文章编号:1000-7601(2022)05-0116-10 **doi**:10.7606/j.issn.1000-7601.2022.05.13

越冬作物覆盖保水效应及对后茬大豆水分利用效率和产量的影响

李 峰[1],慕 晶[1],耿智广[1],唐小丽[1],武军艳[2,3,4],
马 骊[2,3,4],鱼亚琼[5],李可夫[1],孙万仓[2,3,4]

(1.庆阳市农业科学研究院,甘肃 庆阳 745000;2.甘肃农业大学农学院,甘肃 兰州 730070;
3.省部共建干旱生境作物学国家重点实验室,甘肃 兰州 730070;4.甘肃省作物遗传改良与种质创新
重点实验室,甘肃 兰州 730070;5.甘肃省西峰区职业中等专科学校,甘肃 庆阳 745000)

摘 要:为探索越冬作物冬油菜(*Brassica rape*)、冬小麦(*Triticum aestivum*)、冬豌豆(*Pisum sativum*)的覆盖保水效应及对后茬大豆的影响,于 2019—2020 年和 2020—2021 年生长季,在甘肃省镇原县以地膜覆盖和露地为对照,比较了 5 种处理的地表覆盖度、耗水特征及后茬大豆水分利用效率和产量的差异,分析了越冬作物耗水量与生物量和地表覆盖度的相关性。结果表明:从出苗期到刈割期,冬小麦生物量分别较冬油菜和冬豌豆显著增加 15.6%和 130.5%($P<0.05$),冬油菜和冬小麦具有更高的地表覆盖度,分别为 89.2%和 84.4%。冬油菜、冬小麦、冬豌豆的耗水量分别较地膜覆盖和露地增加 50.4%和 18.6%、150.2%和 97.4%、41.6%和 11.7%;冬油菜和冬小麦耗水量与生物量的相关系数分别为 0.923 和 0.966,呈显著正相关($P<0.01$),与地表覆盖度相关性不显著,冬油菜耗水量与地表覆盖度间有负相关趋势。在相对干旱生长季,冬油菜和冬豌豆耗水量分别较露地减少 6.7 mm 和 7.5 mm,具有保水效应,冬小麦和冬豌豆后茬种植大豆具有更高的籽粒产量,产量水平分别为 2 583.3 kg·hm^{-2}和 2 550.4 kg·hm^{-2},冬小麦后茬大豆的水分利用效率最高,2 a 的平均值为 8.3 kg·hm^{-2}·mm^{-1}。综合分析地表覆盖度、耗水量、土层水分变化、大豆籽粒产量等因素,在本试验条件下,冬油菜、冬豌豆是西北旱作区冬季农田覆盖和土壤水分保持的有效措施,冬小麦是大豆种植的优势茬口。

关键词:越冬作物;后茬大豆;覆盖保水效应;水分利用效率;产量
中图分类号:S34;S565.1 **文献标志码**:A

Water conservation effect of overwintering crops mulching and its effect on water use efficiency and yield of subsequent soybean

LI Feng[1], MU Jing[1], GENG Zhiguang[1], TANG Xiaoli[1], WU Junyan[2,3,4],
MA Li[2,3,4], YU Yaqiong[5], LI Kefu[1], SUN Wancang[2,3,4]

(1. *Qingyang Academy of Agricultural Sciences*, *Qingyang*, *Gansu* 745000, *China*;
2. *College of Agronomy*, *Gansu Agricultural University*, *Lanzhou*, *Gansu* 730070, *China*;
3. *State Key Laboratory of Aridland Crop Sciences*, *Lanzhou*, *Gansu* 730070, *China*;
4. *Key Laboratory of Crop Genetics Improvement and Germ-plasm Enhancement of Gansu Province*, *Lanzhou*, *Gansu* 730070, *China*;
5. *Xifeng College of Vocational Secondary Education School*, *Qingyang*, *Gansu* 745000, *China*)

Abstract: The purpose of this study was to explore the effects of overwintering crops mulching on soil water conservation and water use efficiency and yield of subsequent soybean. The experiment was conducted in 2019-2020 and 2020-2021. The diversity of land coverage, biomass, water consumption and soybean yield underwinter rape (*Brassica pape*), winter wheat (*Triticum aestivum*), winter pea (*Pisum sativum*), plastic film mulching, and open field were compared. The results showed that the biomass of winter wheat increased by 15.6% and 130.5%

收稿日期:2021-12-25 **修回日期**:2022-06-06
基金项目:甘肃农业大学干旱生境作物学重点实验室主任基金(GSCS-2020-Z1);国家现代农业产业技术体系(CARS-12);现代丝路寒旱农业科技支撑项目(GSLK-2021-12)
作者简介:李峰(1986-),男,甘肃庆阳人,高级农艺师,主要从事作物遗传育种研究。E-mail:wslf0707@163.com
通信作者:孙万仓(1957-),男,甘肃会宁人,教授,主要从事作物遗传育种研究。E-mail:18293121851@163.com

compared with winter rape and winter pea from seedling to cutting. The land coverage of winter rape and winter wheat were 89.2% and 84.4% respectively, which were significantly ($P<0.05$) higher than other treatments. The water consumption of winter rape, winter wheat and winter pea in 0~100 cm soil layer increased by 50.4% and 18.6%, 150.2% and 97.4%, 41.6% and 11.7% compared with plastic film mulching and open field, respectively. The correlation coefficients between water consumption and biomass of winter rape and winter wheat were 0.923 and 0.966, showing a significant positive correlation ($P<0.01$), which had no significant correlation with land surface coverage, but the correlation between water consumption of winter rape and surface coverage was negative. During the dry growing season, winter rape and winter pea reduced water consumption by 6.7 mm and 7.5 mm compared with open field, respectively. Winter wheat and winter pea had higher grain yield of soybean, which reached 2 583.3 kg · hm^{-2} and 2 550.4 kg · hm^{-2}, respectively, and soybean after winter wheat had the highest *WUE* by 8.3 kg · hm^{-2} · mm^{-1}. Based on the experiment, winter rape and winter pea were effective measure for soil water conservation and sustainable development of agriculture in northwest China, and winter wheat was a suitable planting stubble for soybean planting in arid area.

