM) was a suitable planting method for plastic film wheat in alpine and arid areas.

Keywords: whole field soil-plastic mulching; drilling beside plastic film; water consumption characteristics; winter wheat; growth and development; yield

小麦是陇中半干旱高寒旱作区主要粮食作物之一,该区降水稀少、年际变率大、时空分布不均,冬春季温差大且干旱严重,致使冬小麦产量低且不稳定,经济效益低下^[1-3],水分成为该区冬小麦生长发育和增产增收的关键限制因子。如何提高土壤蓄雨保墒能力、促进有限水分高效利用一直是陇中半干旱高寒旱区作物稳产增产面临的主要问题。地膜覆盖可调节土壤温度,增加土壤水分含量,改善土壤结构,调节土壤微生物种类和数量^[4-6],进而活化土壤养分,促进作物生长,实现作物高产并显著提高资源利用率^[7-9]。目前该区地膜小麦主要有全膜覆土穴播和膜侧沟播两种种植方式,且都具有增温、保墒、抑蒸、增产效应。其中,全膜覆土穴播技术采用全地面地膜平铺并膜上覆土1~2 cm,可有效提高春小麦播前和生育前期土壤贮水量,促进春小麦苗期~孕穗期耗水,增加穗粒数,使春小麦产量提高20%~30%,水分利用效率提高27%以上^[9-11];同时,全膜覆土穴播可显著调节春小麦耗水进程和耗水特性,使小麦播种~拔节期耗水模系数增加10%~17%,耗水速率提高5%~20%,降低灌浆期耗水模系数和耗水速率,促进小麦生长速率、耗水效率提高,显著增加小穗数、穗粒数、穗粒重和产量等^[9, 12-13]。膜侧沟播技术是通过垄面覆膜保墒,垄侧集流增墒,垄沟种植小麦的一项抗旱增产技术,该技术除具有地膜覆盖的增温保墒效应外,还有明显的微域集水效果,可将5 mm左右的无效降水集中到小麦根部实现有效利用,使小麦各生育时期0~20 cm土层土壤含水量提高1.2%~6.6%,穗数、穗粒数、千粒重明显增加,增产率达30%以上。鉴于上述技术优势,目前两种技术均已大面积应用于旱地冬小麦种植。近年来,地膜覆盖对冬小麦田土壤水热效应^[9, 11, 13-14]、土壤微生物活性^[5, 8]、干物质累积^[15]、花后旗叶光合特性^[16-17]和产量^[6-13, 17-18]等方

面的影响均有诸多研究,但对全膜覆土穴播和膜侧沟播旱地冬小麦耗水特征及其驱动的产量效应方面报道较少。

本研究以‘陇中2号’冬小麦为试验材料,设置全膜覆土穴播、膜侧沟播和裸地条播3个处理,测定冬小麦各生育期土壤温度、0~200 cm土层土壤贮水量、阶段性耗水量、群体动态、产量构成因素及产量等指标,阐明全膜覆土穴播对旱地冬小麦耗水特性、生长发育和产量的影响,旨在进一步明确全膜覆土穴播旱地冬小麦增产机理提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验于2019年9月—2022年7月在甘肃省定西市通渭县碧玉镇石滩村进行,该地为典型的陇中半干旱沟壑区,属温带半湿润半干旱性季风气候。平均海拔1 660~2 200 m,年平均气温7.5℃,温差较大,年平均降水量380 mm,日照时数2 265 h,无霜期140 d。试验3 a期间冬小麦全生育期降水量分别为296.6、336.3、288.7 mm,3年均于11月~次年3月无10 mm以上降水,2020年、2021年和2022年4月降水分别为16.8、29.1、12.3 mm。冬小麦分蘖期、返青期和拔节期均受到较为严重的干旱胁迫(图1)。种植区土壤为黄绵土,土壤有机质含量为12.04 g·kg⁻¹、速效氮1.36 mg·kg⁻¹、速效磷17.4 mg·kg⁻¹、速效钾165.0 mg·kg⁻¹、pH值8.36。

1.2 试验设置

以旱地冬小麦品种‘陇中2号’为供试材料,单因素随机区组设计,设置全膜覆土穴播(FM)、膜侧沟播(FS)与露地条播(CK)3个处理,4次重复,共12个小区,小区面积为42 m²(7 m×6 m)。全膜覆土穴播和露地条播使用穴播机播种,地膜厚度0.008 mm,播种深度3~5 cm,行距16 cm,穴距12 cm,每

