

耕作模式和播种方式对旱地小麦产量形成的影响

李瑞雅^{1,2}, 孙 敏^{1,2}, 任爱霞^{1,2}, 林 文^{1,2},
秦基伟^{1,2}, 李 蕾^{1,2}, 卢鹏飞^{1,2}, 高志强^{1,2}

(1. 山西农业大学农学院, 山西 太谷 030801; 2. 省部共建黄土高原特色作物优质高效生产协同创新中心, 山西 太谷 030801)

摘 要:于 2015—2017 年在山西省闻喜旱地小麦试验示范基地开展大田试验,以耕作模式为主区,设休闲期深翻和免耕两种模式,以播种方式为副区,设探墒沟播、膜际条播和常规条播 3 种方式,研究旱地小麦土壤水分、产量形成和经济效益的差异。结果表明:休闲期深翻显著提高旱地小麦播前 0~300 cm 土壤蓄水效益,达 46.97%~240.44%;提高旱地小麦生育时期土壤耗水量,达 6.48%~13.07%;提高穗数、穗粒数、千粒重和产量,分别达 3.32%~7.22%、3.67%~6.53%、1.11%~3.61%、10.23%~13.16%。探墒沟播和膜际条播较常规条播显著提高了旱地小麦茎蘖成穗率,达 5.99%~16.87%,显著提高穗长 0.8~1.7 cm,提高可孕小穗数 1~3 个;提高了穗数、穗粒数,分别达 5.28%~15.75%和 1.51%~11.25%,此外,休闲期深翻后采用探墒沟播较膜际条播减少投入 1 200 元·hm⁻²,主要是旋耕机械投入、地膜和回收地膜人工投入,增加经济效益 622~754 元·hm⁻²。休闲期深翻后采用探墒沟播较常规条播减少投入 300 元·hm⁻²,主要为耕地机械投入,增加经济效益 1 430~1 899 元·hm⁻²。总之,休闲期深翻有利于蓄积休闲期降水,改善底墒,且结合探墒沟播更有利于提高 0~300 cm 土壤蓄水量,从而优化产量构成因素,实现增产增效。

关键词:旱地小麦;探墒沟播;休闲期深翻;土壤水分;产量形成

中图分类号:S512.1;S35 **文献标志码:**A

Effects of tillage and seeding methods on yield formation of dryland wheat

LI Ruiya^{1,2}, SUN Min^{1,2}, REN Aixia^{1,2}, LIN Wen^{1,2},
QIN Jiwei^{1,2}, LI Lei^{1,2}, LU Pengfei^{1,2}, GAO Zhiqiang^{1,2}

(1. College of Agriculture, Shanxi Agricultural University, Taigu, Shanxi 030801, China;
2. Provinces and Ministries Collaborative Innovation Center for High-quality and High-efficiency
Production of Featured Crops on the Loess Plateau China, Taigu, Shanxi 030801, China)

Abstract: Two major tillage methods of deep ploughing and no tillage and three sowing methods of furrow sowing, film mulch sowing and drilling sowing were designed to examine the effect of soil water on the dry land wheat yield formation and economic benefits during 2015–2017 in Shanxi Province Wenxi dryland wheat field experiment demonstration base. The results showed that deep ploughing during the fallow period significantly improved the soil water storage efficiency of 0~300 cm before planting in dryland wheat, reaching 46.97%~240.44%, which increased the soil water consumption during the growth period of dryland wheat from 6.48% to 13.07%. The number of ears, grains per ear, thousand-seed weight and yield were increased by 3.32%~7.22%, 3.67%~6.53%, 1.11%~3.61%, 10.23%~13.16%, respectively. Compared with drilling sowing, the furrow sowing and film mulch sowing significantly increased the ear-forming rate of dryland wheat by 5.99%~16.87%, and significantly increased the ear length by 0.8 cm to 1.7 cm. The number of fertile spikelets was increased 1 to 3. The number of ears and grains per ear increased to 5.28%~15.75% and 1.51%~11.25%, respectively. In addition, the use of moisturizing

收稿日期:2021-06-20 修回日期: 2021-12-25

基金项目:国家现代农业产业技术体系建设专项(CARS-03-01-24);国家自然科学基金项目(31771727);科技部对发展中国家科技援助项目(KY202002002);山西省优秀博士来晋工作奖励资金科研项目(SXYBKY2018044);山西省高等学校科技创新项目(2019L0385);山西农业大学科技创新基金项目(2019001)

作者简介:李瑞雅(1996-),女,山西长治人,硕士研究生,研究方向为旱作栽培与作物生理。E-mail: liruiya7381@163.com

通信作者:高志强(1964-),男,山西中阳人,教授,博士生导师,主要从事旱作栽培与作物生理研究。E-mail: gaozhiqiang1964@126.com

and furrow sowing after deep ploughing during the fallow period reduced the investment by 1 200 Yuan · hm⁻² compared with inter-film mulch sowing, mainly due to rotation. Farm machinery input, plastic film and artificial input of recycled plastic film increased the economic benefit by 622~754 Yuan · hm⁻². After deep ploughing during the fallow period, the use of moisturizing and furrow sowing reduced the investment by 300 Yuan · hm⁻² compared with conventional drilling sowing. Farmland machinery investment increased economic benefits by 1 430~1 899 Yuan · hm⁻². In summary, deep ploughing during the fallow period was beneficial to accumulate precipitation and improve the bottom moisture. Combined with the exploration of soil moisture and furrow sowing was more conducive to increasing the soil water storage capacity of 0~300 cm, thereby optimizing the yield components and realizing the increase in production and efficiency.

Keywords: dryland wheat; furrow sowing; deep ploughing during leisure; fallow period; soil moisture content; yield formation

小麦是黄土高原主要粮食作物之一,播种面积占全国麦田面积的 45%,且主要是旱地小麦,其生产对保障黄土高原粮食稳产高产意义重大。旱作麦区唯一的水分来源是自然降水,主要集中于休闲期 7—9 月,且蒸发量大,降水利用效率低,从而导致小麦产量低而不稳,经济效益低。因此,如何将休闲期降水和生育期的有限降水蓄积于土壤而实现降水资源高效利用,一直是旱作栽培工作者的研究课题,其对我国旱地农业可持续发展也具有重要意义。

耕作是旱作麦区蓄积休闲期自然降水的主要蓄水保墒措施^[1]。休闲期深翻可打破旱地麦田犁底层,增加土壤集水与保墒能力,加快土壤渗水速率^[2],提升土壤贮备水平^[3],促进形成冬前壮苗^[4],蓄积的水分可延续利用至孕穗期^[5],优化产量构成因素,从而增加产量^[6]。旱地小麦采用休闲期耕作蓄水保墒技术的稳产效果显著,为进一步优化产量构成因素和提高产量,可通过结合适宜的播种方式实现。