Keywords: overwintering crop; subsequent soybean; water conservation effect of mulching; water use efficiency; yield

干旱是制约我国北方旱地农业生产和发展的关键因素之一[1],旱灾也是影响我国粮食产量水平的重要因素[2]。造成干旱的主要原因有气候波动异常、水资源供需变化引发的时段内降水偏少、天气干燥、蒸发量增大等[3-4]。如何保留有效降雨、减少地表蒸发量和提高土壤水分利用率,一直是旱作区农业发展的主要研究内容。覆盖作为一种有效节水措施,能够有效减轻土壤水分的蒸发,提高土壤保墒能力[5],且已被证实并成功应用于小麦[6-7]、谷子[8]、高粱[9]和玉米[10]等多种农作物生产,并在我国农业生产力提升中发挥了重要作用[11]。程宏波等[1]研究发现覆盖对土壤水分具有保持作用,较不覆盖土壤质量含水率提高 0.4%~3.9%。已有研究表明,秋季覆盖能够改变北方旱作区冬季地表裸露现状,降低风蚀,对冬季土壤具有保墒及保护作用,进而提高后茬作物产量。李琳等[12]发现冬春越冬作物能够通过改变地表覆盖度而减少农田土壤风蚀扬尘,显著降低农田近地表风速,改变地表输沙量,其中油菜覆盖的月平均输沙量比玉米根留茬地低 67.1%,具有提高土地生产力的作用;李尚中等[13]发现秋覆盖后,0~2 m 土层贮水量较露地增加了 42 mm,提高了 9.5%,且能够提高后茬玉米产量 7.1%;赵秋等[14]发现,种植冬季越冬作物能够增加土壤水分,其中种植黑麦草的土壤水分增加了 6.63%,种植二月兰的土壤水分增加了 1.20%;杨曾平等[15]研究表明,长期种植油菜、紫云英和黑麦草与水稻轮作,与休闲处理相比,0~15 cm 土层土壤含水量显著增加了 4.7%、13.0%和 10.3%。冬季地膜覆盖是旱作区一种常用土壤保水方法,被广泛应用于小麦和玉米生产[16-17],但残膜污染也导致耕地质量下降、作物减产[18-19],成为农业可持续发展的主要限制因素,所以研究探索绿色保水方法成为旱作区农业发展的主要课题之一。本文通过旱作区不同越冬作物覆盖对冬春季地表覆盖度、土壤水分变化及后茬大豆产量的影响研究,旨在探索和分析越冬作物覆盖方式在旱作区土壤水分保持和农业生产上应用的可行性,以期为西北旱作区冬季土壤环境保护及农业可持续发展提供理论依据。

1　材料与方法

1.1　试验地概况

试验于 2019—2020 年(第一生长季)、2020—2021(第二生长季)在甘肃省镇原县临泾镇新堡村(107°32′ E, 35°66′ N)实施。试验地海拔 1 254.0 m,年平均温度 9.7℃,年平均日照时数 2 474.0 h,≥10℃年积温 3 191.1℃,最大冻土深 86 cm,多年平均风速 1.6 m · s^{-1},最大风速 15.0 m · s^{-1},无霜期 160 d。多年平均年降水量 478 mm,降水主要分布在 7—9 月,属完全依靠自然降水的西北半湿润偏旱区。试验期间降雨量见图 1。土壤为黑垆土,0~20 cm 土壤容重平均为 1.17 g · cm^{-3},有机质含量13.63 g · kg^{-1},全氮 0.88 g · kg^{-1},全磷 0.81 g · kg^{-1},硝铵态氮 93.1 mg · kg^{-1},速效磷 13.08 mg · kg^{-1},速效钾 101.84 mg · kg^{-1},肥力中等。试验区为一年一熟或两年三熟耕作制度,冬季种植作物为冬小麦和冬油菜。

2019—2020、2020—2021 年生长季降雨量分别为 727.2 mm 和 638.0 mm(图 1)。两年越冬作物生

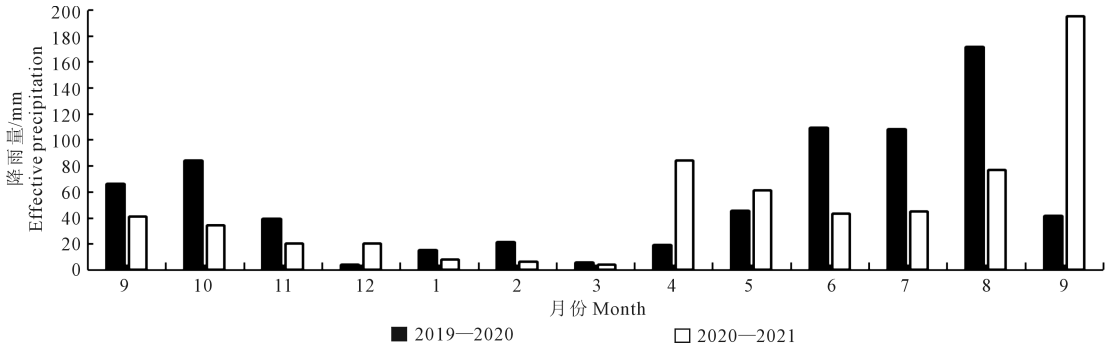


图1 生长季逐月降雨量

Fig.1 Monthly precipitation in growing season

长期内降雨量分别为253.2 mm和217.0 mm,其中9—12月的降雨量较多,分别为193.0 mm和115.0 mm,占生长季总降雨量的76.2%和53.0%,1—3月降雨量较少,分别为41.4 mm和18.0 mm,占生长季总降雨量的16.4%和8.3%,总体表现为春旱,符合该地区早春降雨较少的基本特征。两年大豆生育期内降雨量分别为474.0 mm和379.0 mm,其中2021年9月降雨量为195 mm,生育期表现为相对干旱。

1.2 试验材料及试验设计

越冬作物品种及来源见表1;地膜为甘肃济洋塑料有限公司生产的0.01 mm聚乙烯吹塑农用地面覆盖薄膜。试验采用随机区组设计,设置5个处理,分别为:种植冬油菜(T1):撒播种植方式,播种量为11.25 kg·hm^{-2},播种深度1~2 cm;种植冬小麦(T2):条播种植方式,行距15 cm,播种量为330.0 kg·hm^{-2},播种深度2~3 cm;种植冬豌豆(T3):穴播种植方式,行距50 cm,穴距10 cm,每穴3粒,播种量为120.0 kg·hm^{-2},播种深度3~4 cm;平面半膜覆盖(CK1):用120 cm宽的地膜覆盖,每隔2.5 m压土腰带,净膜面100 cm,膜间距50 cm,覆膜时间与冬季作物播种时间同步;露地(CK2):地面裸露,不做任何处理。每个处理3次重复,小区面积40 m^2(8 m×5 m)。覆膜及播种时间分别为2019年9月2日、2020年9月1日,小区间间隔1.0 m。覆膜及播种前结合整地施硫酸钾型复合肥(总养分45%,N∶P∶K为15∶15∶15)375 kg·hm^{-2}作为基肥,后期不做追肥处理。

在刈割期人工将越冬作物连根收割并随机均匀摆放于地表,并分别在2020年5月3日和2021年5月7日免耕种植大豆。大豆品种见表1,种植方式为穴播,行距40 cm,株距12 cm,播种深度3~4 cm,大豆生育期内不做追肥处理,生产管理同大田。

表1 试验材料品种及来源

Table 1 Variety and source of test materials

作物种类 Crop species	品种 Variety	种子来源 Seed source
油菜 Rape	陇油23 Longyou 23	甘肃农业大学农学院 College of Agronomy, Gansu Agricultural University
豌豆 Pea	WP010	甘肃农业大学农学院 College of Agronomy, Gansu Agricultural University
小麦 Wheat	陇育5号 Longyu 5	陇东学院农林科技学院 College of Agriculture and Forest, Longdong University
大豆 Soybean	齐黄34 Qinghuang 34	山东省农业科学院作物所 Crop Science Research Institute, Shandong Academy of Agricultural Sciences

1.3 测定项目与方法

1.3.1 生物量测定 分别于越冬期(2019年12月29日、2020年12月13日)、刈割期(2020年4月21日、2021年4月24日)采收1 m^{2}地上部分,烘干后测定生物量(105℃杀青2 h,80℃烘干48 h)。生物总量为越冬期生物量与刈割期生物量之和。