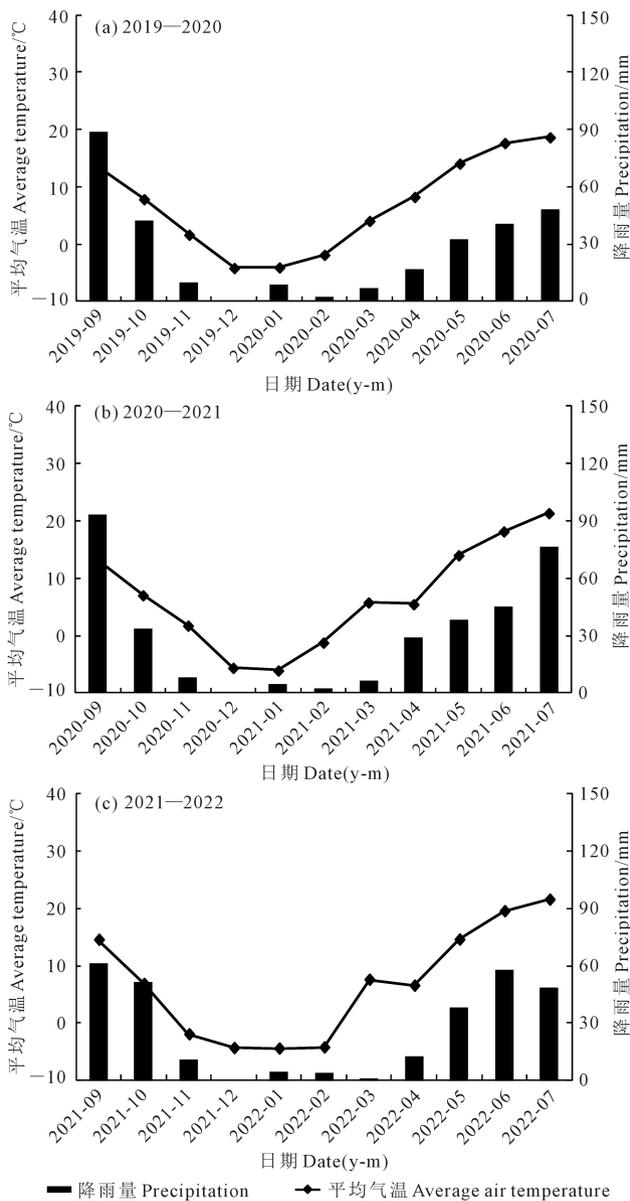


图 1 试验期间小麦生育期平均气温和降水分布

Fig.1 Average temperature and precipitation during winter wheat growth stage

穴 8~12 粒,播量 450~600 万粒· hm^{-2} ;膜侧沟播采用小麦膜侧播种机覆膜播种,垄宽 25 cm,垄高 10~15 cm,沟宽 15 cm,小麦在膜侧播种,播量 450~600 万粒· hm^{-2} 。施肥量为纯氮 150 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、 P_2O_5 120 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,其中氮肥使用尿素,磷肥使用过磷酸钙,全部肥料于播前作为底肥一次施入。试验期间冬小麦覆膜与播种同时进行。2019 年 9 月 23 日播种,2020 年 7 月 14 日收获;2020 年 9 月 21 日播种,2021 年 7 月 15 日收获;2021 年 9 月 18 日播种,2022 年 7 月 17 日收获。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 土壤温度 分别在小麦播种期、出苗期、分蘖期、返青期、拔节期、孕穗期、扬花期、灌浆期、成

熟期,用曲管地温计测定 8:00、14:00、20:00 时刻土壤温度,测定层次为 0、5、10、15、20 cm,测定位在两行小麦中间。

1.3.2 土壤贮水量 土壤贮水量(SWS)采用下式计算:

$$SWS(\text{mm}) = W_s \times \gamma \times d / 100$$

式中, W_s 为土壤重量含水量($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$); γ 为土壤容重($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$); d 为土壤深度(cm)。 W_s 采用烘干法测定,分别在冬小麦播前、苗期、分蘖期、拔节期、孕穗期、扬花期、灌浆期、成熟期和收获后取样测定 0~200 cm 土层土壤含水量,每 20 cm 为一层。

1.3.3 群体动态 各小区随机取 3 个样点,每个样点面积 1 m^2 ,统计单位面积基本苗、冬前单株分蘖数、返青期茎数、拔节期茎数、成熟期单株分蘖数,并计算公顷穗数。

1.3.4 产量及其构成因素测定 冬小麦成熟前 1 周,各小区随机取 3 个样点,每个样点面积 1 m^2 ,测定单位面积穗数;成熟后按小区收获,脱粒后晒干称重,计算产量,籽粒含水量约为 12.5%。从各小区随机取 20 株室内考种,测定穗粒数、千粒重。

1.3.5 阶段耗水量 阶段耗水量(ET_i)参照王红丽等^[19]方法计算,公式如下:

$$ET_i = SWS_i - SWS_{i+1} + P_i$$

式中, ET_i 为阶段耗水量(mm); SWS_i 为某个生育期初始时 0~200 cm 土层土壤贮水量(mm); SWS_{i+1} 为该生育期结束时 0~200 cm 土层土壤贮水量(mm); P_i 为玉米这一时段的降雨量(mm)。

1.3.6 水分利用效率 水分利用效率和冬小麦生育期耗水量采用下式计算:

$$WUE = Y/ET$$

$$ET = SWS_{BF} - SWS_{HA} + P$$

式中, WUE 为冬小麦水分利用效率($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{mm}^{-1}$); Y 为冬小麦单位面积产量($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$); ET 为冬小麦生育期耗水量(mm); SWS_{BF} 为播种前土壤贮水量(mm); SWS_{HA} 为收获后土壤贮水量(mm); P 为玉米全生育期降雨量(mm)。

1.4 数据分析

采用 DPS 9.50 数据处理软件对数据进行单因素方差分析,并用 LSD 法进行差异显著性检验($\alpha=0.05$)。

2 结果与分析

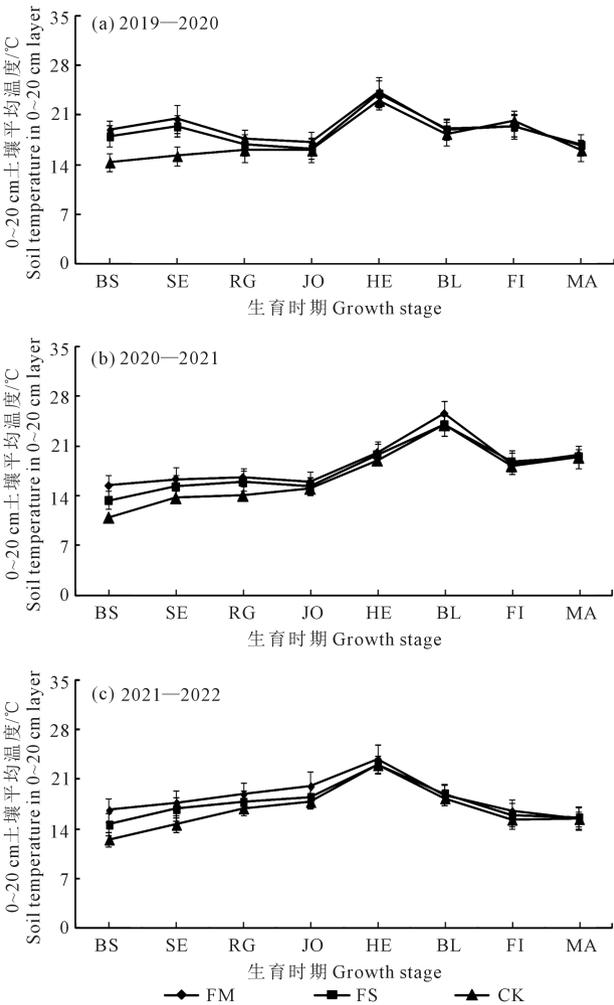
2.1 不同种植方式对土壤温度的影响

不同种植方式对冬小麦田 0~20 cm 土层土壤平均温度具有显著影响(图 2)。与 CK 相比,FM 处理冬小麦播种期、出苗期、返青期、拔节期、抽穗期、

扬花期 0~20 cm 土层土壤平均温度分别平均增加 4.4、4.0、2.2、1.6、1.1、1.1℃,灌浆期降低 0.6℃,成熟期增加 0.5℃;FS 处理冬小麦播种期、出苗期、返青期、拔节期、抽穗期、扬花期分别增加 2.9、2.9、1.4、1.3、0.9、0.8℃,灌浆期降低 1.0℃,成熟期增加 0.1℃。可见,覆盖能不同程度地增加冬小麦扬花前 0~20 cm 土层土壤平均温度,降低灌浆期土壤温度,成熟期增温效果重现,为小麦营养生长和生殖生长均提供较为适宜的土壤温度环境。