20 世纪 70 年代从日本引进地膜覆盖栽培技术,该技术可增加生育期土壤温度,抑制杂草生长,同时将生育期的有限降水充分蓄积,促进拔节~开花和开花~成熟阶段土壤耗水量的增加,从而进一步提高产量^[7]。进入 21 世纪,极端天气(干旱、倒春寒、高温)经常出现,因此科学工作者研发了探墒沟播播种技术,该技术是采用旋耕、播种、施肥、镇压为一体的播种机械^[8],具有条带旋耕、硬茬播种、精准施肥、定向镇压、抗旱保墒、节省灌溉水等优点,可提高旱地小麦播种质量。董飞等^[9]研究表明,探墒沟播利于麦田蓄水保墒,增加地表温度,提高有效穗数和产量;赵杰等^[10]研究表明,探墒沟播利于提高小麦生育期总耗水量,从而提高产量和水分利用效率;刘小丽等^[11]研究表明,探墒沟播小麦功能叶片持续时间长,且灌浆高峰开始早,增加了千粒重,从而提高产量。任爱霞等^[12]研究表明,探

墒沟播可提高旱地小麦产量、蛋白质含量及其产量。地膜覆盖、探墒沟播技术均已被作为主推技术在小麦生产中应用。但地膜覆盖增加了地膜投入、后期人工揭膜等费用,还可能因揭膜不完全残留于土壤造成环境污染^[13-14]。目前,旱地小麦休闲期蓄水保墒结合不同播种方式的综合研究较少,探墒沟播播种技术下土壤蓄水、用水规律鲜有报道。

因此,本研究于 2015—2017 年连续 2 a 在黄土高原东部山西晋南闻喜旱地小麦试验示范基地进行旱地小麦不同耕作模式和播种方式试验,分析休闲期深翻与免耕两种耕作模式下探墒沟播、膜际条播、常规条播 3 种播种方式对旱地小麦各生育时期土壤蓄水、耗水、产量形成和经济效益的影响,旨在明确休闲期蓄水保墒后探墒沟播技术的蓄水、用水增产机理,为小麦旱作栽培高效高产技术提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于 2015—2017 年在山西省闻喜旱地小麦试验示范基地(111°17' E, 35°20' N)进行。试验地位于黄土高原东部,属于半干旱半湿润冬小麦种植区,海拔 450~700 m,属于温带大陆性季风气候,年日照时数 2 300 h,年均气温 12℃~14℃,无霜期 200 d,一年一熟,夏季为休闲期。水分来源为天然降水,无灌溉条件。2015 年 6 月 15 日测定 0~20 cm 土壤肥力为:有机质 10.55 g · kg⁻¹、全氮 0.68 g · kg⁻¹、碱解氮 37.65 mg · kg⁻¹、速效磷 17.64 mg · kg⁻¹;2016 年 6 月 10 日测定 0~20 cm 土壤肥力为:有机质 10.62 g · kg⁻¹、全氮 0.68 g · kg⁻¹、碱解氮 38.22 mg · kg⁻¹、速效磷 15.28 mg · kg⁻¹。2015—2017 年试验点降水量见表 1,2005—2015 年平均降水量 471.1 mm,2015—2016 年降水量为 386.8 mm,较 2005—2015 年休闲期降雨量减少 204.7 mm,播

种~越冬期降水量增加 55.3 mm,开花~成熟期降水量增加 66.6 mm;2016—2017 年降水量为 406.3 mm,较 2005—2015 年休闲期降雨量减少 134.0 mm,播种~越冬期降水量增加 44.6 mm,越冬~拔节降水量增加 38.6 mm。可见,两年试验期都属于降水较少年份^[15]。

表 1 2015—2017 年全年降水量和 10 a 平均降水量及其分布/mm
Table 1 Annual and 10-year average rainfall and their distribution at Wenxi base from 2015 to 2017

年份 Year	休闲期 Fallow period	播种~越冬期 SS~WS	越冬~拔节期 WS~JS	拔节~开花期 JS~AS	开花~成熟期 AS~MS	总计 Total
2005—2015	299.4	50.9	28.2	36.6	56.2	471.1
2015—2016	94.7	101.2	11.0	57.1	122.8	386.8
2016—2017	165.4	95.5	66.8	27.2	51.4	406.3

注:数据来源:山西省闻喜县气象站。休闲期,6月中旬至10月上旬;播种~越冬期,10月中旬至11月下旬;越冬~拔节期,12月上旬至4月上旬;拔节~开花期,4月中旬至5月上旬;开花~成熟期,5月中旬至6月上旬。
Note: Data sources: Meteorological Observation of Wenxi County, Shanxi Province, China. Fallow period: From the middle 10 d of June to the first 10 d of Oct.; Sowing~pre-wintering stage (SS~WS): From the middle 10 d of Oct. to the last 10 d of Nov.; Pre-wintering~Jointing stage (PS~JS): From the first 10 d of Dec. to the first 10 d of Apr. in the following year; Elongation~anthesis stage (JS~AS): From the middle 10 d of Apr. to the first 10 d of May; Anthesis~maturity stage (AS~MS): The middle 10 d of May to the first 10 d of Jun. .

1.2 试验设计

供试品种为晋麦 92,由闻喜县农业农村局提供。前茬小麦收获时留高茬(20~30 cm)。采用二因素裂区设计,以休闲期耕作方式为主区,分别为深翻(DP)和免耕(NT,休闲期不进行耕作)两个耕作方式;以播种方式为副区,设探墒沟播(FS)、膜际条播(FM)和常规条播(DS)3种播种方式,共6个处理,重复3次。其中,休闲期深翻处理是指分别于2015年7月20日、2016年7月24日进行深翻,深度25~30 cm,同时将有机肥(1 500 kg·hm⁻²)和秸秆深埋还田;探墒沟播是选用带有锯齿圆盘开沟器的播种机,一次完成灭茬、开沟、起垄、施肥、播种、覆土、镇压等作业。开沟深度7~8 cm,起垄高度3~4 cm,秸秆残渣和表土分离于垄背上,化肥条施于沟底部中央,种子分别着床与沟底3~4 cm处、沟内两侧的湿土中,形成宽行20~25 cm,窄行10~12 cm的宽窄行种植模式。膜际条播是选用起垄、覆膜、播种一次完成。膜厚度0.08 cm,垄宽40 cm,高10 cm,垄顶成圆弧形。地膜覆盖在垄上,膜两侧覆土。垄间沟宽20 cm,垄和沟组成60 cm的带;垄沟膜两侧种植小麦,因此田间有20 cm的窄行和40 cm的宽行两种行距。于开花期后25 d左右(次年5月中旬)人工揭膜。常规条播为传统种植方式,行距20 cm(图1)。全部处理于8月25日浅旋、耙耱、平整土地,等待播种。10月1日播种,播前基施氮、磷、钾肥,纯氮为150 kg·hm⁻²,P₂O₅为150 kg·hm⁻²,K₂O为150 kg·hm⁻²,基本苗为225·10⁴株·hm⁻²,常规管理。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 土壤蓄水量测定 于播种前、开花期用土钻取0~300 cm土样(每20 cm为一土层),样品采集

