麦类作物学报 2026,46(9):1205－1218
Journal of Triticeae Crops doi: 10.7606/j.issn.1009-1041.2026.09.09

网络出版时间:2026-09-04
网络出版地址:https://link.cnki.net/urlid/61.1359.S.20260904.1139.006

覆盖方式对旱地春小麦土壤水温及生长发育的影响

秦 旋[1],王文杰[1],程宏波[1],余海中[1],王宇昕[1],汪俊宏[1],常 磊[2],柴雨葳[2]
(1.甘肃农业大学生命科学技术学院,甘肃兰州 730070;2.甘肃农业大学农学院,甘肃兰州 730070)

摘 要:为探究不同覆盖方式在不同降水年型下对西北旱地春小麦土壤水热及干物质积累的影响,以春小麦品种西旱3号为材料,设置秸秆带状覆盖(SSM)、地膜全覆盖(PMS)和露地平作(CK)3个处理,研究了不同处理下春小麦土壤水热及生长发育的动态变化过程。结果表明,与CK相比,PMS和SSM处理显著增加了春小麦全生育期土壤平均含水量,增幅分别为4.54%和6.78%;PMS处理显著增加土壤温度,增幅为5.76%;SSM处理显著降低土壤温度,降幅为10.85%。两种覆盖处理较CK可显著提高春小麦地上部干物质积累量,增幅表现为PMS>SSM,且枯水年份花前干物质向籽粒的转运率显著提高,平均增产11.81%～19.36%,穗数增加是主要增产因素。依据相关分析结果,平水年份土壤水分对前期干物质积累和群体形成的促进作用更为突出,而枯水年份群体干物质积累过程与产量形成之间的相关性显著增强。综上所述,覆盖可显著提高旱地春小麦土壤水的含量、干物质积累量和籽粒产量,其中秸秆带状覆盖在维持较高籽粒干物质分配比例、促进籽粒干物质积累方面表现稳定,且无地膜污染风险,是一种适宜西北旱区推广的绿色高效栽培技术。

关键词:春小麦;秸秆带状覆盖;地膜覆盖;干物质积累;产量
中图分类号:S512.1; S311 **文献标识码**:A **文章编号**:1009-1041(2026)09-1205-14

Effects of Mulching Methods on Soil Water Temperature and Growth of Spring Wheat in Dryland

Qin Xuan[1], Wang Wenjie[1], Cheng Hongbo[1], Yu Haizhong[1], Wang Yuxin[1], Wang Junhong[1], Chang Lei[2], Chai Yuwei[2]
(1. College of Life Science and Technology, Gansu Agricultural University, Lanzhou, Gansu 730070, China;
2. College of Agronomy, Gansu Agricultural University, Lanzhou, Gansu 730070, China)

Abstract: In order to explore the effects of different mulching methods on soil water and thermo-conditions, and dry matter accumulation of spring wheat in dryland of northwest China under different precipitation years, the dynamic changes of soil water and thermo-conditions, and growth and development of spring wheat under different treatments were studied using the spring wheat variety Xihan 3 as the material, and three treatments were set up, including straw strip mulching(SSM), plastic film mulching(PMS) and open field flat planting(CK). The results showed that compared with CK, PMS and SSM treatments significantly increased the average soil water content during the whole growth period of spring wheat, with an average increase of 4.54% and 6.78%, respectively. PMS treatment significantly increased soil temperature by 5.76%. SSM treatment significantly reduced soil temperature by 10.85%. Mulching treatment significantly increased the aboveground dry matter accumulation of spring wheat, and the increase rate ranked as PMS>SSM, while the translocation rate of dry matter to grain before anthesis in dry year was significantly increased, which was 11.81%－19.36%

收稿日期:2026-01-25 修回日期:2026-04-01
基金项目:国家重点研发计划项目(2024YFD2300204);国家小麦产业体系专项(CARS-03-86);甘肃省现代寒旱特色农业种业攻关和科技支撑项目(KJZC-2026-25);甘肃省现代寒旱特色农业麦类产业技术体系专项(GSARS07)
第一作者 E-mail:qinxuan1118@126.com(秦 旋)
通讯作者 E-mail:chenghbdd@126.com(程宏波)

higher than that of CK; the increase of spike number was the main factor of yield increase. Correlation analysis showed that soil moisture had a more prominent role in promoting early dry matter accumulation and population formation in the normal water year, while the correlation between population dry matter accumulation process and yield formation was significantly enhanced in the dry year. Mulching can significantly improve the soil water and thermo-status, dry matter accumulation and grain yield of spring wheat in dryland. Among them, straw strip mulching is stable in maintaining a high proportion of grain dry matter distribution and promoting grain dry matter accumulation, without any risk of plastic film pollution. It is a green and efficient cultivation technology suitable for promotion in arid areas of northwest China.