2.2 不同种植方式对土壤含水量的影响

种植方式对冬小麦生育期土壤含水量有显著影响并与当季降水分布密切相关(图 3)。与 CK 相比,FM 处理冬小麦生育期 0~200 cm 土层土壤含水



注:BS:播种前;SE:出苗期;RG:返青期;JO:拔节期;HE:抽穗期;BL:扬花期;FI:灌浆期;MA:成熟期。下同。

Note:BS: Before sowing; SE: Seedling; RG: Resume growth; JO: Jointing; HE: Heading; BL: Blooming; FI: Filling; MA: Maturing. The same below.

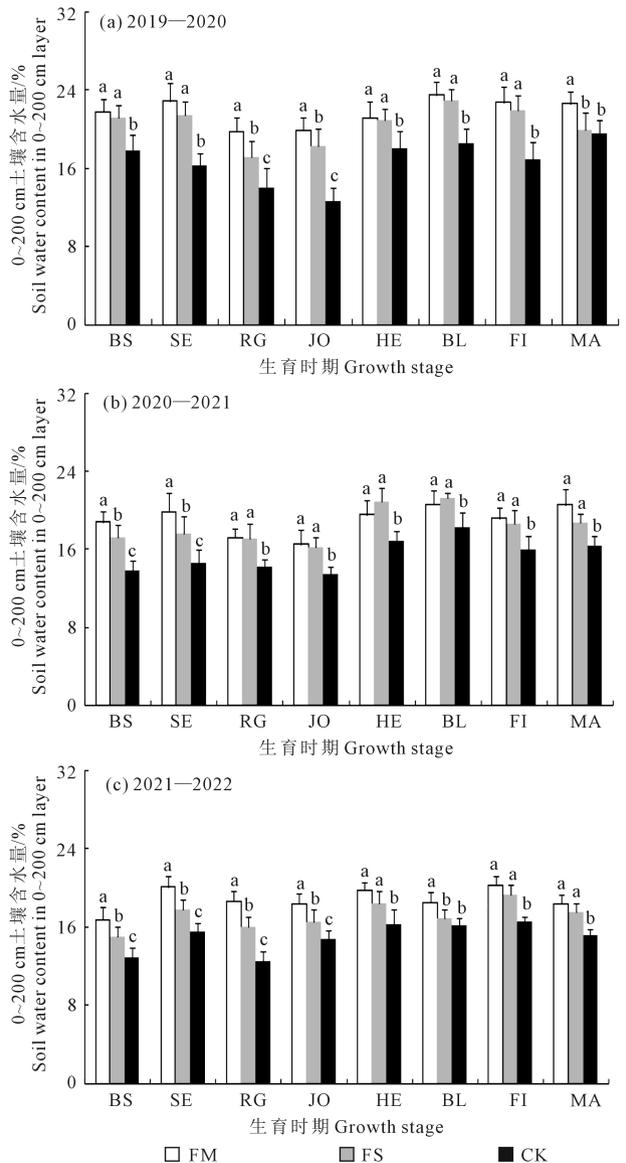
图 2 不同覆盖方式对冬小麦田 0~20 cm 土层土壤温度的影响

Fig.2 Effects of different mulching patterns on soil temperature of 0~20 cm depth in winter wheat field

量显著提高,其中,出苗期、返青期、拔节期和灌浆期提高较多,分别平均提高 34.8%、37.0%、34.9%和 25.8%;FS 处理冬小麦出苗期、返青期、拔节期和灌浆期提高较多,分别平均提高 22.2%、23.5%、25.5%和 21.1%。试验期间冬小麦返青期~拔节期降雨少,干旱严重,覆膜在这一时段改善土壤水分效果显著优于其他时段,实现水分跨季节利用,其中,FM 处理改善土壤水分状况的效应优于 FS 处理。

2.3 不同种植方式对冬小麦阶段性耗水量的影响

种植方式对冬小麦阶段性耗水有显著影响(图 4)。两种种植方式均能不同程度增加冬小麦返青期

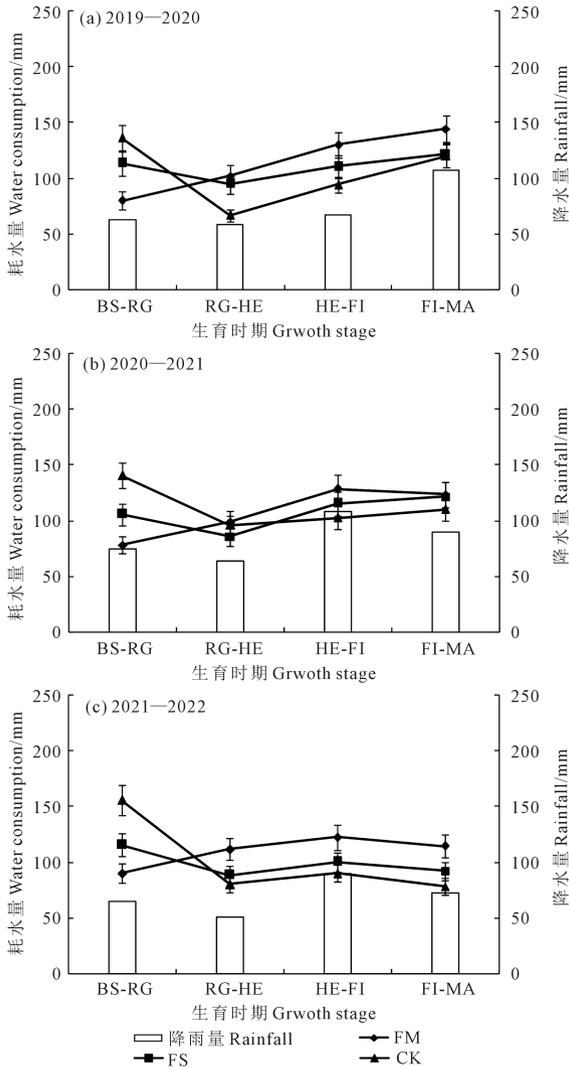


注:不同小写字母表示同一年份不同处理间差异显著($P < 0.05$)。下同。

Note: Different lowercase letters in the same year represent significant differences among treatments ($P < 0.05$). The same below.