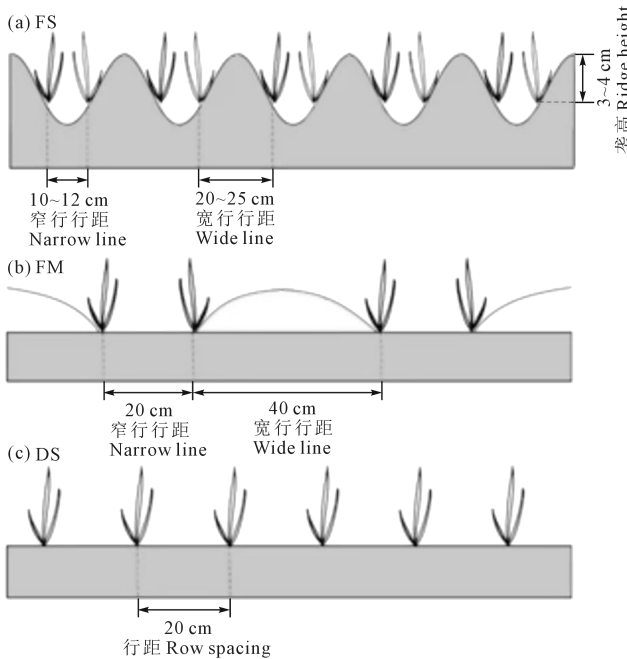


图 1 不同种植模式简易图

Fig.1 Simple diagrams of different planting modes
后立即装入铝盒,称鲜土质量,105℃烘至恒重,计算土壤蓄水量^[16]。
1.3.2 群体动态测定 于旱地小麦三叶期,每小区选择长势均匀的3行小麦为调查样段,每样段面积为0.667 m²,于越冬期、拔节期、孕穗期、开花期及成熟期调查样段内群体总茎数。
1.3.3 成熟期农艺性状测定 选择长势均匀的植株10株,调查株高、叶面积、穗长、单穗可孕小穗数及不可孕小穗数。
1.3.4 产量及其构成测定 于成熟期选取每个小区内0.667 m²调查产量及其构成因素(穗数、每穗平均粒数及千粒重)。每个小区选择20 m²收获测产,按照国标要求的含水量换算实际产量。

1.4 计算与统计方法

1.4.1 计算方法

$$SWS_i = W_i \times D_i \times H_i \times 10/100 \tag{1}$$

式中, SWS_i 为第 i 土层土壤蓄水量(mm); W_i 为第 i 土层土壤质量含水量(%); D_i 为第 i 土层土壤容重($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$); H_i 为第 i 土层厚度(cm)^[18]。

$$WSE = \frac{D}{R} \times 100\% \tag{2}$$

式中, WSE 为土壤蓄水效率; D 为耕作前至播种前 0~300 cm 增加的蓄水量(mm); R 为耕作前至播前降水量(mm)。

$$\Delta W = W_1 - W_2 \tag{3}$$

式中, ΔW 为各生育阶段土壤贮水减少量(mm); W_1 和 W_2 分别为旱地小麦生育阶段初和阶段末的土壤蓄水量。

$$TWE = \Delta W + P + K \tag{4}$$

式中, TWE 为生育期总耗水量(mm); P 为有效降水量(mm), K 为地下水补给量(mm)。本试验地下水埋深在 5 m 以下,故 K 值可忽略不计。

$$\text{茎蘖成穗率} = \text{成熟期穗数} / \text{分蘖盛期茎数} \times 100\% \tag{5}$$

$$\text{总收入}(\text{元} \cdot \text{hm}^{-2}) = \text{籽粒产量}(\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}) \times \text{市场价值}(\text{元} \cdot \text{kg}^{-1}) \tag{6}$$

$$\text{经济效益}(\text{元} \cdot \text{hm}^{-2}) = \text{总收入} - \text{总投入} \tag{7}$$

试验年份 2015—2017 年的旱地小麦市场价值为 $2.4 \text{ 元} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

1.4.2 统计方法 试验采用 Microsoft Excel 2010 处理数据,采用 Origin 8.5 软件进行作图,采用 SPSS 软件进行统计分析,差异显著性检验用 LSD 法,显著性水平设定为 $P<0.05$ 。

2 结果与分析

2.1 耕作模式和播种方式对旱地小麦土壤蓄水的影响

2.1.1 休闲期降水的土壤蓄水效率 两试验年度间,休闲期深翻较免耕均显著增加旱地小麦休闲期

0~300 cm 土壤蓄水量、播前 0~300 cm 土壤蓄水量,增幅分别达 37.10~49.04、32.06~46.20 mm,显著提高休闲期土壤蓄水效率 43%~258%,尤其是 2015—2016 年度(表 2)。可见,旱地小麦休闲期深翻有利于蓄积休闲期降水,提高土壤蓄水效率,改善播前底墒。

2.1.2 各生育时期土壤蓄水量 两试验年度间,休闲期深翻较免耕均显著提高旱地小麦各生育时期 0~300 cm 土壤蓄水量(表 3)。无论休闲期深翻与否,探墒沟播和膜际条播较常规条播可提高旱地小麦越冬期 0~300 cm 土壤蓄水量,降低成熟期 0~300 cm 土壤蓄水量,且探墒沟播高于膜际条播;2015—2016 年,探墒沟播和膜际条播较常规条播降低拔节期至开花期 0~300 cm 土壤蓄水量,2016—2017 年,探墒沟播较常规条播显著提高拔节期 0~300 cm 土壤蓄水量;降低了深翻条件下开花期 0~300 cm 土壤蓄水量,提高了免耕条件下 0~300 cm 开花期土壤蓄水量,但差异均不显著。可见,休闲期深翻有利于蓄积水分的延续利用,且生育期采用探墒沟播更利于生育前期水分的蓄存。

2.2 耕作模式和播种方式对旱地小麦各生育阶段土壤耗水量及耗水占比的影响

两试验年度间,休闲期深翻较对照均显著提高旱地小麦播前~拔节期、拔节~开花期、开花~成熟期 0~300 cm 土壤耗水量,分别达 2.89~19.32、5.00~12.30、4.91~25.60 mm(表 4),从而显著提高总耗水量。2015—2016 年,探墒沟播和膜际条播较常规条播显著提高了旱地小麦播前~拔节期土壤耗水量,提高了拔节~开花期土壤耗水量,探墒沟播较常规条播提高了休闲期深翻条件下开花~成熟期土壤耗水量及其比例,而膜际条播较常规条播降低了开花~成熟期土壤耗水量及其比例。探墒沟播和膜际条播较常规条播显著提高生育期总耗水量,且膜际条播高于探墒沟播。2016—2017 年,探墒沟播较常规条播降低了旱地小麦播前~拔节期土壤耗水量及

表 2 耕作模式对休闲期 0~300 cm 土壤蓄水效率的影响/mm

Table 2 Effects of tillage methods on soil water storage efficiency of 0~300 cm during fallow period

年份 Year	耕作模式 Tillage method	休闲期降雨量 Precipitation during fallow period/mm	耕作前土壤蓄水量 Soil water storage before tillage/mm	播种前土壤蓄水量 Soil water storage before sowing/mm	休闲期蓄水量 Water storage during fallow period/mm	休闲期土壤蓄水效率 Water storage efficiency during fallow period/%
2015—2016	DP	94.70	398.58a	463.85a	65.28c	68.93a
	NT		398.98a	418.15b	19.17d	20.25c
2016—2017	DP	165.40	342.10b	454.53a	112.43a	67.97a
	NT		340.28b	416.78b	76.50b	46.25b

注:同列不同小写字母表示差异显著($P<0.05$)。
Note: Different lowercase letters in the same column indicate significant differences ($P<0.05$).