Keywords: Spring wheat; Straw strip mulching; Plastic film mulching; Dry matter accumulation; Yield

西北旱作雨养农业区是中国重要的粮食主产区之一[1-2]，水资源严重匮乏、年内降水分布不均且年际间气候差异较大等因素严重制约了该区域作物的稳产高产[3-4]。小麦为该区域的主要粮食作物，其产量的形成高度依赖自然降水，干旱频发是限制该区域小麦产业可持续发展的关键因素[5]。降水不足可导致小麦干物质积累量、生育后期叶片的光合能力、同化物向穗部的转运量均降低，最终导致产量显著下降[6-7]。研究和采用能够调控田间水分的栽培措施是实现旱地农业增产稳产的重要途径。

土壤水分与温度是影响旱地春小麦生长发育的关键环境因子[8-9]。覆盖能够有效改善土壤水热环境，创造良好的作物根区生长条件，进而提高干物质积累量，最终实现产量提升[10-12]。研究发现，在传统耕作条件下，地膜覆盖和秸秆覆盖的土壤含水量均高于无覆盖[13-14]；秸秆覆盖能有效提高0～60 cm 土层土壤含水量，降低土壤水分蒸发量[15]。不同覆盖方式对小麦不同生育时期土壤温度的影响存在显著差异[16]。与传统露地平作相比，地膜覆盖使高粱全生育期 5～20 cm 土层地温增加 0.9 ℃，秸秆带状覆盖则使地温下降 1.3 ℃[17]。白丽婷等[18]研究认为，地膜覆盖能够显著促进冬小麦干物质积累，增加成穗数和穗粒数，并最终提高产量。Dong 等[19]研究结果显示，秸秆覆盖显著增加小麦干物质积累量及其向籽粒的转运与分配量，使小麦增产 10.5%～20.5%。李保成等[20]提出，覆膜处理可提高玉米地上部干物质积累量与穗部干物质分配比例，增加花前、花后干物质对籽粒的贡献率，最终提高产量。高艳梅等[21]研究得出，地膜覆盖可显著提高旱地小麦节水、增产效果。

前人对小麦的覆盖研究均集中于单一年份，对于不同降水年型下覆盖对小麦产量和品质的效应未见报道，尤其秸秆带状覆盖栽培模式在不同年际降水条件下对小麦土壤水、热、干物质积累、分配与转运的影响。基于此，本研究以露地平作为对照，分析两种降水年型下秸秆带状覆盖和地膜全覆盖对旱地春小麦土壤水、热、干物质积累与转运、产量的影响，以期为旱区春小麦栽培模式选择提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验于 2021 年 3 月－2022 年 7 月在甘肃省通渭县平襄镇甘肃农业大学现代旱作循环农业试验示范基地进行(35°11′N，105°19′E)。该地区属于温带大陆性气候，作物一年一熟，农业生产无灌溉条件，为典型旱作雨养农业区；平均海拔 1 750 m，年均气温 7.2 ℃，年日照时数 2 100 ～ 2 430 h，无霜期 120 ～ 170 d，年蒸发量大于 1 500 mm，多年平均降雨量为 390.7 mm(主要集中于 7—9 月份)。试验地土壤类型为黄绵土，0～200 cm 土层的土壤容重为 1.25 g·cm^{-3}，有机质含量 5.52 g·kg^{-1}，全氮含量 0.65 g·kg^{-1}，速效磷含量 10.63 mg·kg^{-1}，速效钾含量 107.1 mg·kg^{-1}，pH 值为 8.5。