图 3 不同种植方式对冬小麦田 0~200 cm 土层土壤含水量的影响

Fig.3 Effects of different planting patterns on soil water content of 0~200 cm depth in winter wheat field



注:BS-RG: 播种前~返青期;RG-HE: 返青期~抽穗期;HE-FI: 抽穗期~灌浆期;FI-MA: 灌浆期~成熟期。

Note: BS-RG: Before sowing~Resume growth; RG-HE: Resume growth~Heading; HE-FI: Heading~Filling; FI-MA: Filling~Maturing.

图 4 不同种植方式对冬小麦阶段性耗水量的影响
Fig.4 Effects of different planting patterns on periodic water consumption of winter wheat

~抽穗期、抽穗期~灌浆期和灌浆期~成熟期耗水量,降低播种前~返青期耗水量。与 CK 相比,FM 处理冬小麦返青期~抽穗期、抽穗期~灌浆期和灌浆期~成熟期耗水量分别平均提高 31.6%、29.7%和 26.3%;FS 处理分别平均增加 14.2%、13.8%和 9.8%,其中返青期处理抽穗期耗水量增加最多,保证了冬小麦基本苗数量,为冬小麦高产奠定基础;FM 处理播种前~返青期耗水量较 CK 平均降低 42.4%,FS 处理降低 25.7%,储蓄的水分可用于冬小麦下一阶段生长,实现了水分合理分配与利用。

2.4 不同种植方式对冬小麦群体动态的影响

种植方式对冬小麦群体动态有显著影响(表 1)。与 CK 相比,FM 处理基本苗、生育期茎数、分蘖数和公顷穗数均显著增加。其中,成熟期单株分蘖数增幅最大,3 a 平均达 129.6%,冬前单株分蘖数次之(39.2%);基本苗、公顷穗数、拔节期茎数和返青期茎数分别平均增加 34.4%、24.1%、19.0%和 16.7%。FS 处理各项指标也均显著高于 CK,其中,成熟期单株分蘖数增幅最大(82.2%),冬前单株分蘖数次之(24.6%),其余指标增幅均在 20%以下。FM 与 FS 处理基本苗、拔节期茎数和公顷穗数间差异显著,其他指标差异不显著。可见,覆膜可显著增大高寒旱区冬小麦群体,为增产提供支撑。

2.5 不同种植方式对冬小麦产量构成因素的影响

种植方式可显著改善冬小麦产量构成因素(表 2)。FM 处理冬小麦公顷穗数、穗粒数和千粒重分别较 CK 平均增加 24.1%、35.8%和 19.6% ($P < 0.05$);FS 处理冬小麦公顷穗数、穗粒数和千粒重分别较 CK 平均提高 9.0%、15.3%和 10.4% ($P < 0.05$)。可见,FM 和 FS 处理对小麦产量构成各要素均有提升作用,且前者提高幅度更大。

表 1 不同种植方式对冬小麦分蘖及成穗数的影响

Table 1 Effects of different planting patterns on tillering and spike number of winter wheat

年度 Year	处理 Treatment	基本苗 Basic seeding $/ (10^4 \cdot \text{hm}^{-2})$	冬前单株分蘖数 Offshoot per plant before winter	返青期茎数 Stem number at resume growth stage $/ (10^4 \cdot \text{hm}^{-2})$	拔节期茎数 Stem number at jointing stage $/ (10^4 \cdot \text{hm}^{-2})$	成熟期单株分蘖数 Offshoot per plant at mature stage	公顷穗数 Spike number $/ (10^4 \cdot \text{hm}^{-2})$
2019—2020	FM	361.6±33.5a	1.9±0.2a	967.5±89.3a	36.2±3.5a	0.7±0.1a	343.35±31.8a
	FS	319.5±30.0b	1.8±0.1a	934.5±91.1a	34.5±3.6b	0.6±0.1a	290.55±30.1b
	CK	291.0±28.9c	1.5±0.1b	898.5±90.0b	32.2±3.1c	0.4±0.1b	273.90±28.1c
2020—2021	FM	353.6±34.4a	2.1±0.2a	1012.2±100.0a	39.3±4.1a	0.8±0.1a	356.8±36.1a
	FS	321.5±31.1b	1.9±0.2b	1005.6±99.8a	36.4±3.4b	0.6±0.1b	312.6±32.2b
	CK	284.6±29.9c	1.5±0.2c	836.8±81.1b	30.9±3.1c	0.3±0.1c	288.9±29.3c
2021—2022	FM	375.2±36.5a	1.7±0.2a	905.2±89.3a	31.3±3.3a	0.5±0.1a	310.8±32.2a
	FS	346.9±35.2b	1.4±0.1b	885.6±90.1b	28.7±2.9b	0.4±0.1a	283.9±30.1b
	CK	301.2±32.8c	1.1±0.1c	745.9±74.5c	25.9±2.6c	0.2±0.1b	251.6±28.3c

注: 同列不同小写字母表示同一年份不同处理间差异显著 ($P < 0.05$)。下同。

Note: Different lowercase letters in the same year meant significant differences among different treatments ($P < 0.05$). The same below.