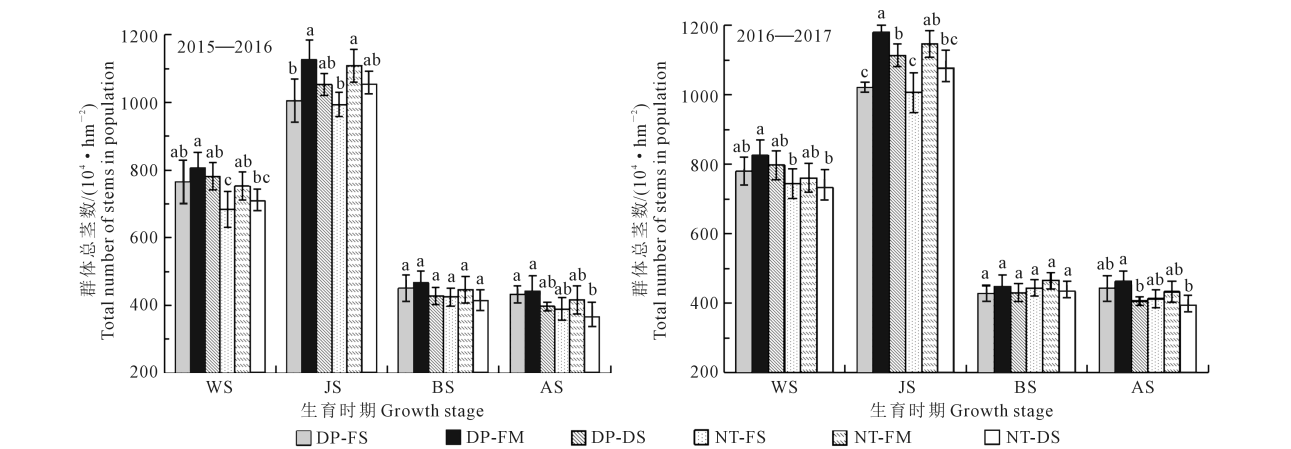
表 3 耕作模式和播种方式对旱地小麦各生育时期土壤蓄水量的影响/mm
Table 3 Effects of tillage and sowing methods on soil storage capacity at different growth stages of dryland wheat

年份 Year	耕作模式 Tillage method	播种方式 Seeding method	越冬期 WS	拔节期 JS	开花期 AS	成熟期 MS
2015—2016	DP	FS	538.01a	432.75ab	330.03a	332.50b
		FM	545.18a	426.88b	321.40ab	328.47bc
		DS	515.66b	439.64a	338.01a	343.37a
	NT	FS	499.33c	398.67c	307.31b	325.23cd
		FM	503.30c	386.13d	289.90c	321.15d
		DS	488.10d	402.61c	312.28b	343.23a
2016—2017	DP	FS	525.63a	481.35a	343.14a	265.91b
		FM	521.01a	449.71cd	318.49bc	259.58c
		DS	520.97a	476.40b	347.60a	273.14a
	NT	FS	497.66b	459.08bc	332.47b	260.15c
		FM	494.31b	431.49e	305.27c	252.71d
		DS	485.47c	446.64d	322.98b	260.47c

注:同列不同小写字母表示相同年度处理间差异显著 ($P<0.05$)。下同。
Note: In the same year, different lowercase letters in the same column indicate significant differences among treatments ($P<0.05$). The same as below.

表 4 耕作模式和播种方式对旱地小麦各生育阶段耗水量及其所占比例的影响
Table 4 Effects of tillage and sowing methods on water consumption and its proportion in each growth stage of dryland wheat

年份 Year	耕作模式 Tillage method	播种方式 Sowing method	播前~拔节期 SS~JS		拔节~开花期 JS~AS		开花~成熟期 AS~MS		总耗水量/mm TWE
			数量/mm Amount	比例/% Ratio	数量/mm Amount	比例/% Ratio	数量/mm Amount	比例/% Ratio	
			数量/mm Amount	比例/% Ratio	数量/mm Amount	比例/% Ratio	数量/mm Amount	比例/% Ratio	
2015—2016	DP	FS	144.11a	33.97ab	159.82a	37.67a	120.34a	28.36 a	424.27a
		FM	148.57a	34.80ab	162.59a	38.09a	115.72a	27.11b	426.88a
		DS	136.21b	33.03b	158.73a	38.73a	116.45a	28.24a	412.38b
	NT	FS	132.51bc	34.34ab	148.47a	38.48a	104.88b	27.18b	385.86c
		FM	145.68a	37.30a	153.33a	39.26a	91.56c	23.44d	390.55c
		DS	125.45c	34.40ab	147.42a	40.42a	91.85c	25.18c	364.73d
2016—2017	DP	FS	135.55c	31.55d	165.41a	38.51a	128.63a	29.94b	429.58b
		FM	166.97a	38.32a	158.42a	36.36a	110.31c	25.32d	435.70a
		DS	140.53c	35.64c	156.00a	34.57a	125.86ab	29.80b	422.39c
	NT	FS	120.44e	30.26d	153.82a	38.65a	123.72b	31.09a	397.97e
		FM	147.65b	36.45b	154.42a	37.88a	103.96d	25.67d	405.03d
		DS	131.93d	33.26c	150.87a	38.03a	113.91c	28.71c	396.70e

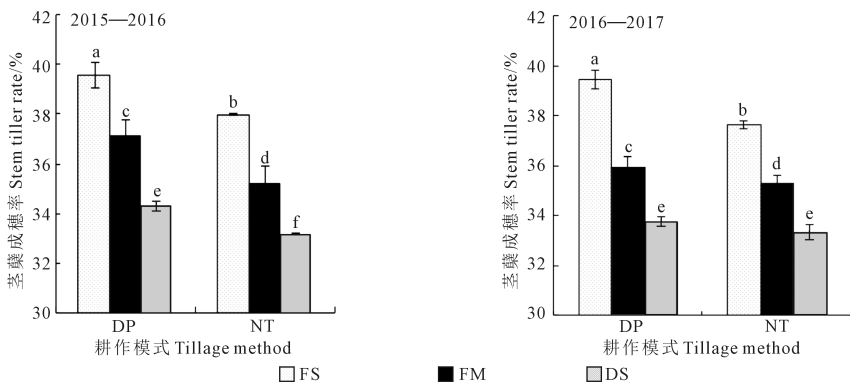


注:BS:孕穗期。不同小写字母表示各生育时期处理间差异显著 ($P<0.05$)。
Note: BS: Booting stage. Different lowercase letters indicate significant differences among treatments in each growth stages ($P<0.05$).