试点区域春小麦生育期常年降水量为 239.3 mm。本试验中，2021 年春小麦生育期内总降水量为 220.8 mm，较常年降水量低 7.7%，属平水年；2022 年春小麦生育期内总降水量为 141.4 mm，较常年降水量低 41.0%，属枯水年。小麦生育期大气温度和降水量数据由试验站实地采集，具体如表 1 和图 1 所示。

表 1　2021 和 2022 年春小麦生长季降水量和积温状况

Table 1　Precipitation and accumulated temperature of spring wheat growing season from 2021 and 2022

年份 Year	项目 Item	3 月 March	4 月 April	5 月 May	6 月 June	7 月 July	合计 Total
2021	总降水量 Total precipitation/mm	9.4	56.7	31.2	45.8	77.8	220.8
	≥5 mm 有效降水量 Effective precipitation ≥5 mm/mm	0	49.7	21.4	29.4	69.6	170.1
	≥0 ℃有效积温 Effective accumulated temperature ≥0 ℃/℃	120.5	326.5	500.0	618.0	538.7	2 103.7
2022	总降水量 Total precipitation/mm	4.3	47.3	22.5	20.9	46.4	141.4
	≥5 mm 有效降水量 Effective precipitation ≥5 mm/mm	0.0	40.6	15.4	13.3	44.8	114.1
	≥0 ℃有效积温 Effective accumulated temperature ≥0 ℃/℃	169.8	355.4	527.0	657.8	479.3	2 189.3

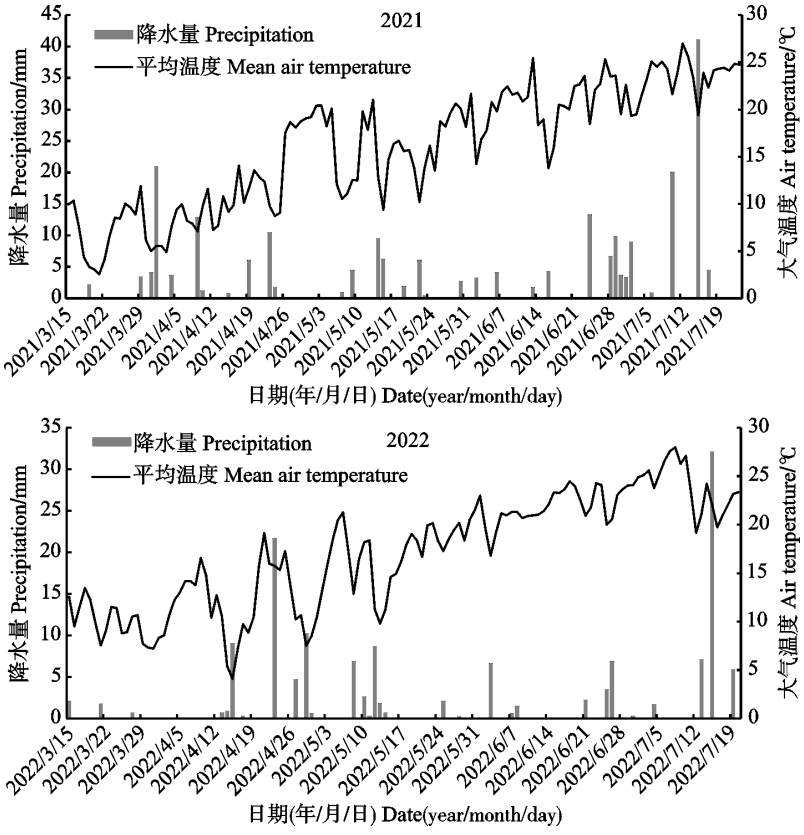


图 1　2021 和 2022 年春小麦全生育期内降水量及大气温度

Fig. 1　Precipitation and air temperature during the whole growth period of spring wheat in 2021 and 2022

1.2　试验设计

供试材料为春小麦品种西旱 3 号。试验采用单因素随机区组设计,设秸秆带状覆盖(SSM)、地膜全覆盖(PMS)和露地平作(CK)3 种栽培模式,3 次重复,小区面积为 180 m^2(30 m×6 m),播量均为 225 kg·hm^{-2}。