1.3.2 地表覆盖度测定 分别于越冬期(2019年12月29日、2020年12月13日)、返青期(2020年3月29日、2021年4月3日),利用普通数码相机在1.5 m高度处对地面1 m×1 m样方框内覆盖情况拍摄清晰照片记录[20],每个小区保存3张照片。在Photoshop软件中对保存照片进行几何纠正,按样方框边界裁剪为2835像素分辨率的标准正方形,以备后用。

将裁剪后的照片导入Image J(图像处理软件)V1.8.0中,测量图片内覆盖物像素数和总像素数:

$$F = N_i/N$$

式中,F 表示植被覆盖度,N_i 表示植被像素数,N 表示整幅图像像素数。

平均覆盖度=(越冬期覆盖度+返青期覆盖度)/2

1.3.3　土壤水分测定　分别在覆膜及播种期、刈割期、大豆播种前、大豆成熟期用烘干法测定 1 m 土层(每 20 cm 为一个分层)的土壤质量含水量,转换为以 mm 为单位的土壤贮水量。利用土壤水分平衡方程计算每小区作物耗水量(ET)。

$$SW = \hbar \times \rho \times \omega \times 0.1$$

式中,SW 为土壤贮水量(mm),$\hbar$ 为土层深度(cm),ρ 为土壤容重($g \cdot cm^{-3}$),ω 为土壤含水量(%)。

$$ET_1 = P_1 + \Delta SW_1$$

式中,ET_1 为越冬作物及处理耗水量;P_1 为越冬作物播种期到刈割期内有效降雨量(mm);ΔSW_1 为越冬作物播种期与刈割期土壤贮水量之差(mm),平均耗水量为年度间耗水量的平均值。

$$ET_2 = P_2 + \Delta SW_2$$

式中,ET_2 为大豆生育期耗水量,P_2 为大豆生育期内有效降雨量(mm);ΔSW_2 为大豆播种前土壤贮水量(mm)与大豆成熟期土壤贮水量之差(mm)。

$$WUE = Y/ET_2$$

式中,WUE 为大豆水分利用效率($kg \cdot hm^{-2} \cdot mm^{-1}$),$Y$ 为大豆籽粒产量($kg \cdot hm^{-2}$)。

1.3.4　大豆产量指标测定　在大豆成熟期,每个小区随机取 10 株测定单株荚数、单株粒数、单株粒重、百粒重,随机收获 1 m^2测定小区籽粒产量。百粒重和小区籽粒产量按 13%水分折算。

1.4　统计分析

用 Excel 软件进行数据处理、绘制图表。采用 SPSS 17.0 进行数据分析,并用 LSD 法在 $P<0.05$ 水平进行多重比较。

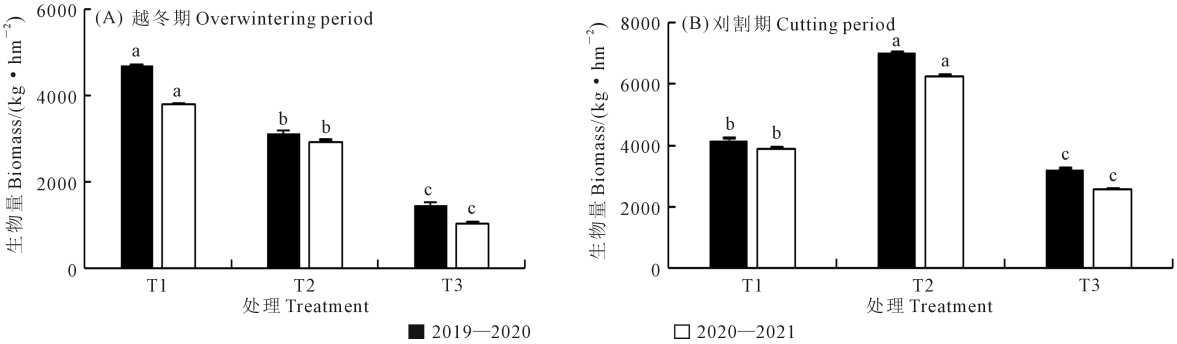
2　结果与分析

2.1　不同越冬作物的生物量

不同作物在越冬期和刈割期生物量均表现出显著差异(图 2),且年季间表现一致。越冬期以 T1 最高(图 2A),两个生长季平均达到了 4 246.2 $kg \cdot hm^{-2}$,其次是 T2,为 3 028.2 $kg \cdot hm^{-2}$,T3 最低,为 1 251.5 $kg \cdot hm^{-2}$;刈割期 T2 的平均生物量最高(图 2B),为 6 633.3 $kg \cdot hm^{-2}$,其次为 T1,为 4 016.7 $kg \cdot hm^{-2}$,T3 的最低,为 2 883.3 $kg \cdot hm^{-2}$。从整个生长季看,T2 的平均生物量最高,分别较 T1 和 T3 增加了 15.6%和 130.5%;从生长阶段看,越冬期 T1 的生物量最高,分别比 T2 和 T3 增加 40.2%和 239.3%,刈割期 T2 的生物量最高,分别较 T1 和 T3 增加 39.4%和 130.1%。T1、T2、T3 在两个生长季间总生物量表现出显著性差异,且 2019—2020 年生长季生物量均高于 2020—2021 年生长季,其中 T2 最高,两个生长季平均生物总量为 9 701.4 $kg \cdot hm^{-2}$,其次是 T1,为 8 394.9 $kg \cdot hm^{-2}$,T3 最低,为 4 208.3 $kg \cdot hm^{-2}$。

2.2　不同处理的地表覆盖度

2019—2020 生长季(图 3A)和 2020—2021 生长季(图 3B)各处理在越冬期和返青期地表覆盖度具有显著性差异,不同越冬作物在封冻初期、越冬期和刈割期的地表覆盖情况如图 4。越冬期平均地表覆盖度大小顺序依次为 T1>T2>T3>CK1>CK2,覆盖度分别为 90.8%、82.9%、51.5%、47.6%和 0.5%;返青期平均地表覆盖度大小顺序依次为 T2>T1>T3>CK1>CK2,平均覆盖度分别为 85.2%、84.2%、59.9%、50.6 和 0.6%。T1、T2、T3、CK1、CK2 平均覆盖度分别为 87.5%、84.0%、55.7%、50.8%、0.5%,在两个生长季 T1 和 T2 的平均覆盖度均显著高于其他处理。



注:不同小写字母表示同一生长时期不同处理间差异显著($P<0.05$),下同。

Note: Different lowercase letters indicate significant differences different treatments in the same growing period ($P<0.05$), the same below.