2.6 不同种植方式对冬小麦产量、耗水量和水分利用效率的影响

由图5可知,与CK相比,FM和FS处理冬小麦产量3 a分别平均提高74.7%和45.4% ($P<0.05$),但3个处理间耗水量差异不显著,因此FM和FS处理水分利用效率分别平均显著提高67.3%和46.1%。与FS处理相比,FM处理冬小麦产量显著提高20.2%,水分利用效率显著提高14.6%。可见,两种覆盖方式均能在不增加耗水的情况下,显著提高冬小麦产量和水分利用效率,其中FM处理增产效应和用水效率均优于FS处理。

2.7 不同种植方式经济效益分析

如表3所示,不同种植方式间经济效益差异显著。3种处理肥料和种子投入相同,地膜投入有差异,其中FM处理每年地膜用量为 $150 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,年投入 $1\,500 \text{ CNY} \cdot \text{hm}^{-2}$;FS处理每年地膜用量为 $97.5 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,年投入 $975 \text{ CNY} \cdot \text{hm}^{-2}$;CK无地膜投入。因处理间小麦产量差异显著,均表现为 $\text{FM}>$

$\text{FS}>\text{CK}$,故收入亦表现为 $\text{FM}>\text{FS}>\text{CK}$,处理间差异显著。按当地市场价格,2020—2022年小麦售价约 $2.0\sim 2.2 \text{ CNY} \cdot \text{kg}^{-1}$,FM处理3 a累计纯收益较FS增加 $801.4 \text{ CNY} \cdot \text{hm}^{-2}$,较CK增加 $1\,986.8 \text{ CNY} \cdot \text{hm}^{-2}$,均差异显著。

表2 不同种植方式对冬小麦产量构成因素的影响

Table 2 Effects of different planting patterns on yield components of winter wheat

年度 Year	处理 Treatment	公顷穗数 Spike number $/ (10^4 \cdot \text{hm}^{-2})$	穗粒数 Grain number	千粒重 1000-grain weight/g
2019—2020	FM	$343.35 \pm 33.25\text{a}$	$36 \pm 3\text{a}$	$37.8 \pm 3.5\text{a}$
	FS	$290.55 \pm 28.97\text{b}$	$32 \pm 3\text{b}$	$35.2 \pm 2.9\text{b}$
	CK	$273.90 \pm 28.31\text{c}$	$28 \pm 2\text{c}$	$33.0 \pm 3.5\text{c}$
2020—2021	FM	$356.8 \pm 33.63\text{a}$	$40 \pm 3\text{a}$	$39.8 \pm 4.1\text{a}$
	FS	$312.6 \pm 33.22\text{b}$	$34 \pm 4\text{b}$	$36.2 \pm 3.3\text{b}$
	CK	$288.9 \pm 29.11\text{c}$	$30 \pm 4\text{c}$	$32.5 \pm 3.1\text{c}$
2021—2022	FM	$310.8 \pm 30.25\text{a}$	$32 \pm 3\text{a}$	$35.1 \pm 3.4\text{a}$
	FS	$283.9 \pm 27.99\text{b}$	$26 \pm 2\text{b}$	$32.6 \pm 3.5\text{b}$
	CK	$251.6 \pm 26.32\text{c}$	$20 \pm 2\text{c}$	$28.8 \pm 3.0\text{c}$

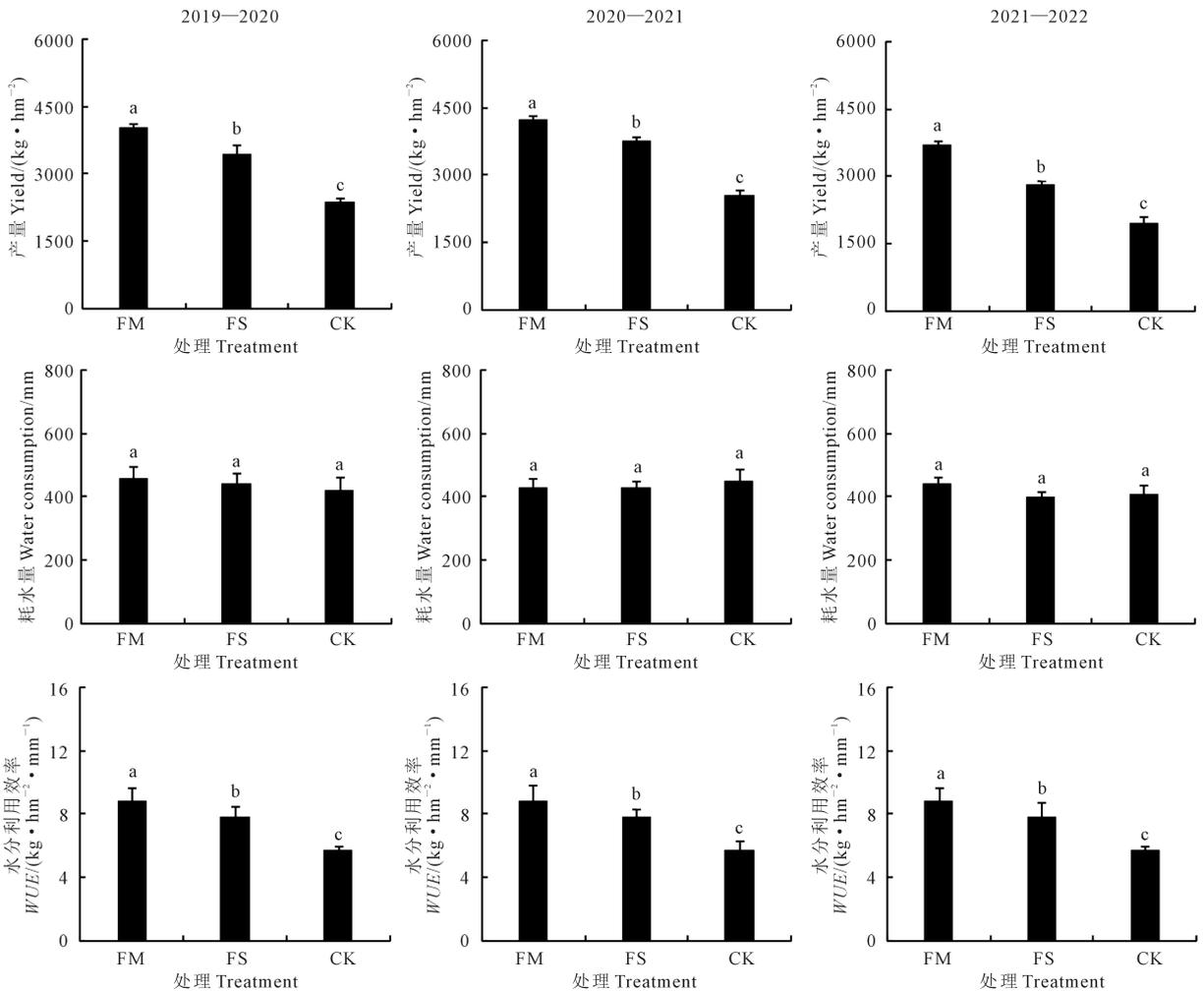


图5 不同种植方式对冬小麦产量、耗水量和WUE的影响

Fig.5 Effects of different planting patterns on yield, water consumption and WUE of winter wheat