露地平作:机械条播,地面无覆盖(图 2a)。

地膜全覆盖:于春小麦播前,采用幅宽 120 cm、厚度 0.01 mm 的高强度地膜进行平作覆膜,膜上覆土 1 cm 以固定地膜,膜上穴播 6 行小麦(图 2b)。

秸秆带状覆盖:地块分为玉米秸秆覆盖带和春小麦种植带两部分,两带总幅宽 120 cm,种植带宽 70 cm,覆盖带宽 50 cm,两带交替布置,覆盖度约为 42%。在春小麦播种前将玉米秸秆整秆放置在预留覆盖带上,覆盖量为风干秸秆 9 000 kg·hm^{-2},种植带内机械条播 5 行(图 2c)。

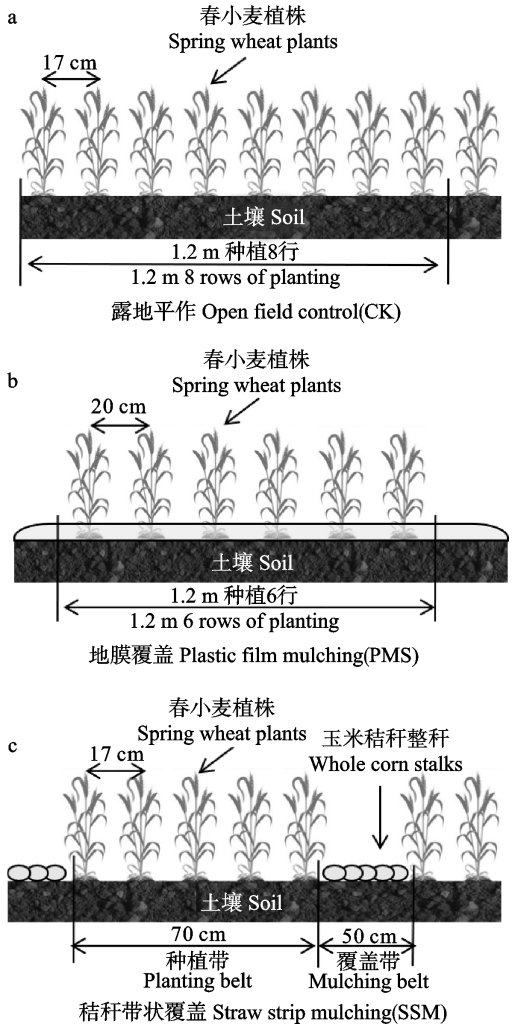


图 2 试验示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the experimental design

试验于 2021 年和 2022 年 3 月 15 日播种，于 2021 年 7 月 23 日和 2022 年 7 月 20 日收获。各小区均施纯氮 120 kg · hm^{-2}、P_2O_5 90 kg · hm^{-2} 做基肥，生育期间不追肥。每年春小麦开花后 7 d 用吡虫啉、三唑酮和磷酸二氢钾进行至少 1 次“一喷三防”，以防后期病虫害、干热风和小麦植株早衰。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 土壤含水量测定

于春小麦播种期、苗期、拔节期、孕穗期、开花期、灌浆期和成熟期，在各小区小麦种植带中间行采用土钻取样，用烘干法测定土壤含水量，采样土层分别为 0～20、20～40、40～60、60～90、90～120、120～150、150～180 和 180～200 cm。秸秆带状覆盖处理分别于种植带和覆盖带取样，并根据种植面积计算其土壤含水量的加权平均值。

1.3.2 土壤温度测定

于春小麦苗期、拔节期、孕穗期、开花期、灌浆期和成熟期，选择晴天于 7:00、14:00 和 19:00 采用曲管地温计分别测定小麦种植带中间行 5、10、15、20 和 25 cm 土层温度。各生育时期均在固定地点测定。土壤温度为 3 个时段测定值的均值。

1.3.3 干物质积累与转运指标测定

于春小麦苗期、拔节期、孕穗期、开花期、灌浆期和成熟期，每小区取代表性植株 20 株，称鲜重后于 105 ℃烘箱中杀青 30 min，于 80 ℃下烘干至恒重，其中在开花期将植株分为茎鞘、穗部、叶片 3 个部分，在成熟期将植株分为茎鞘、穗轴＋颖壳、叶片、籽粒 4 个部分，并按下列公式计算相关指标：