图 2　不同作物越冬期和刈割期生物量

Fig.2　Biomass of different crops in the overwintering and cutting period

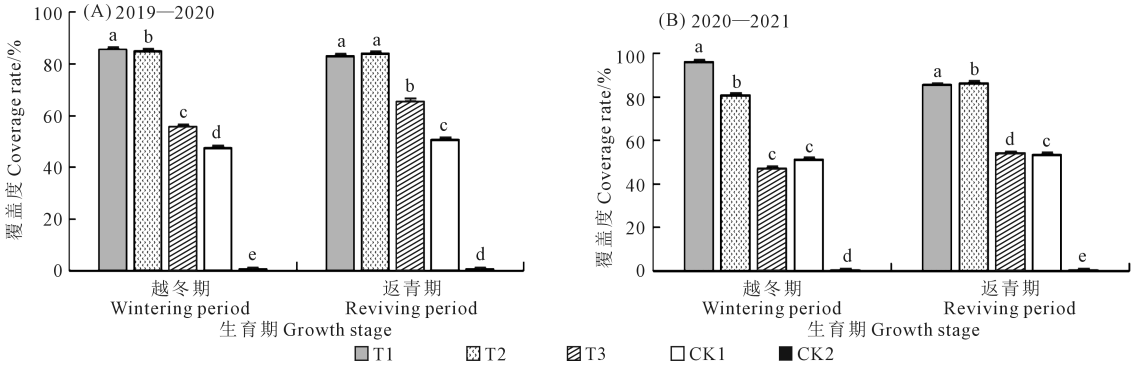
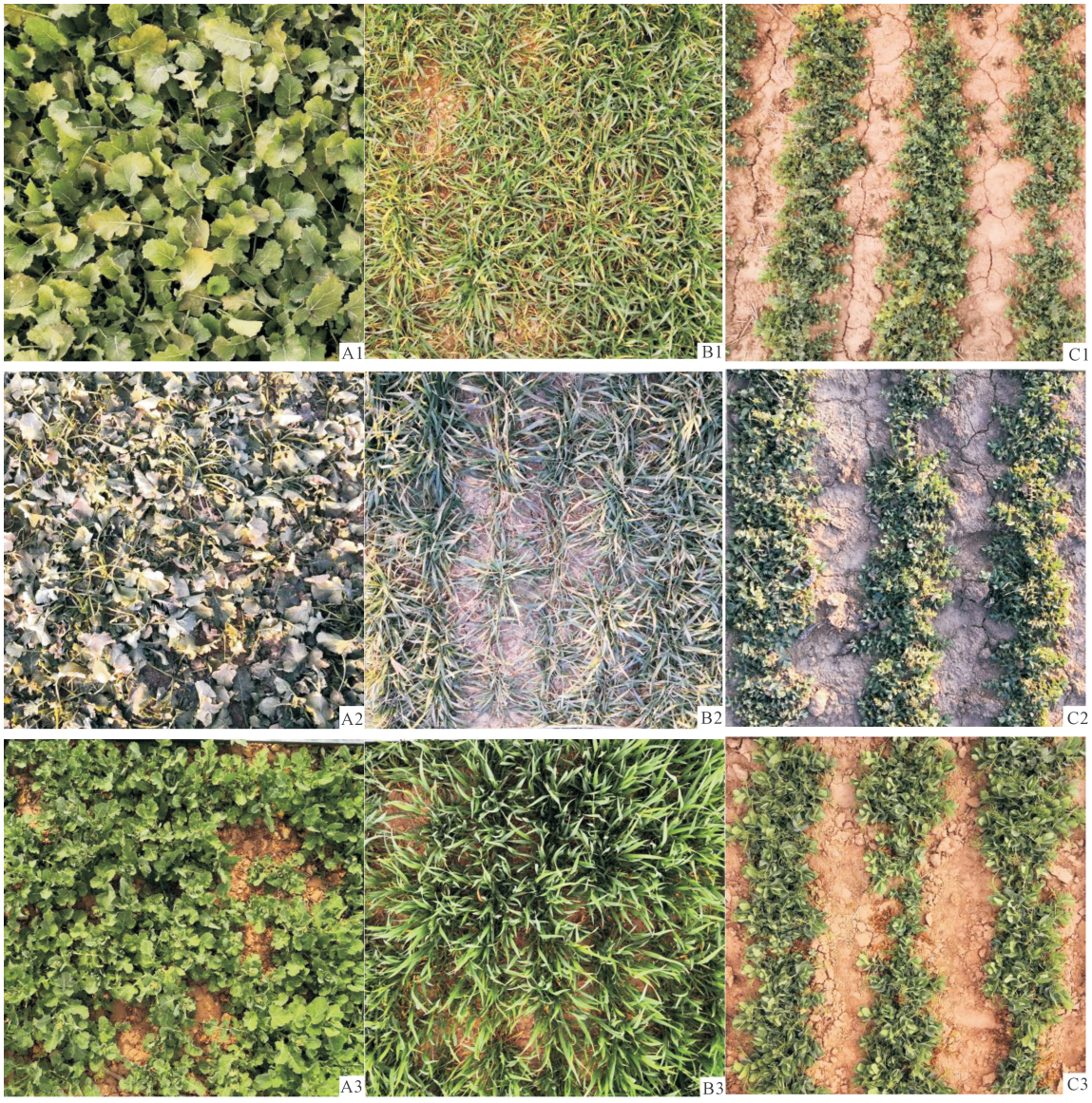


图 3 不同生长季各处理在越冬期和返青期地表覆盖度

Fig.3 Coverage of different treatments in overwintering and reviving period in different growing season



注:A1、B1、C1 分别为封冻初期 T1、T2、T3 的地表覆盖情况;A2、B2、C2 分别为越冬期 T1、T2、T3 的地表覆盖情况;A3、B3、C3 分别为刈割期 T1、T2、T3 的地表覆盖情况。

Note:A1, B1 and C1 were the surface coverage of T1, T2 and T3 at the early freezing stage, A2, B2 and C2 were the surface coverage of T1, T2 and T3 at the overwintering stage, A3, B 3 and C3 were the surface coverage of T1, T2 and T3 at the cutting stage, respectively.

图 4 不同作物封冻初期、越冬期、刈割期地表覆盖情况

Fig.4 Land coverage in the early freezing period, the overwintering period, and the cutting period

2.3　不同处理的耗水量

越冬作物种植对 0~100 cm 土层耗水量具有显著影响(表 2)。2019—2020 年生长季 T1、T2、T3 耗水量分别较 CK1 和 CK2 增加 23.5 mm 和 23.0 mm、69.4 mm 和 68.9 mm、18.5 mm 和 18.0 mm,2020—2021 生长季耗水量分别较 CK1 增加 11.8 mm、36.8 mm 和 11.0 mm,但 T1 和 T3 分别较 CK2 减少耗水量 6.7 mm 和 7.5 mm。T2 耗水量最大,两个生长季平均为 323.6 mm,均与其他处理差异显著;CK1 在两个生长季耗水量均为最低,分别为 277.2 mm 和 263.7 mm,除 2019—2020 年生长季与 CK2 无显著性差异外,均与其他处理形成显著性差异。T1 和 T3 耗水量无显著性差异,但与 CK2 相比较,年季间表现不一致,其中 2019—2020 年生长季 T1 和 T3 耗水量显著高于 CK2 23.0 mm 和 18.0 mm,2020—2021 年生长季 T1 和 T3 耗水量显著低于 CK2。