图 2 耕作模式和播种方式对旱地小麦各生育时期群体动态变化的影响
Fig.2 Effects of tillage method and sowing methods on population dynamics of dryland wheat at different growth stages

规条播显著提高旱地小麦茎蘖成穗率,且探墒沟播高于膜际条播;膜际条播较探墒沟播、常规条播提高各生育时期小麦群体总茎数,且探墒沟播与膜际条播孕穗期、开花期小麦群体总茎数差异不显著。可见,休闲期深翻后采用探墒沟播利于提高茎蘖成

穗率,为穗数提高奠定了基础。
2.3.2 穗部性状 两试验年度间,休闲期深翻较免耕均提高了旱地小麦的成熟期穗长、可孕小穗数,增幅分别达 9.44 cm、19.00 个,降低了不可孕小穗数(图 4)。探墒沟播和膜际条播较常规条播均显著提



注:不同小写字母表示处理间差异显著 ($P<0.05$),下同。
Note: Different small letters indicate significant differences among treatments ($P<0.05$). The same below.

图 3 耕作模式和播种方式对旱地小麦茎蘖成穗率的影响

Fig.3 Effects of tillage and sowing methods on stem tiller rate in dryland wheat

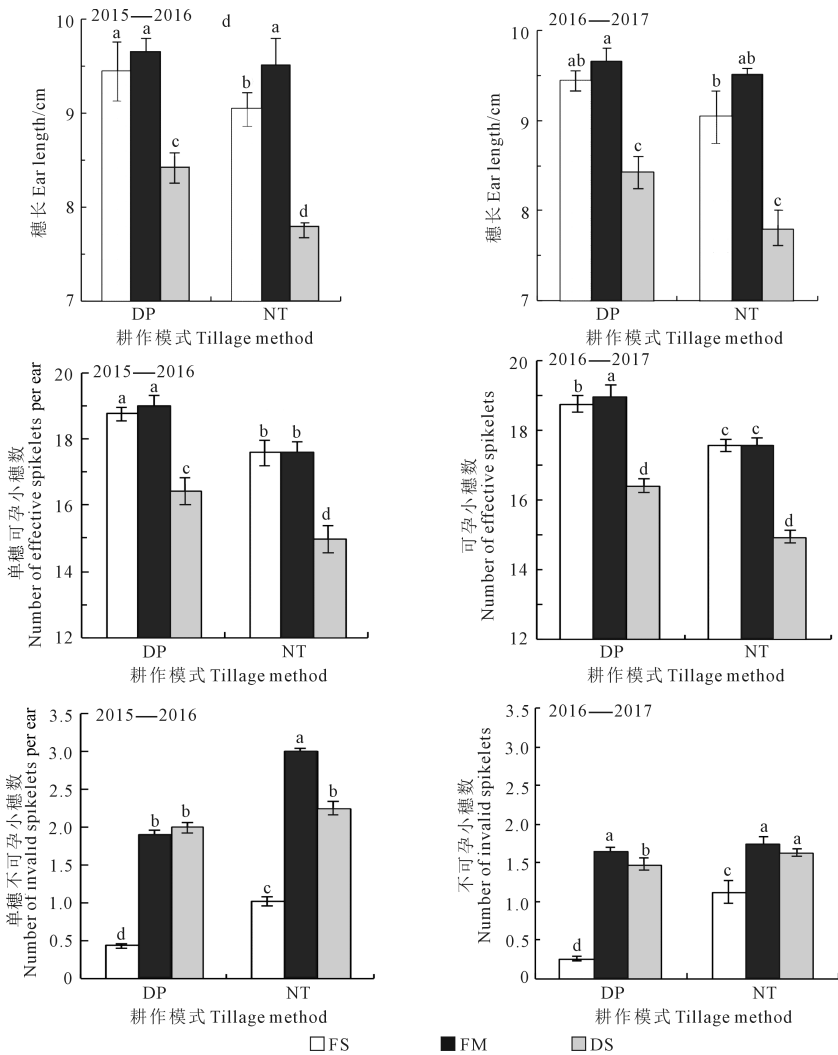


图 4 耕作模式和播种方式对旱地小麦成熟期农艺性状的影响

Fig.4 Effects of tillage and sowing methods in fallow period on agronomic characters of dryland wheat at maturity

高了成熟期穗长和可孕小穗数,膜际条播高于探墒沟播。而不可孕小穗数以探墒沟播显著最低。可见,休闲期深翻能促进穗部生长,采用探墒沟播技术更有利于增加穗长、降低不可孕小穗数,为成熟期穗粒数的提高奠定基础。

2.4 耕作模式和播种方式对旱地小麦产量及其构成因素和收获指数的影响

两试验年度间,休闲期深翻较免耕提高了旱地小麦穗数 3.32%~7.22%、穗粒数 3.67%~6.53%、千粒重 1.11%~3.61%和产量 10.23%~13.16%,且穗数和产量均达显著水平;显著提高了收获指数(表 5)。探墒沟播和膜际条播较常规条播均显著提高了旱地小麦穗数,达5.28%~15.75%,膜际条播显著高于探墒沟播;显著提高了穗粒数和产量,分别达 1.51%~11.25%、12.45%~25.98%。探墒沟播较常规条播显著增加了千粒重,而膜际条播较常规条播显著降低了千粒重。最终,探墒沟播和膜际条播较

常规条播的收获指数在休闲期深翻条件下无显著变化,免耕条件下显著提高,但探墒沟播和膜际条播间无显著差异。可见,休闲期深翻后采用探墒沟播可通过优化产量三要素实现增产。

2.5 耕作模式和播种方式对旱地小麦阶段耗水量与产量构成因素的相关性分析

耕作模式结合播种方式下,播种~拔节阶段土壤耗水量与穗数、拔节~开花阶段土壤耗水量与穗粒数、开花~成熟阶段土壤耗水量与千粒重均呈显著正相关关系,而开花~成熟阶段土壤耗水量还与不可孕小穗数呈显著负相关关系(图 5)。可见,旱地小麦前期土壤耗水显著影响着穗数,中期耗水显著影响着穗粒数,后期耗水显著影响着千粒重。