花前干物质转运量＝开花期植株干物质量－成熟期植株营养器官干物质量；

花前干物质转运效率＝花前干物质转运量/开花期植株干物质量×100%；

花前干物质对籽粒贡献率＝花前干物质转运量/成熟期籽粒干重×100%；

花后干物质积累量＝成熟期籽粒干重－花前干物质转运量；

花后干物质对籽粒产量贡献率＝花后干物质积累量/成熟期籽粒干重×100%。

1.3.4 产量及其构成因素测定

成熟期，各小区采用五点法随机取 20 株小麦进行室内考种，测定株高、穗长、穗数、穗粒数、千粒重。按小区收割、脱粒、测产，按 13%含水量计算籽粒产量。

1.4 数据处理

采用 Excel 2019、Origin 2021 整理数据、作图，用 SPSS Statistics 22.0 进行统计分析并通过回归分析拟合 Logistic 方程。采用 LSD 和 Duncan 法进行差异显著性检验，相关分析采用 Pearson 法。

2 结果与分析

2.1 覆盖对春小麦土壤含水量的影响

与 CK 相比，两年覆盖处理下小麦各生育时期土壤含水量均明显增加(图 3)，且整体增加幅度表现为 2022 年＞2021 年，SSM＞PMS，生育后期＞生育前期。具体来看，2021 和 2022 年 PMS 处理小麦各生育时期的土壤含水量较 CK 分别增加 3.5%～8.6%和 1.1%～9.4%，SSM 处理较 CK 分别增加 3.9%～9.7%和 3.2%～18.4%；

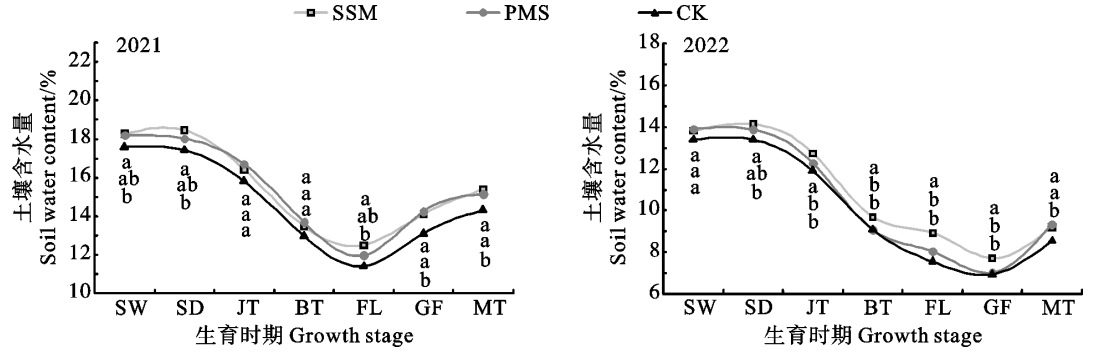
2021 年各生育时期两覆盖处理间均无显著差异，2022 年拔节期－灌浆期，SSM 处理显著高于 PMS。与 CK 比较，PMS 处理在 2021 年土壤含水量以灌浆期增幅最大，在 2022 年以成熟期增幅最大；SSM 处理在两年内均以开花期增幅最大。

由图 4 可知，两年两个覆盖处理 0～200 cm 土壤含水量较 CK 均有不同程度增加，且浅层土(0～60 cm)和中层土(60～150 cm)两年变化趋势基本一致，增幅均较大；深层土(150～200 cm)年际间差异较为明显，其中 2021 年各土壤含水量差异均不显著，而 2022 年 SSM 处理显著高于 CK 和 PMS 处理。2021 和 2022 年 PMS 处理在不同土层的土壤含水量较 CK 分别增加 4.0%～7.5%和 1.7%～4.8%，SSM 处理较 CK 分别增加 5.1%～7.7%和 4.8%～10.4%。2021 年两种覆盖处理的土壤含水量均以 0～60 cm 土层增幅最大；2022 年 PMS 处理在 60～150 cm 土层增幅最大，SSM 处理在 150～200 cm 土层增幅最大。