2.4　土层贮水量变化

不同土层贮水量变化幅度存在显著性差异(表 3)。T1、T2 和 T3 的变化量平均较 CK1 和 CK2 分别增加 65.4% 和 41.8%、155.8% 和 119.2%、36.2% 和 16.8%。两个生长季,T2 在 0~100 cm 土层的土壤贮水量变化最大。通过对各处理 2 a 不同土层平均贮水量的变化分析发现,在 0~20 cm 土层,平均土壤贮水量变化依次是 T2>T1>T3>CK2>CK1,T1、T2 和 T3 显著高于 CK1,平均分别高 7.0、14.7、4.0 mm,CK1 和 CK2 间没有形成显著性差异;20~40 cm 土层,平均土壤贮水量变化依次是 T2>T1>T3>CK2>CK1,2019—2020 年生长季各处理间具有显著性差异,但在 2020—2021 年生长季,T2 与 CK2 间没有显著性差异,T2 和 CK2 显著高于 T1、T3 和 CK1;40~60 cm 土层,2019—2020 年生长季 T2 显著高于其他处理,T1 和 T3 显著高于 CK1 和 CK2,T1 和 T3 变化差异不显著,2020—2021 年生长季 T2 贮水量变化均高于其他处理,T1、T3、CK1 和 CK2 间无显著性差异;60~80 cm 土层,平均土壤贮水变化依次是 T2>T3>CK2>T1>CK1,T1、T2 和 T3 处理显著高于 CK1 2.6、9.4、4.1 mm,2019—2020 生长季 CK1 与 CK2 无显著性差异,2020—2021 年生长季 CK2 显著高于 CK1;80~100 cm 土层,平均土壤贮水量变化依次是 T2>T1>T3>CK2>CK1,T1、T2 和 T3 显著高于 CK1 2.9、10.0、2.8 mm,2019—2020 年生长季 T1、T2 和 T3 显著高于 CK2,2020—2021 年生长季与 CK2 间无显著性差异。

表 2　不同处理 0~100 cm 土层耗水量

Table 2　Water consumption of different treatments in 0~100 cm soil layer

生长季 Growing season	处理 Treatment	降雨量/mm Precipitation (P_1)	土层水分变化量/mm Soil moisture change (ΔSW_1)	耗水量/mm Water consumption amount (ET_1)
2019—2020	T1	253.2	47.5±1.09b	300.7±1.09b
	T2	253.2	93.4±0.36a	346.6±0.36a
	T3	253.2	42.5±6.20b	295.2±6.20b
	CK1	253.2	24.0±0.71c	277.2±0.71c
	CK2	253.2	24.5±0.33c	277.7±0.33c
2020—2021	T1	217.0	58.54±1.15c	275.5±1.15c
	T2	217.0	83.54±0.62a	300.5±0.62a
	T3	217.0	57.72±3.14c	274.7±3.14c
	CK1	217.0	46.74±3.62d	263.7±3.62d
	CK2	217.0	65.19±1.74b	282.2±1.74b

注:同列不同小写字母表示同一生长季处理间差异显著($P<0.05$),下同。

Note: Different lowercase letters in the same column indicate significant differences among treatments in the same growing season ($P<0.05$), similarly for the following tables.

2.5　越冬作物土壤耗水量与地表覆盖度及地上生物量关联度分析

通过对不同处理的生物量、覆盖度和耗水量进行相关分析和通径分析(表 4),T1 和 T2 耗水量与生物量显著正相关,相关系数分别为 0.923 和0.966,耗水量与地表覆盖度相关不显著,但 T1 的地表覆盖度与耗水量间具有负相关趋势。由耗水量与上述指标的直接通径系数可以看出,T1 和 T2 生物量对总耗水量的影响大于覆盖度,而 T3 的覆盖度影响大于生物量。由耗水量与上述指标的间接通径系数可以看出,T1 的生物量和覆盖度均能相互影响,间接减小水分消耗;T2 的生物量和覆盖度均能相互影响,间接增加水分消耗;T3 生物量增加,影响覆盖度增大,间接增加水分消耗,但地表覆盖度的增加能够间接减小水分消耗。

表 3　不同处理 0~100 cm 土层土壤贮水量变化

Table 3　Changes of soil water storage in 0~100 cm soil layer under different treatments

生长季 Growing season	处理 Treatment	ΔSW_1/mm				
		0~20	20~40	40~60	60~80	80~100
2019—2020	T1	11.1±1.15b	14.3±1.06b	10.3±0.50b	7.7±0.95bc	4.3±0.04b
	T2	20.8±0.37a	21.4±0.16a	18.3±0.28a	15.5±0.37a	17.4±0.15a
	T3	6.6±2.15c	10.6±0.59c	11.0±1.57b	9.2±1.26b	5.0±0.43b
	CK1	0.8±0.03d	7.4±0.24d	7.0±0.21c	5.7±0.17d	3.1±0.10c
	CK2	1.3±0.12d	6.1±0.20e	8.1±0.34c	6.8±0.35cd	2.3 ±0.12c
2020—2021	T1	17.0±0.88b	9.2±0.84b	8.8±1.54bc	11.4±0.61c	12.2±1.66a
	T2	22.8±0.71a	14.8±0.88a	15.5±0.71a	17.2±0.73a	13.2±0.40a
	T3	15.5±0.29bc	9.8±1.01b	8.3±0.63c	12.9±0.89bc	11.2±1.10a
	CK1	13.4±1.15d	9.5±1.70b	8.1±2.05c	8.2±0.80d	7.5±1.34b
	CK2	14.9±0.53cd	14.0±1.21a	11.6±1.14c	13.3±1.11b	11.2±0.70a

表 4 越冬作物耗水量与生物量和覆盖度的相关系数和通径分析

Table 4 Correlation coefficient and path coefficient of water consumption, total biomass and coverage of different overwintering crops

处理 Treatment	通径 Path $X_i \rightarrow Y_i$	相关系数 Correlation coefficient	直接通径系数 Direct path coefficient	间接通径系数 Indirect path coefficient	
				X_1	X_2
T1	$X_1 \rightarrow Y_1$	0.923**	0.938	−0.015	
	$X_2 \rightarrow Y_1$	−0.503	0.270	−0.773	
T2	$X_1 \rightarrow Y_2$	0.966**	0.951		0.015
	$X_2 \rightarrow Y_2$	0.246	0.114	0.132	
T3	$X_1 \rightarrow Y_3$	0.254	−0.105		0.359
	$X_2 \rightarrow Y_3$	0.390	0.470		−0.080

注：**表示在 $P<0.01$ 水平上显著相关；X_1 和 X_2 分别表示总生物量和平均覆盖度，Y_1、Y_2、Y_3 分别表示 T1、T2、T3 的平均耗水量。

Note: ** indicate significant correlation at $P<0.01$ level. X_1 and X_2 indicate total biomass and coverage, and Y_1、Y_2、Y_3 indicate the average water consumption of T1, T2, T3, respectively.