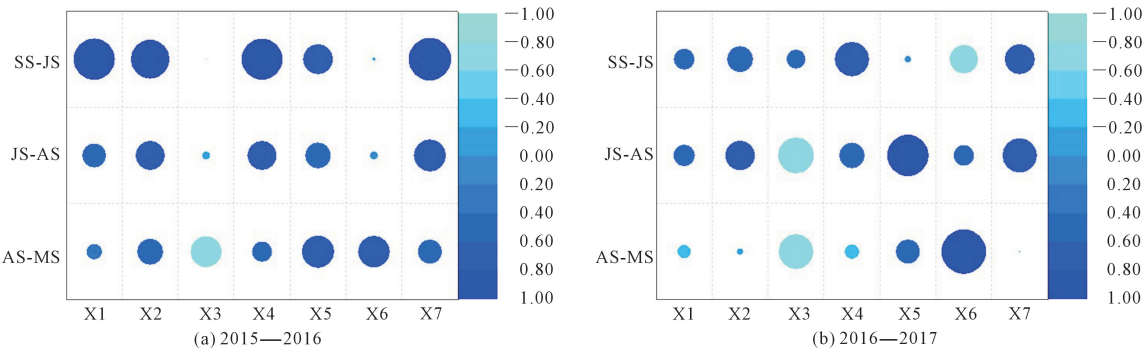
2.6 耕作模式和播种方式对旱地小麦的经济效益评价

休闲期深翻较免耕增加总投入 750 元·hm⁻²、总收入 837.94~1 402.86 元·hm⁻²,提高经济效益

表 5 耕作模式和播种方式对旱地小麦产量及其构成因素和收获指数的影响

Table 5 Effects of tillage and sowing methods on yield and its composition factors and harvest index of dryland wheat

年份 Year	耕作模式 Tillage method	播种方式 Sowing method	穗数 Spike number /(10 ⁴ ·hm ⁻²)	穗粒数 Grain number per spike	千粒重 1000-grain weight/g	产量 Yield /(kg·hm ⁻²)	收获指数 Harvest index/%
2015-2016	DP	FS	397.71b	34.80a	43.40a	4597.63b	35.55a
		FM	418.17a	33.38b	40.91c	5184.50a	36.02a
		DS	361.32d	31.28d	41.90b	3950.24d	35.11a
	NT	FS	377.85c	32.67c	42.93a	4150.53c	33.85b
		FM	390.01b	31.63d	39.72d	4213.36c	34.18b
		DS	349.72e	30.12e	40.44c	3584.22e	32.95c
2016-2017	DP	FS	403.05b	34.84a	42.62a	4807.63b	35.63a
		FM	412.25a	33.94b	38.88d	5025.58a	35.22a
		DS	375.92c	32.78c	41.66b	4230.53d	36.03a
	NT	FS	378.93c	33.40bc	41.74b	4255.24d	35.96b
		FM	404.88b	32.10d	37.61e	4441.05c	35.36b
		DS	358.89d	31.62e	40.21c	3784.27e	33.70c



注:图中气泡与图例颜色相对应,−0.8≥R>−1 或 1>R≥0.8 表示显著相关关系。气泡大小与相关性成正比。X₁:穗长; X₂:可孕小穗数; X₃:不可孕小穗数; X₄:穗数; X₅:穗粒数; X₆:千粒重; X₇:产量

Note: The bubble in the figure corresponds to the color of the legend, and −0.8≥R>−1 or 1>R≥0.8 indicate a significant correlation. The bubble size is directly proportional to the correlation. X₁: Ear length; X₂: Number of fertile spikelets; X₃: Number of infertile spikelets; X₄: Number of spikes; X₅: Number of grains per spike; X₆: Thousand-grain weight; X₇: Yield

图 5 旱地小麦阶段耗水量与产量构成因素的相关性分析

Fig.5 Correlation analysis between stage water consumption and yield component factors of dryland wheat

21.02~352.84 元·hm²(表 6)。膜际条播较探墒沟播和常规条播可增加总投入 900~1 200 元·hm⁻²、总收入 363.79~2 039.18 元·hm⁻²,而经济效益表现为膜际条播显著高于常规条播,但显著低于探墒沟播,达 621.91~754.06 元·hm⁻²。可见,休闲期深翻后采用探墒沟播由于减少了旋耕、地膜及花后回收地膜费用,更利于提升经济效益、降低环境污染。

3 讨 论

3.1 休闲期深翻与探墒沟播对旱地小麦各生育期土壤蓄水量的影响

雨养条件下,提高土壤蓄水能力并延续利用水分至后期是作物稳产、增产的有效途径,其中耕作因可改变土壤的物理性状,如孔隙度、容重、田间持水量等而成为蓄水保墒的常用措施。在黄土高原东部,旱地麦田休闲期深翻可提高播前 0~300 cm 土壤底墒,尤其欠水年增加 63~91 mm,蓄水效率提高 147%~205%^[17]。本文研究结果与前人结果一致,休闲期深翻提高 2015—2016 年(休闲期降水量 94.7 mm)蓄水效率 224.40%~258.22%、2016—2017 年(休闲期降水量 165.4 mm)45.51%~48.36%,从而提高底墒 37~46 mm。

播种方式对土壤水分蓄保的影响表现为:地膜覆盖在作物生育前期可以改善土壤水温条件,在后期则会导致土壤水分状况恶化,影响产量的形成和水分利用^[18];探墒沟播可提高 100~200 cm 土壤蓄

水量,且沟播对土壤蓄水量的高低受生育期降雨量影响较大^[19]。本团队前期研究表明,旱地麦田休闲期深翻后采用地膜覆盖,蓄水保墒效果可延续至孕穗期^[20],本次研究结果除地膜覆盖蓄水保墒效果外还表明,休闲期深翻后采用探墒沟播蓄水保墒效果可延续至拔节期,这与降水时间分布有关,两年度降水均在拔节前(2015—2016 年度休闲期、播种~越冬期、越冬~拔节期分别为 94.7、101.2、11.0 mm,2016—2017 年度休闲期、播种~越冬期、越冬~拔节期分别为 165.4、95.5、66.8 mm)。说明不论膜际条播还是探墒沟播,生长期间的降水量显著影响着蓄水保墒效果。

3.2 休闲期深翻与探墒沟播对旱地小麦土壤耗水的影响

不同生育阶段土壤耗水量均会影响不同时期作物的生长,只有有效促进降水-土壤蓄水-作物的良性循环,满足作物对水分的需求,才能优化产量构成因素而实现高产^[21]。有研究表明,休闲期深翻可提高旱地小麦生育期总耗水量^[22],主要表现为减少了生育前期耗水,增加了生育中、后期耗水^[23-24]。探墒沟播可增加旱地小麦生育期总耗水量,主要是增加了生育中、后期土壤耗水,优化了穗数及穗粒数,从而增产 16%~19%^[25-26]。本研究结果表明,旱地麦田休闲期深翻后,探墒沟播、膜际条播较常规条播均可提高生育前期和中后期耗水量,但探墒沟播则降低了生育前、中期耗水比例,显著增加了后期

表 6 耕作模式和播种方式对旱地小麦经济效益的影响/(Yuan·hm⁻²)