2.2　覆盖对春小麦耕层土壤温度的影响

覆盖处理对春小麦各生育时期耕层(0～25 cm)土壤温度影响显著(图 5)。与 CK 相比，PMS 处理对春小麦全生育期的土壤温度有显著增加效应，SSM 处理则表现出显著降温效应($P<0.05$)。2021 和 2022 年 PMS 处理在各生育时期的土壤温度较 CK 分别增加 0.6～1.5 ℃和 1.1～1.6 ℃，SSM 处理较 CK 分别降低 1.6～3.2 ℃和 1.3～3.8 ℃。

由图 6 可知，小麦生育期内土壤温度均随土层加深而逐渐降低。与 CK 相比，2021 年和 2022 年 PMS 处理土壤平均温度分别增加 0.9～1.3 ℃



SW:播种期;SD:出苗期;JT:拔节期;BT:孕穗期;FL:开花期;GF:灌浆期;MT:成熟期。图中同一时期不同小写字母代表处理间差异显著($P<0.05$)。下同。

SW: Sowing stage; SD: Seedling stage; JT: Jointing stage; BT: Booting stage; FL: Flowering stage; GF: Grain-filling stage; MT: Maturity stage. Different lowercase letters within the same growth stages indicate significant differences among treatments($P<0.05$). The same in figures 4－9.

图 3　春小麦各生育时期 0～200 cm 土层土壤平均含水量

Fig. 3　Mean soil water content of 0～200 cm soil layers at different growth stages of spring wheat

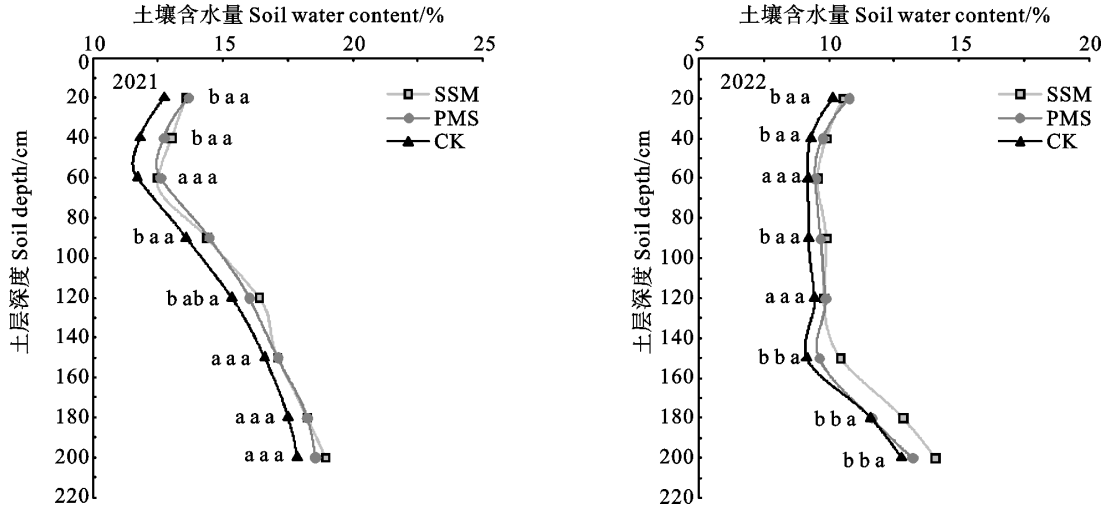


图 4　春小麦全生育期各土层土壤平均含水量

Fig. 4　Mean soil water content of different soil layer during the whole growth period of spring wheat