2.6 大豆产量及水分利用效率

不同处理对后茬大豆产量及水分利用效率具有显著影响(表 5)，且年季间存在差异。2020 年，CK1 的单株荚数、单株粒数、单株粒重均显著高于其他处理，分别为 35.8 个荚、101.6 粒、25.7g，T2 的单株荚数、单株粒数、单株粒重、百粒重均显著高于 T1、T3 和 CK2，T1 和 CK2 的单株荚数、单株粒数无显著性差异，CK1 的籽粒产量最高，为 4 232.4 kg·hm^{-2}，T2 的籽粒产量显著高于 CK2，增产 15.6%。2021 年，T2 的单株荚数、单株粒数、单株粒重均显著高于 CK2，但其单株荚数和单株粒重与 CK1 无显著性差异，各处理百粒重差异性不显著，T2、T3 和 CK1 的籽粒产量均显著高于 CK2，3 个处理之间无显著性差异，T1 的籽粒产量最低，为 1 781.0 kg·hm^{-1}。大豆的水分利用效率在年季间表现不一致，2020 年 T2 和 CK1 的水分利用效率最高，分别为 9.1 kg·hm^{-2}·mm^{-1} 和 9.4 kg·hm^{-2}·mm^{-1}，显著高于其他处理，T1 和 CK2 之间无显著性差异，但均显著高于 T3；2021 年 T2、T3 和 CK1 之间无显著性差异，但均显著高于 T1 和 CK2，T1 的水分利用效率最低，为 5.6 kg·hm^{-2}·mm^{-1}。

表 5 大豆产量相关指标及其水分利用效率

Table 5 Yield index and water use efficiency of soybean

年份 Year	处理 Treatment	单株荚数 Pods number per plant	单株粒数 Grain number per plant	单株粒重 Grain weight per plant	百粒重 100-grain weight/g	籽粒产量 Grain yield /(kg·hm^{-2})	水分利用效率 Water use efficiency (kg·hm^{-2}·mm^{-1})
2020	T1	22.8±0.42c	64.9±0.55c	16.0±0.25d	24.5±0.20c	2635.3±37.18d	6.1±0.07b
	T2	30.0±0.46b	84.1±0.59b	22.0±0.70b	25.6±0.27b	3632.4±32.38b	9.1±0.10a
	T3	19.1±0.41d	52.7±0.93d	13.0±0.44e	24.5±0.52c	2150.9±24.24e	4.7±0.08c
	CK1	35.8±0.64a	101.6±2.03a	25.7±0.31a	26.3±0.13ab	4232.4±71.72a	9.4±0.28a
	CK2	24.6±0.37c	64.6±2.33c	18.5±0.08c	27.1±0.16a	3140.9±64.90c	6.5±0.14b
2021	T1	19.4±0.48b	34.2±0.30d	9.1±0.15c	29.1±0.17a	1781.0±22.24c	5.6±0.03b
	T2	23.5±0.39a	45.9±0.53a	13.1±0.35a	30.2±0.53a	2583.3±92.40a	7.4±0.60a
	T3	20.7±1.08b	42.1±1.11b	13.2±0.42a	29.7±0.44a	2550.4±71.56a	7.7±0.26a
	CK1	25.3±0.49a	41.3±0.63b	13.2±0.40a	29.0±1.11a	2677.8±78.12a	7.8±0.41a
	CK2	20.4±0.30b	37.1±0.13c	10.3±0.49b	30.4±0.42a	2155.8±29.75b	6.5±0.10b

3 讨 论

3.1 越冬作物与土壤水分

冬闲期作物覆盖可以借助作物发达的根系抑制土壤内部水分向外蒸发，其地表覆盖物也减少了地表与空气对流的水分流失，能够降低土壤耗水量，提高土壤含水量[21]。但在本研究中，T1、T2 和 T3 在两个生长季与 CK1 相比较均不同程度地增加了 0~100 cm 各土层耗水量，且贮水变化主要发生在 0~40cm 土层，说明冬季作物覆盖与地膜覆盖相比较，其保水效果不及地膜覆盖；与 CK2 相比较受年份降雨量不同而有差异，2019—2020 年生长季苗期到返青期降雨量相对充沛，T1、T2 和 T3 耗水量均高于 CK2，且各土层均有不同程度增加，2020—2021 生长季表现为受旱，CK2 耗水量明显增加，其中 20~40 cm 土层贮水变化最为明显，总耗水量较 T1 和 T3 分别高 6.7 mm 和 7.5 mm，说明 T2 与 CK2 相比较均增加了土壤耗水量，但 T1 和 T3 在冬旱年份能够减少土层水分消耗，增加土壤贮水量，具有一定的保水能力，此结果与李尚中[13]关于夏休闲深翻绿盖的研究结果相同。T2 在试验年份的耗水量均为最高，说明其生长对土壤水分消耗量较高，没有起到保水作用，且贮水变化主要发生在 40~80 cm 土层，可能原因有两个：一是可能与作物苗期根系生长特性及

分布有关[22],不同作物根系生长速度及其在土壤中的分布存在差异,导致土层贮水量变化差异较大,二是可能与冬季土壤冻结和解冻过程有关[23],试验区冬季冻土层厚度约在 50~80 cm,土壤受冻结引发能量交换,由于放热和吸热变化,引发土壤水发生移动,致使土壤含水量变化较为显著。

冬季作物覆盖与传统地膜覆盖及露地相比较,水分消耗除了蒸发因素外,还增加了植物蒸腾因子,所以其耗水量与作物的生物量有密切关系,同时又增加了地表覆盖度,能够明显抑制土壤水分蒸发[24]。冬季作物覆盖的保水效应主要是通过 3 个方面实现的:一是作物发达的根系抑制土壤内部水分向外蒸发,二是其有效增加农田地表覆盖度,降低水分蒸发消耗,三是覆盖作物通过减少地表径流量,提高土壤对降雨的吸纳能力,进而达到保水的效果。王学芳等[25]研究发现,冬油菜种植能够有效增加农田地表覆盖度、降低贴地层风速,减小风蚀模数,使土壤含水量达 11.8%,并高于冬小麦的保水效果,刘晓冰等[26]发现覆盖作物可明显减少径流量,幅度达 3.4%~71.7%,其效果取决于试验地点、覆盖度和种植体系等因素,吴珊珊、申胜龙等[27-28]研究发现覆盖量和覆盖度是对农田环境影响的重要因素。本研究通过越冬作物的总耗水量与生物量和地表覆盖度的通径分析发现,T1 和 T2 的生物量与耗水量之间存在显著正相关关系,但 T1 生物量增大能够通过地表覆盖度间接减小耗水量,这可能与地上种植体系及越冬作物自身生长特点有关,T1 和 T2 在返青后生长特性不同,T2 进入拔节期后,垂直生长较快,虽然生物量增加,但叶片细长、叶面积相对较小,且下部叶片坏死变干,其覆盖实际为空间覆盖,有效覆盖度低,其覆盖带来的保水效应较小,导致水分消耗增加,而 T1 苗期生长缓慢,叶片相对较大,且多为贴地有效覆盖,能够减小水分消耗,所以适合的越冬作物才具有较好的土壤保水效应;T1、T2 和 T3 覆盖度与土壤耗水量相关性不显著,但 T1 具有负相关的趋势,说明 T1 可以通过地表覆盖度调控方法来提高保水能力,达到保水效果,但在生物量和地表覆盖度结合方面还需要进一步研究。