Table 6 Effects of tillage and sowing methods on economic benefits of dryland wheat												
年份 Year	耕作模式 Tillage method	播种方式 Sowing method	总收入 Total revenue	投入 Input						总投入 Total input	经济效益 Net profit	
				耕作机械 Tillage machinery	播种机械 Sowing machinery	收割机械 Harvesting machinery	地膜 Plastic	种子 Seeds	化肥 Fertilizer			其他 Other
2015—2016	DP	FS	11034.31b	750	825		0			0	4718	6316.31a
		FM	11372.40a	1350	675		450		2175	300	5918	5694.40c
		DS	9480.58e	1350	525	750	0	428		0	5018	4462.58d
	NT	FS	9961.27d	0	825		0			0	3668	6293.27b
		FM	10534.46c	600	675		450		1875	300	4868	5666.46c
		DS	8362.13f	600	525		0			0	3968	4394.13e
2016—2017	DP	FS	11538.31b	750	825		0			0	4718	6820.31a
		FM	12061.38a	1350	675		450		2175	300	5918	6143.38c
		DS	10153.27d	1350	525	750	0	428		0	5018	5135.27e
	NT	FS	10212.58d	0	825		0			0	3668	6544.58b
		FM	10658.52c	600	675		450		1875	300	4868	5790.52d
		FS	9082.25e	600	525		0			0	3968	5114.25e

注:耕作机械包括深翻机械及旋耕机械,其中深翻机械投入为 750 元·hm⁻²,旋耕机械投入为 600 元·hm⁻²,化肥投入为深翻基施有机肥 300 元·hm⁻²,其他投入为开花后回收地膜用工费。

Note: The tillage machine includes deep turning machine and rotary tillage machine, in which the input of deep turning machine was 750 Yuan·hm⁻², the input of rotary tillage machine was 600 Yuan·hm⁻². The input of chemical fertilizer was 300 Yuan·hm⁻² in deep ploughing application of base organic fertilizer. Other costs were for recycling mulch after flowering.

耗水比例。可见,旱地麦田休闲期深翻蓄水保墒的同时采用探墒沟播播种的土壤水分消耗规律与仅休闲期深翻或探墒沟播的耗水规律有一定差异,主要表现在中期耗水比例降低,说明旱地麦田整个生育期采用蓄水保墒技术,更利于将前期和中期的水分保存下来供给后期利用,能抵御后期干旱、保证千粒重。

3.3 休闲期深翻与探墒沟播对旱地小麦产量和经济效益的影响

群体茎蘖构成及其动态是反映小麦群体质量的最重要指标,掌握群体茎蘖结构变化有助于有效地调控群体生长^[27]。在常规条播条件下,过高的基本苗数导致单株营养面积降低,部分植株因生长不良而遭淘汰,单位面积成穗数并不能显著增加^[28]。赵红梅等^[29]研究表明,休闲期深翻使旱地麦田蓄保的降水可应用到抽穗期,从而增加群体总茎数,促进有效分蘖形成,提高成穗率。谭培珍等^[30]、薛远赛等^[31]研究表明,沟播小麦可充分利用土壤水分,利于形成冬前壮苗,抑制无效分蘖,群体动态变化平稳,从而通过增加穗数提高产量。本研究结果表明,探墒沟播较膜际条播、常规条播有利于旱地小麦群体总茎数的稳定,减少生育前期无效分蘖,提高茎蘖成穗率,为穗数的提高奠定基础。这与前人研究结果基本一致。此外,本文研究结果还表明,休闲期深翻能促进穗部生长,采用探墒沟播更有利于增加穗长、降低不可孕小穗数。最终显著提高旱地小麦穗数、穗粒数达5%~15%、2%~11%,显著增加千粒重,优化了产量三要素,增产12%~16%。相关性分析还表明,旱地麦田前、中、后期土壤耗水分分别显著影响着成熟期的穗数、穗粒数和千粒重,说明整个生育期的耗水规律决定着旱地小麦产量三要素的高低,从而决定产量水平。

绿色、高效生产是现代农业生产的宗旨。本研究中,膜际条播虽然总收入为最高,但因旋耕、地膜费用及开花后地膜回收费,使成本增加1 050元·kg⁻²,而探墒沟播虽产量较低,但因成本较低,且地膜覆盖产量的增加无法抵消覆膜产生的额外花费,最终较探墒沟播经济效益降低626.81~861.91元·hm⁻²。这与毛安然等^[32]研究结果一致。另外,残膜遗留在土壤中会造成土壤结构的改变,使渗水性下降,从而阻碍根系发育,不利于农业可持续发展^[33-34]。因此,旱地麦田采用探墒沟播种植方式,是产量保持一定水平、经济效益有所提升的绿色高效生产栽培技术措施。

4 结 论

1)通过2 a田间试验发现,降水较少年份,旱地麦田休闲期深翻可蓄积休闲期降水,且采用探墒沟播可高效合理利用土壤水分,减少生育前期土壤耗水,增加中后期土壤耗水。

2)休闲期深翻采用探墒沟播提高茎蘖成穗率,利于可孕小穗数的形成,最终优化产量构成,提升产量和经济效益。且该技术可减少环境污染,促进农业可持续发展。

参 考 文 献:

- [1] 孙敏,葛晓敏,高志强,等.不同降水年型休闲期耕作蓄水与旱地小麦籽粒蛋白质形成的关系[J].中国农业科学,2014,47(9):1692-1704.
SUN M, GE X M, GAO Z Q, et al. Relationship between water storage conservation in fallow period and grains protein formation in dryland wheat in different precipitation years[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2014, 47(9): 1692-1704.
- [2] 党建友,裴雪霞,张定一,等.休闲期深翻时间对旱地麦田土壤水分特性和小麦产量的影响[J].应用生态学报,2016,27(9):2975-2982.
DANG J Y, PEI X X, ZHANG D Y, et al. Effects of deep plowing time during the fallow period on water storage-consumption characteristics and wheat yield in dry-land soil[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2016, 27(9): 2975-2982.
- [3] 崔凯,高志强,孙敏,等.休闲期深翻覆盖对旱地小麦土壤水分运行及产量与品质形成的影响[J].干旱地区农业研究,2014,32(2):78-84.
CUI K, GAO Z Q, SUN M, et al. Effect of deep plowing and plastic film mulching in fallow period on soil water storage and wheat grain yield and quality[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2014, 32(2): 78-84.
- [4] 金永贵,原亚琦,林文,等.休闲期耕作方式对旱地麦田土壤性状及产量的影响[J].山西农业科学,2020,48(3):382-386.
JIN Y G, YUAN Y Q, LIN W, et al. Effects of cultivation in leisure period on soil properties and yield of dryland wheat field[J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2020, 48(3): 382-386.
- [5] 张慧芳,孙敏,任爱霞,等.旱地麦田休闲期耕作配施磷肥对土壤水分及小麦籽粒品质的影响[J].山西农业科学,2019,47(5):836-840.
ZHANG H Y, SUN M, REN A X, et al. Effects of tillage during fallow period plus phosphorus application on soil water and grain quality of dryland wheat[J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2019, 47(5): 836-840.
- [6] 裴雪霞,党建友,张定一,等.休闲期耕作方式和施用保水剂对旱地小麦产量及水分利用率的影响[J].核农学报,2021,35(5):1243-1251.
PEI X X, DANG J Y, ZHANG D Y, et al. Effects of different tillage in fallow period combined with super absorbent polymers on the grain yield and precipitant use efficiency of dry land wheat[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2021, 35(5): 1243-1251.
- [7] 李念孙,孙敏,高志强,等.极端年型旱地麦田深松和覆盖播种水分消耗与植株氮素吸收、利用关系的研究[J].中国农业科学,2018,51(18):3455-3469.
LI N N, SUN M, GAO Z Q, et al. A study on the relationship between water consumption and nitrogen absorption, utilization under sub-