表 3 不同种植方式经济效益分析

Table 3 Economic benefit analysis of different planting methods

年度 Year	处理 Treatment	种子投入 Seed input /(CNY · hm ⁻²)	地膜投入 Film input /(CNY · hm ⁻²)	化肥投入 Fertilizer input /(CNY · hm ⁻²)	产量 Yield /(kg · hm ⁻²)	收入 Income /(CNY · hm ⁻²)	净收益 Net income /(CNY · hm ⁻²)
2019—2020	FM	900	1500	1519.4	4028.5±101.2a	8862.7±121.0a	4943.3±98.7a
	FS	900	975	1519.4	3431.9±113.5b	7550.2±101.3b	4155.8±105.5b
	CK	900	0	1519.4	2366.9±118.4c	5207.2±99.3c	2787.8±117.9c
2020—2021	FM	900	1500	1519.4	4209.5±110.3a	8419.0±114.6a	4499.6±111.8a
	FS	900	975	1519.4	3751.9±98.2b	7503.8±109.5b	4109.4±134.7b
	CK	900	0	1519.4	2537.6±121.3c	5075.2±100.7c	2655.8±103.4c
2021—2022	FM	900	1500	1519.4	3697.6±122.0a	7395.2±124.9a	3475.8±112.8a
	FS	900	975	1519.4	2821.9±105.6b	5643.8±99.9b	2249.4±114.4b
	CK	900	0	1519.4	1966.9±158.9c	3933.9±100.5c	1514.5±121.9c

3 讨论

地膜覆盖的增温效应主要表现在气温较低阶段和作物生育前期,随气温升高,作物生长加快,冠层增大,对地面遮阴增强后增温效果下降甚至出现降温效应,这种降温效应可减轻夏季高温对作物生殖生长的胁迫,显著提高作物产量^[6,11,15,20]。本试验中,FM 和 FS 处理温度效应均表现为“挂钩型”,与 Liu 等^[6]的研究一致。与 CK 相比,FM 处理播种期~出苗期 0~20 cm 土层土壤平均温度增加 4.89℃,利于冬小麦早生快发,随冬小麦生长发育,灌浆期地上冠层达到最大,对地面遮阴增强,土壤温度较 CK 降低 0.81℃,成熟期随着部分叶片干枯,FM 处理增温效果重现;FS 处理增温趋势与 FM 处理相同,但播种期~出苗期增温幅度小于 FM。这一结果与 Hendarwy 等^[15]研究相同之处为覆膜在冬小麦生育前期增温,后期降温,但增温和降温的生育期有所差异,这是由于试验地点气候条件不同所致。

水分是制约旱地作物产量的关键因素之一,由于黄土高原地区地下水位较深且无灌溉水源,冬小麦生长只能依靠降水和土壤水,其中土壤供水和土壤水库调蓄水分的功能可有效缓解降水不足和分布不均导致的干旱胁迫^[21]。充足的底墒能够诱导植物根系下扎至土壤深层,使得深层土壤水分得以吸收利用,从而为丰产奠定基础^[22-23]。研究表明,地表覆盖地膜能够阻止水分垂直蒸发,使降水能入渗至 2 m 以下土层,进而显著增加土壤含水量,提高播前底墒^[24-25],并在作物需水较少阶段保蓄更多的水分供需水盛期利用,同时调节作物耗水,促进后期水分消耗由棵间蒸发向作物蒸腾转化,增加蒸腾耗水比例^[26-27],使春小麦苗期~孕穗期耗水增加 9.6%~27.2%^[10],玉米灌浆期耗水增加 237.7%^[19],马铃薯盛花期耗水增加 21.1%~50.5%,薯块膨大期

增加 5.4%~57.9%^[28]。在促进关键期耗水前提下,作物产量和水分利用效率显著提高。本研究中,FM 和 FS 处理均显著提高冬小麦出苗期、返青期、拔节期和灌浆期 0~200 cm 土层土壤含水量,并显著增加冬小麦返青期~抽穗期和抽穗期~灌浆期耗水量,与 CK 相比,FM 处理耗水量分别提高 52.83%和 37.63%,FS 处理分别提高 42.64%和 17.01%;在前期增温和提高土壤含水量前提下,FM 处理冬小麦早生快发,基本苗和分蘖数显著增加,同时在促进关键期耗水前提下,其公顷穗数显著增加 25.34%;FS 处理各指标增幅均小于 FM 处理。

有研究表明小麦穗数与产量呈显著正相关关系^[29]。地膜覆盖通过调节土壤温度、增加底墒和促进生育期耗水能促进冬小麦分蘖,提高穗数、千粒重和经济效益^[30-31]。本试验条件下,覆盖可显著改善冬小麦产量构成因素(表 2)。与 CK 相比,FM 处理公顷穗数、穗粒数和千粒重分别平均显著增加 25.34%、28.57%和 14.55%,FS 处理分别提高 6.08%、14.29%和 6.67%,两者产量分别显著提高 64.73%和 25.90%,且 FM 较 FS 处理显著提高 30.84%。在转蒸发为蒸腾作用下,覆盖模式虽然产量显著提高,但 3 个处理间耗水量差异不显著,因而 FM 和 FS 处理水分利用效率分别显著提高 50.47%和 19.18%;与 FS 相比,FM 处理水分利用效率显著提高 26.26%,这与已有研究一致^[29-31]。

经济效益和生态效益是决定一种技术能否推广和长期应用的根本因素^[32]。本试验中 3 种处理肥料和种子投入相同,地膜投入有差异,其中 FM 处理每年地膜用量为 1500 kg · hm⁻²,年投入 1500 CNY · hm⁻²;FS 处理每年地膜用量为 975 kg · hm⁻²,年投入 975 CNY · hm⁻²;CK 无地膜投入。但 FM 处理 3 a 纯收益较 FS 增加 801.4 CNY · hm⁻²,较 CK 增加 1986.8 CNY · hm⁻²,且 FM 显著高于 FS 和