3.2　越冬作物与后茬大豆产量

干旱对大豆产量构成较大影响[29]。在本研究中,除 T3 外,2020 年大豆籽粒产量均高于 2021 年,这可能与大豆生育期内降雨量不同有关,2020 年,大豆初花期到鼓粒期降雨量为 432.0 mm,能够满足大豆开花、结荚等对水分的需求,但 2021 年,降雨量仅为 226.0 mm,限制了大豆的花荚形成,导致单株荚数、单株粒数、单株粒重均偏低,进而影响大豆产量,说明降雨量是影响后茬大豆的主要因素。两个生长季,T2 籽粒产量均显著高于 CK2,且 2021 年与 CK1 无显著性差异,说明 T2 茬口对大豆生产具有较好的稳产性,是大豆种植的优势茬口,这个结果与马子竣等[30]关于大豆茬口研究的结果一致。

越冬作物的耗水量越高,导致大豆播前土壤水分消耗越大,大豆籽粒产量就越低(除 T2 外),说明越冬季覆盖植物的耗水量差异也是影响后茬作物产量的关键因素,这个结论与李富翠[31]关于后茬冬小麦的研究有差异,这可能与不同后茬作物有关,还需要进一步研究证实。T3 籽粒产量在生长季间变化幅度较大,2020 年产量水平为 2 150.9 kg · hm^{-2},低于 CK2,但 2021 年为 2 550.4 kg · hm^{-2},且显著高于 T1 和 CK2,发生以上现象可能有两个原因,一是在干旱年份,T3 的保水效应促进了大豆产量形成,二是 T3 与大豆均属于豆科作物,在雨水较为充沛的生长季具有连作效应,而干旱能够影响土壤生理菌群的数量和特征[32],减轻连作障碍,具体原因还需要进一步研究证实。

3.3　越冬作物与后茬大豆水分利用效率

由于越冬作物土壤耗水量不同,导致后茬大豆播前土壤水分出现差异,直接影响大豆水分利用效率。本研究中选用的 3 种覆盖作物,T2 的土壤耗水量显著高于 T1 和 T3,后茬大豆的水分利用效率同样以 T2 最高,说明前茬覆盖作物的耗水量越高,播前土壤贮水量越低,后茬大豆的水分利用效率就越高,大豆的水分利用效率与前茬作物耗水量正相关,与播前土壤贮水量负相关,这个结论与侯贤清等[33]关于夏闲期传统耕作模式贮水量最高,其对应的水分利用效率最低,及晋小军等[34]关于免耕秸秆覆盖较传统耕作秸秆覆盖土壤贮水量少,但水分利用效率较高等结果相一致。但是 CK1 和 T2 的水分利用效率在两个年季间无显著性差异,其主要原因可能与地膜对土壤的温度效应有关。

4　结　论

1)越冬作物能够有效增加冬季地表覆盖度,越冬期以冬油菜覆盖效果最好,覆盖度为 90.8%;早春时节以冬小麦覆盖效果最好,覆盖率为 85.2%。

2)越冬作物对土壤水分的影响主要在0~40 cm土层,且0~100 cm土层耗水量受降雨量影响较大。在冬/春季雨水相对充沛年份,冬季作物种植与地膜覆盖和露地相比较,均不同程度地增加了土壤耗水量,其中冬小麦对土壤水分的消耗最高;在冬/春季干旱年份,冬油菜和冬豌豆能够限制土壤水分消耗,具有较好的保水效果。

3)冬油菜和冬小麦的生物量与总耗水量之间呈显著正相关,覆盖度与总耗水量相关性不显著,冬油菜地表覆盖度增加具有降低土壤耗水量的趋势。

4)冬小麦是大豆种植的优势茬口,能够确保大豆生产的稳产性;冬豌豆在相对干旱年份对后茬大豆具有较好的增产效应。

参 考 文 献:

[1] 程宏波,牛建彪,柴守玺,等.不同覆盖材料和方式对旱地春小麦产量及土壤水温环境的影响[J].草业学报,2016,25(2):47-57.
CHENG H B, NIU J B, CHAI S X, et al. Effect of different mulching materials and methods on soil moisture and temperature and grain yield of dryland spring wheat in northwestern China[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2016, 25(2): 47-57.

[2] 李茂松,李森,李育慧.中国近50年旱灾灾情分析[J].中国农业气象,2003,24(1):7-10.
LI M S, LI S, LI Y H. Studies on drought in the past 50 years in China[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2003, 24(1): 7-10.

[3] 张强,姚玉璧,李耀辉,等.中国干旱事件成因和变化规律的研究进展与展望[J].气象学报,2020,78(3):500-521.
ZHANG Q, YAO Y B, LI Y H, et al. Progress and prospect on the study of causes and variation regularity of droughts in China[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2020, 78(3): 500-521.

[4] 孙荣强.干旱定义及其指标评述[J].灾害学,1994,(1):17-21.
SUN R Q. Definitions of drought and reviews on its index[J]. Journal of Catastrophology, 1994,(1): 17-21.

[5] 曹晋军,刘永忠,李万星,等.不同覆盖方式对土壤水热状况和玉米水分利用效率的影响[J].中国农学通报,2013,29(33):107-111.
CAO J J, LIU Y Z, LI W X, et al. Effect of different mulching treatments on soil water content and temperature and water use efficiency of maize[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2013, 29(33): 107-111.

[6] HUANG Y L, CHEN L D, FU B J, et al. The wheat yields and water-use efficiency in the Loess Plateau: straw mulch and irrigation effects [J]. Agricultural Water Management, 2005, 72(3): 209-222.

[7] SU Z Y, ZHANG J S, WU W L, et al. Effects of conservation tillage practices on winter wheat water-use efficiency and crop yield on the Loess Plateau, China[J]. Agricultural Water Management, 2007, 87(3): 307-314.

[8] IBRAHIM A, ABAIDOO R C, FATONDJI D, et al. Integrated use of fertilizer micro-dosing and Acacia tumida mulching increases millet yield and water use efficiency in Sahelian semi-arid environment[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2015, 103(3): 375-388.

[9] ZHANG D K, WANG Q, ZHOU X J, et al. Suitable furrow mulching material for maize and sorghum production with ridge-furrow rainwater harvesting in semiarid regions of China[J]. Agricultural Water Management, 2020, 228: 105928.

[10] THIDAR M, GONG D Z, MEI X R, et al. Mulching improved soil water, root distribution and yield of maize in the Loess Plateau of Northwest China[J]. Agricultural Water Management, 2020, 241: 106340.

[11] 曹文.绿肥生产与可持续农业发展[J].中国人口·资源与环境,2000,(S2):108-109.
CAO W. Sustained agriculture and production of green manure[J]. China Population, Resources and Environment, 2000, (S2): 108-109.

[12] 李琳,石颜通,杨林,等.北京冬春覆盖作物对农田土壤风蚀扬尘的影响[J].天津农业科学,2021,27(1):83-86.
LI L, SHI Y T, YANG L, et al. Effect of winter and spring cover crops on soil wind erosion and dust emission in farmlands of Beijing [J]. Tianjin Agricultural Sciences, 2021, 27(1): 83-86.

[13] 李尚中,樊廷录,赵刚,等.旱地玉米不同覆盖栽培模式的土壤水热特征及产量品质效应[J].草业学报,2018,27(4):34-44.
LI S Z, FAN T L, ZHAO G, et al. Effects of different cultivation patterns on soil moisture, temperature, yield and quality of dryland maize[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2018, 27(4): 34-44.