- soiling during the fallow period plus mulched-sowing in humid and dry years of dryland wheat[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2018, 51(18): 3455-3469.
- [8] 吕芬.探究小麦探墒沟播技术的优势[J].农民致富之友,2019,(11):16.
LV F. Exploring the advantages of wheat furrow sowing technology[J]. *Friends of Farmers Getting Rich*, 2019, (11): 16.
- [9] 董飞,闫秋艳,杨峰,等.播种方式对不同灌溉条件下冬小麦产量及土壤水热条件的影响[J].河南农业科学,2020,49(4):7-14.
DONG F, YAN Q Y, YANG F, et al. Effects of sowing method on winter wheat yield and soil hydrothermal conditions under different irrigation conditions[J]. *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 2020, 49(4): 7-14.
- [10] 赵杰,林文,孙敏,等.休闲期深翻和探墒沟播对旱地小麦水氮资源利用的影响[J].应用生态学报,2021,32(4):1307-1316.
ZHAO J, LIN W, SUN M, et al. Effects of deep ploughing during the fallow period and soil moisture-based furrow sowing on water and nitrogen utilization of dryland wheat[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2021, 32(4): 1307-1316.
- [11] 刘小丽,王凯,杨珍平,等.播期与播种方式的不同配套对一年两作区旱地冬小麦农艺性状及产量的影响[J].华北农学报,2018,33(2):232-238.
LIU X L, WANG K, YANG Z P, et al. Effect of different sowing dates and sowing methods on agronomic characters and yield of dryland winter wheat in two-cropping areas[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2018, 33(2): 232-238.
- [12] 任爱霞,任婕,仝锦,等.播量对探墒沟播旱地小麦籽粒产量及品质的影响[J].山西农业科学,2020,48(11):1791-1795,1800.
REN A X, REN J, TONG J, et al. Effects of sowing rate on grain yield and grain quality of dryland wheat under furrow sowing[J]. *Journal of Shanxi Agricultural Sciences*, 2020, 48(11): 1791-1795, 1800.
- [13] ZHOU L F, FENG H. Plastic film mulching stimulates brace root emergence and soil nutrient absorption of maize in an arid environment[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2020, 100(2): 540-550.
- [14] 倪丽佳,李非里,刘秋亚,等.地膜覆盖对土壤微生态环境的影响[J].浙江工业大学学报,2011,39(4):407-410.
NI L J, LI F L, LIU Q Y, et al. Influence of plastic film mulching on soil micro-ecological environment[J]. *Journal of Zhejiang University of Technology*, 2011, 39(4): 407-410.
- [15] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会.农业气候影响评价:农作物气候年型划分方法:GB/T 21986-2008[S].北京:中国标准出版社,2008.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Assessment of agroclimate impact: classification method of annual crop climate types: GB/T 21986-2008[S]. Beijing: China Standards Press, 2008.
- [16] 孙敏,温斐斐,高志强,等.不同降水年型旱地小麦休闲期耕作的蓄水增产效应[J].作物学报,2014,40(8):1459-1469.
SUN M, WEN F F, GAO Z Q, et al. Effects of farming practice during fallow period on soil water storage and yield of dryland wheat in different rainfall years[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2014, 40(8): 1459-1469.
- [17] 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.
- [18] 王俊,李凤民,贾宇,等.半干旱地区播前灌溉和地膜覆盖对春小麦产量形成的影响[J].中国沙漠,2004,(1):79-84.
WANG J, LI F M, JIA Y, et al. Effects of plastic film mulching and pre-sowing irrigation on yield formation of spring wheat[J]. *Journal of Desert Research*, 2004, (1): 79-84.
- [19] 闫秋艳,董飞,贾亚琴,等.耕作方式对旱地麦田土壤蓄水变化特征及小麦产量的影响[J].水土保持学报,2021,35(1):222-228.
YAN Q Y, DONG F, JIA Y Q, et al. Effects of tillage patterns on soil water storage and wheat yield in dryland wheat field[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2021, 35(1): 222-228.
- [20] 张勉,孙敏,高志强,等.年际间周年覆盖保水对旱地小麦植株氮素利用的调控研究[J].水土保持学报,2017,31(2):253-261.
ZHANG M, SUN M, GAO Z Q, et al. A study on the effects of inter-annual mulching on nitrogen utilization of dryland wheat in different precipitation years[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2017, 31(2): 253-261.
- [21] 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植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.
- [22] 郑国璋,郑玮,孙敏,等.旱地小麦休闲期地膜覆盖对土壤水分和产量的影响[J].沈阳农业大学学报,2015,46(3):357-362.
ZHENG G Z, ZHENG W, SUN M, et al. Effect of plastic film mulching in fallow period on soil water storage and dry-land wheat yield[J]. *Journal of Shenyang Agricultural University*, 2015, 46(3): 357-362.
- [23] 陈梦楠,孙敏,高志强,等.旱地麦田休闲期覆盖对土壤水分积耗的影响及与产量的关系[J].中国农业科学,2016,49(13):2572-2582.
CHEN M N, SUN M, GAO Z Q, et al. Effects of mulching during fallow period on soil water storage and consumption and its relationship with wheat yield of dryland[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2016, 49(13): 2572-2582.
- [24] 张争奇,高志强,孙敏,等.播期播量对旱地小麦土壤耗水、干物质积累及产量的影响[J].山西农业科学,2020,48(3):377-381,386.
ZHANG Z Q, GAO Z Q, SUN M, et al. Effects of sowing date and sowing amount on water consumption, dry matter accumulation and yield of wheat in dryland[J]. *Journal of Shanxi Agricultural Sciences*, 2020, 48(3): 377-381, 386.
- [25] 董志强,吕丽华,崔永增,等.不同种植模式对冬小麦产量及水分利用特性的影响[J].麦类作物学报,2016,36(11):1532-1539.
DONG Z Q, LV L H, CUI Y Z, et al. Effect of different cropping patterns on yield and water use characteristics of winter wheat[J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2016, 36(11): 1532-1539.
- [26] 王会文,李蕾,余少波,等.干旱年型深翻与探墒沟播对旱地小麦产量形成的贡献[J].作物杂志,2020(6):116-122.
WANG H W, LI L, YU S B, et al. Contribution of deep ploughing and furrow sowing to yield and its formation of dryland wheat[J]. *Crops*, 2020(6): 116-122.