CK。可见,FM 处理经济效益和生态效益均优于其他处理,可在高寒旱区推广和长期应用。

4 结 论

与露地种植相比,地膜覆盖(全膜覆土穴播和膜侧沟播)通过提高冬小麦拔节前 0~20 cm 土层土壤温度(增幅 2.6%~40.9%和 3.6%~27.4%),提高冬小麦各生育时期 0~200 cm 土层土壤含水量(增幅 13.1%~57.0%和 2.0%~43.8%)并促进返青期后耗水(增幅 2.9%~52.8%和 1.2%~42.6%),显著增加了冬小麦基本苗(增幅 24.2%~24.6%和 9.8%~15.2%)、分蘖数(增幅 23.1%~54.5%和 19.9%~27.3%)、公顷穗数(增幅 23.5%~25.4%和 6.1%~12.8%)、穗粒数(增幅 28.6%~60.0%和 13.3%~30.0%)和千粒重(增幅 14.5%~22.5%和 6.7%~13.2%),从而显著提高冬小麦产量(增幅 65.9%~88.0%和 43.5%~47.9%)和水分利用效率(增幅 55.5%~73.3%和 37.2%~54.9%),其中全膜覆土穴播模式调节效果优于膜侧沟播,适宜在高寒旱区地膜小麦种植中推广应用。

参 考 文 献:

- [1] WANG H L, ZHANG X C, ZHANG G P, et al. Mulching coordinated the seasonal soil hydrothermal relationships and promoted maize productivity in a semi-arid rainfed area on the Loess Plateau[J]. *Agricultural Water Management*, 2022, 263: 107448.
- [2] 毛安然,赵护兵,杨慧敏,等.不同覆盖时期和覆盖方式对旱地冬小麦经济和环境效应的影响[J].*中国农业科学*, 2021, 54(3): 608-618.
MAO A R, ZHAO H B, YANG H M, et al. Effects of different mulching periods and mulching practices on economic return and environment[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2021, 54(3): 608-618.
- [3] 侯慧芝,高世铭,张绪成,等.西北黄土高原半干旱区全膜微垄沟穴播对冬小麦耗水特性和水分利用效率的影响[J].*中国农业科学*, 2016, 49(24): 4701-4713.
HOU H Z, GAO S M, ZHANG X C, et al. Effects of micro ridge-furrow with plastic film mulching and bunching seeding on water consumption characteristics and water use efficiency of winter wheat in semiarid areas of Northwest Loess Plateau[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2016, 49(24): 4701-4713.
- [4] KADER M A, SENGE M, MOJID M A, et al. Recent advances in mulching materials and methods for modifying soil environment[J]. *Soil & Tillage Research*, 2017, 168: 155-166.
- [5] 王静,王廷璞,张明莉,等.全膜覆土穴播种植技术对旱地冬小麦土壤微生物活性的影响[J].*干旱地区农业研究*, 2016, 34(2): 108-112.
WANG J, WANG T P, ZHANG M L, et al. Effects of whole film casing mode bunch on soil microbial activities of winter wheat in dryland[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2016, 34(2): 108-112.
- [6] LIU P, WANG H L, LI L C, et al. Ridge-furrow mulching system reg-

ulates hydrothermal conditions to promote maize yield and efficient water use in rainfed farming area[J]. *Agricultural Water Management*, 2020, 232(8): 106041.

- [7] QIN W, HU C S, OENEMA O. Soil mulching significantly enhances yields and water and nitrogen use efficiencies of maize and wheat: a meta-analysis[J]. *Scientific Reports*, 2015, 5: 16210.
- [8] 杨凯,刘颖川,张发莲,等.青海东部地区地膜覆盖对玉米地土壤无机氮含量和酶活性的影响[J].*青海大学学报*, 2021, 39(1): 38-43.
YANG K, LIU Y C, ZHANG F L, et al. Effects of plastic film mulching on the contents of soil inorganic nitrogen and enzymatic activity in maize field in eastern Qinghai[J]. *Journal of Qinghai University*, 2021, 39(1): 38-43.
- [9] 侯慧芝,张绪成,尹嘉德,等.半干旱区全膜覆土穴播对春小麦耗水特征和产量的影响[J].*干旱地区农业研究*, 2019, 37(2): 150-157.
HOU H Z, ZHANG X C, YIN J D, et al. Effects of full plastic-film mulching with bunch planting on water consumption characteristics and grain yield of spring wheat in semi-arid region[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2019, 37(2): 150-157.
- [10] 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.
WANG L, FAN T L, YAN Y, et al. Effect of different mulch cultivation on soil moisture, yield and quality of dryland winter wheat[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2023, 37(3): 248-257.
- [11] 俞盛山,张平良,郭天文,等.全膜覆土穴播对旱地春小麦农田热水热效应及产量的影响[J].*甘肃农业大学学报*, 2018, 53(6): 56-63.
YU S S, ZHANG P L, GUO T W, et al. Effect of soil-film mulching and hole seeding on soil temperature, moisture and yield of rain-fed spring wheat[J]. *Journal of Gansu Agricultural University*, 2018, 53(6): 56-63.
- [12] 侯慧芝,高世铭,张绪成,等.旱地全膜覆土穴播春小麦的耗水特征及其对产量的影响[J].*水土保持学报*, 2017, 31(1): 202-210.
HOU H Z, GAO S M, ZHANG X C, et al. Effects of soil-plastic mulching on water consumption characteristics and grain yield of spring wheat in semiarid region[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2017, 31(1): 202-210.
- [13] 张平良,郭天文,刘晓伟,等.半干旱区全膜覆土穴播对小麦土壤氮素矿化、无机氮及产量的影响[J].*中国土壤与肥料*, 2021(5): 192-199.
ZHANG P L, GUO T W, LIU X W, et al. Effects of full plastic-film mulching with bunch planting on soil nitrogen mineralization, inorganic nitrogen and yield of spring wheat in semi-arid region[J]. *Soils and Fertilizers Sciences in China*, 2021(5): 192-199.
- [14] 景东田.陇东旱塬区冬小麦不同覆膜方式对土壤水热及产量的影响[J].*干旱地区农业研究*, 2016, 34(4): 218-224.
JING D T. Influence of different film mulching methods on soil water content, soil temperature and yield of winter wheat in the drought plateau of the eastern Gansu Province[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2016, 34(4): 218-224.
- [15] HENDAWY S, ALSAMIN B, MOHAMMED N, et al. Combining