[14] 赵秋,高贤彪,宁晓光,等.华北地区几种冬闲覆盖作物碳氮蓄积及其对土壤理化性质的影响[J].生态环境学报,2011,20(4):750-753.
ZHAO Q, GAO X B, NING X G, et al. Carbon-nitrogen fixation and effects on the physical and chemical properties in winter cover crop in North China[J]. Ecology and Environment, 2011, 20(4): 750-753.

[15] 杨曾平,高菊生,郑圣先,等.长期冬种绿肥对红壤性水稻土微生物特性及酶活性的影响[J].土壤,2011,43(4):576-583.
YANG Z P, GAO J S, ZHENG S X, et al. Effects of long-term winter planting-green manure on microbial properties and enzyme activities in reddish paddy soil[J]. Soils, 2011, 43(4): 576-583.

[16] 陈玉章,柴守玺,程宏波,等.秸秆还田结合秋覆膜对旱地冬小麦耗水特性和产量的影响[J].作物学报,2019,45(2):256-266.
CHEN Y Z, CHAI S X, CHENG H B, et al. Effects of straw-incorporation combined with autumn plastic mulching on soil water consumption characteristics and winter wheat yield in arid farming areas [J]. Acta Agronomica Sinica, 2019, 45(2): 256-266.

[17] 张超,吴杨,黄方园,等.半干旱区不同秋覆膜方式对土壤水分及春玉米光合特性的影响[J].干旱地区农业研究,2017,35(2):39-45.
ZHANG C, WU Y, HUANG F Y, et al. Effects of different patterns of plastic film mulching in autumn on soil moisture and photosynthetic characteristics of spring maize in the semi-arid regions [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2017, 35(2): 39-45.

[18] 解红娥,李永山,杨淑巧,等.农田残膜对土壤环境及作物生长发育的影响研究[J].农业环境科学学报,2007,26(z1):153-156.

JIE H E, LI Y S, YANG S Q, et al. Influence of residual plastic film on soil structure, crop growth and development in fields[J]. Journal of Agro-environment Science, 2007, 26(z1): 153-156.

[19] 董合干,刘彤,李勇冠,等.新疆棉田地膜残留对棉花产量及土壤理化性质的影响[J].农业工程学报,2013,29(8):91-99.

DONG H G, LIU T, LI Y G, et al. Effects of plastic film residue on cotton yield and soil physical and chemical properties in Xinjiang [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, 29(8): 91-99.

[20] 随金明,宋乃平,薛毅,等.基于照相法的荒漠草原植被覆盖度测定方法[J].中国草地学报,2019,41(2):58-64.

SUI J M, SONG N P, XUE Y, et al. The method of extracting vegetation coverage in the desert steppe based on photographic[J]. Chinese Journal of Grassland, 2019, 41(2): 58-64.

[21] 辜松,小松崎将一,森泉昭治,等.覆盖作物与耕作法对土壤性质的影响[J].农业机械学报,2005,36(7):37-40.

GU S, XIAO S Q J Y, SEN Q Z Z, et al. Influence of cover crops and tillage treatment on soil properties[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2005, 36(7): 37-40.

[22] 何娜娜.黄土丘陵区三种覆盖作物根系吸水规律及其影响因素研究[D].咸阳:西北农林科技大学,2021.

HE N N. Study on the law of root water uptake and influencing factors of three cover crops in the loess hilly region[D]. Xianyang: Northwest A&F University, 2021.

[23] 习阿幸,刘志辉,卢文君.干旱区季节性冻土冻融状况及对融雪径流的影响[J].水土保持研究,2016,23(2):333-339.

XI A X, LIU Z H, LU W J. Processes of seasonal frozen soil freezing-thawing and impact on snowmelt runoff in arid area[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2016, 23(2): 333-339.

[24] 方文松,朱自玺,刘荣花,等.秸秆覆盖农田的小气候特征和增产机理研究[J].干旱地区农业研究,2009,27(6):123-128.

FANG W S, ZHU Z X, LIU R H, et al. Study on microclimate characters and yield-increasing mechanism in straw mulching field[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2009, 27(6): 123-128.

[25] 王学芳,孙万仓,李孝泽,等.河西走廊种植冬油菜的环境效应[J].作物学报,2008,34(12):2210-2217.

WANG X F, SUN W C, LI X Z, et al. Effects of environment on winter rapeseed in Hexi corridor[J]. Acta Agronomica Sinica, 2008, 34(12): 2210-2217.

[26] 刘晓冰,宋春雨,STEPHEN J H,等.覆盖作物的生态效应[J].应用生态学报,2002,13(3):365-368.

LIU X B, SONG C Y, STEPHEN J H, et al. Ecological effects of cover crops[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2002, 13(3): 365-368.

[27] 吴姗姗,牛健植,蔺星娜.京郊延庆农田保护性耕作措施对土壤风蚀的影响[J].中国水土保持科学,2020,18(1):57-67.

WU S S, NIU J Z, LIN X N. Effects of conservation tillage measures on soil wind erosion in Yanqing, the suburb of Beijing[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2020, 18(1): 57-67.

[28] 申胜龙,李援农,银敏华,等.秸秆量对垄沟二元覆盖夏玉米农田耗水及产量的影响[J].干旱地区农业研究,2018,36(4):60-66.

SHEN S L, LI Y N, YIN M H, et al. Effects of straw mulching rates on water consumption and yield of summer maize under dual-mulching of ridge and furrow[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2018, 36(4): 60-66.

[29] 王明瑶.不同程度控水对大豆生长和产量品质的影响[D].大庆:黑龙江八一农垦大学,2021.

WANG M Y. Effects of different water management on growth, yield and quality of soybean[D]. Daqing: Heilongjiang Bayi Agricultural University, 2021.

[30] 马子竣,孙继英,汝甲荣,等.不同茬口对大豆生长及产量的影响[J].黑龙江农业科学,2020,(4):7-10.

MA Z J, SUN J Y, RU J R, et al. Effects of different stubbles on growth and yield of soybean[J]. Heilongjiang Agricultural Sciences, 2020,(4): 7-10.

[31] 李富翠.渭北旱地夏闲期秸秆还田和种植绿肥对土壤水分养分和冬小麦生长的影响[D].咸阳:西北农林科技大学,2011.

LI F C. Effects of straw returning and planting green manure during summer fallow on Soil water, nutrient and winter wheat growth on dryland of weibei plain[D]. Xianyang: Northwest A&F University, 2011.

[32] 张雷.不同给水和施肥条件对土壤微生物多样性的影响[D].哈尔滨:东北林业大学,2009.

ZHANG L. Effect of water and fertilization coupling on soil microbial diversity in black soils[D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2009.

[33] 侯贤清,韩清芳,贾志宽,等.半干旱区夏闲期不同耕作方式对土壤水分及小麦水分利用效率的影响[J].干旱地区农业研究,2009,27(5):52-58.

HOU X Q, HAN Q F, JIA Z K, et al. Effects of different tillage practices in summer fallow period on soil water and crop water use efficiency in semi-arid areas[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2009, 27(5): 52-58.

[34] 晋小军,黄高宝.陇中半干旱地区不同耕作措施对土壤水分及利用效率的影响[J].水土保持学报,2005,19(5):109-112.

JIN X J, HUANG G B. Effects of different tillage methods on soil water and water use efficiency in semi-arid area of Gansu[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2005, 19(5): 109-112.