- planting patterns with mulching bolsters the soil water content, growth, yield, and water use efficiency of spring wheat under limited water supply in arid regions[J]. *Agronomy*, 2022, 12(6): 1298-1298.
- [16] 陈影慧, 程宏波, 刘媛, 等. 覆盖栽培模式对冬小麦花后旗叶光合特性及产量的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2019, 37(3): 192-199.
- CHEN Y H, CHENG H B, LIU Y, et al. Effect of covering on photosynthetic characteristics of flag leaf during post-anthesis and yield in winter wheat[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2019, 37(3): 192-199.
- [17] 侯慧芝, 张绪成, 尹嘉德, 等. 覆盖对西北旱地春小麦旗叶光合特性和水分利用的调控[J]. *应用生态学报*, 2019, 30(3): 931-940.
- HOU H Z, ZHANG X C, YIN J D, et al. Regulation of mulch conditions on photosynthesis and water utilization of spring wheat in north-west semi-arid area of China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2019, 30(3): 931-940.
- [18] 李瑞雅, 孙敏, 任爱霞, 等. 耕作模式和播种方式对旱地小麦产量形成的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2022, 40(2): 17-26, 51.
- LI R Y, SUN M, REN A X, et al. Effects of tillage and seeding methods on yield formation of dryland wheat [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2022, 40(2): 17-26, 51.
- [19] 王红丽, 张绪成, 宋尚有, 等. 西北黄土高原旱地全膜双垄沟播种对玉米季节性耗水和产量的调节机制[J]. *中国农业科学*, 2013, 46(5): 917-926.
- WANG H L, ZHANG X C, SONG S Y, et al. Regulation of whole field surface plastic mulching and double ridge-furrow planting on seasonal soil water loss and maize yield in rain-fed area of northwest loess plateau[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2013, 46(5): 917-926.
- [20] ZHAO X D, QIN X R, LI T L, et al. Effects of planting patterns plastic film mulching on soil temperature, moisture, functional bacteria and yield of winter wheat in the Loess Plateau of China[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2023, 22(5): 1560-1573.
- [21] 程立平, 林文, 王亚萍, 等. 深层土壤水分对黄土塬区旱作冬小麦耗水的贡献[J]. *干旱地区农业研究*, 2020, 38(5): 136-142.
- CHENG L P, LIN W, WANG Y P, et al. Contributions of soil water in deep soil layers to water consumption of dryland winter wheat on the Loess Tableland[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2020, 38(5): 136-142.
- [22] 高艳梅, 孙敏, 高志强, 等. 不同降水年型旱地小麦覆盖对产量及水分利用效率的影响[J]. *中国农业科学*, 2015, 48(18): 3589-3599.
- GAO Y M, SUN M, GAO Z Q, et al. Effects of mulching on grain yield and water use efficiency of dryland wheat in different rainfall years[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2015, 48(18): 3589-3599.
- [23] WU L H, QUAN H, WU L N, et al. Responses of winter wheat yield and water productivity to sowing time and plastic mulching in the Loess Plateau[J]. *Agricultural Water Management*, 2023, 289: 108572.
- [24] CHEN S Y, ZHANG X Y, PEI D, et al. Effects of straw mulching on soil temperature, evaporation and yield of winter wheat: field experiments on the North China Plain [J]. *Annals of Applied Biology*, 2007, 150(3): 261-268.
- [25] 徐红梅, 霍铁珍, 彭遵原, 等. 不同材料覆盖对土壤水热及小麦产量的影响[J]. *干旱区资源与环境*, 2019, 33(5): 107-111.
- XU H M, HUO Y Z, PENG Z Y, et al. Effects of different materials mulching on soil moisture-temperature and yield of wheat[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2019, 33(5): 107-111.
- [26] 李儒, 崔荣美, 贾志宽, 等. 不同沟垄覆盖方式对冬小麦土壤水分及水分利用效率的影响[J]. *中国农业科学*, 2011, 44(16): 3312-3322.
- LI R, CUI R M, JIA Z K, et al. Effects of different furrow-ridge mulching ways on soil moisture and water use efficiency of winter wheat[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2011, 44(16): 3312-3322.
- [27] HOU H Z, ZHANG X C, YIN J D, et al. Effects of micro-ridge-furrow with plastic mulching and bunching seeding on soil hydrothermal environment and its response to photosynthesis and grain yield of spring wheat [J]. *Journal of Applied Ecology*, 2020, 31(9): 3005-3014.
- [28] 王红丽, 张绪成, 于显枫, 等. 黑色地膜覆盖的土壤水热效应及其对马铃薯产量的影响[J]. *生态学报*, 2016, 36(16): 5215-5226.
- WANG H L, ZHANG X C, YU X F, et al. Effect of using black plastic film as mulch on soil temperature and moisture and potato yield[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(16): 5215-5226.
- [29] 杨长刚, 柴守玺, 常磊. 半干旱雨养区不同覆膜方式对冬小麦土壤水分利用及产量的影响[J]. *生态学报*, 2015, 35(8): 2676-2685.
- YANG C G, CHAI S X, CHANG L. Influences of different plastic film mulches on soil water use and yield of winter wheat in semiarid rain-fed region[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(8): 2676-2685.
- [30] 张姚, 程宏波, 杨佳佳, 等. 覆盖方式对旱地小麦花后旗叶抗氧化生理及粒重形成的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2023, 41(4): 141-150.
- ZHANG Y, CHENG H B, YANG J J, et al. Effect of mulching methods on drought resistance physiology and grain weight formation of dryland wheat in post-flowering flag leaf[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2023, 41(4): 141-150.
- [31] 杨慧敏, 王涛, 窦瑛霞, 等. 不同降水年型地膜覆盖及秸秆覆盖提高小麦产量和氮素利用的效应[J]. *植物营养与肥料学报*, 2021, 27(11): 1905-1914.
- YANG H M, WANG T, DOU Y X, et al. Effects of plastic film mulching and straw mulching on wheat yield and nitrogen utilization during different precipitation years[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2021, 27(11): 1905-1914.
- [32] WANG H L, ZHANG X C, YU X F, et al. Maize-fababean rotation under double ridge and furrows with plastic mulching alleviates soil water depletion [J]. *Agricultural Water Management*, 2018, 207: 59-66.