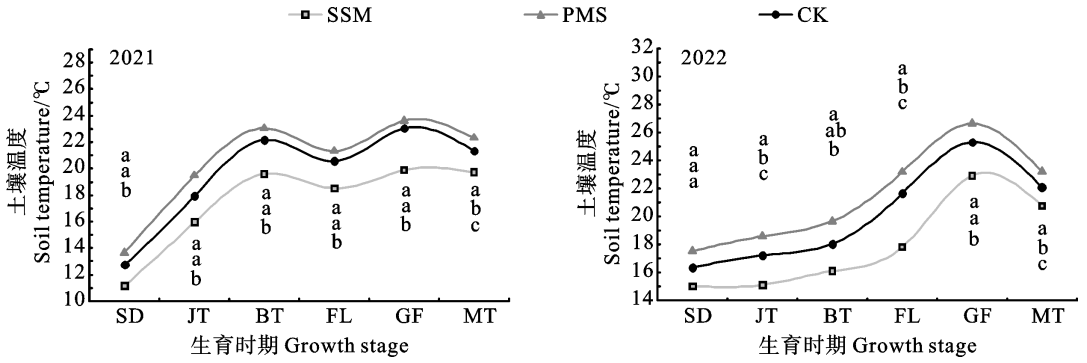


图 5 春小麦各生育时期 0～25 cm 土层土壤平均温度

Fig. 5 Mean soil temperature of 0～25 cm soil layer at different growth stages of spring wheat

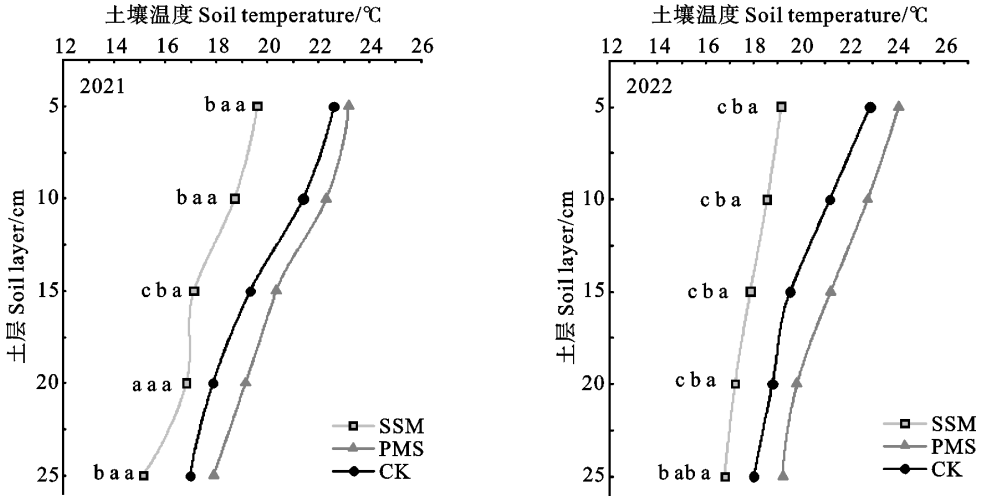


图 6 春小麦全生育期各土层土壤平均温度

Fig. 6 Mean soil temperature of different soil layers during the whole growth period of spring wheat

和 1.0～1.7 ℃，其中 2021 年在 20 cm 土层处增幅最大，2022 年在 15 cm 土层处增幅最大；SSM 处理分别降温 1.0～3.0 ℃和 1.2～3.7 ℃，两年均在 5 cm 土层处降幅最大。

2.3 覆盖对春小麦地上部干物质积累的影响

2.3.1 对开花前后干物质积累量的影响

覆盖处理较 CK 提高了春小麦花前和花后地上部干物质积累量，且提高幅度为 2022 年＞2021 年(图 7)。两年 PMS 和 SSM 处理花前干物质积累量较 CK 均显著增加，2021 年增幅分别为 22.7%和 20.0%，2022 年增幅分别为 35.1%和 27.3%。2021 年花后干物质积累量在不同处理间差异均不显著，2022 年 PMS 和 SSM 处理较 CK 增加 24.9%和 17.0%，差异均显著。

2.3.2 对干物质积累动态的影响

由图 8 可知，两年春小麦生育期内，地上部干物质积累速度均表现为快增期(拔节期－开花期)＞缓增期(开花期－成熟期)＞渐增期(出苗期－拔节期)，干物质积累动态在年际间存在显著差异，且变幅表现为 2022 年＞2021 年。覆盖处理的地上部干物质积累量均高于 CK，且增幅为 PMS＞SSM。与 CK 相比，PMS 处理两年干物质积累量均以渐增期增幅最大，分别为 71.8%和 76.1%；SSM 处理在 2021 年以快增期增幅最大(22.8%)，在 2022 年以渐增期增幅最大(65.6%)。

小麦干物质积累动态可以用 Logistic 回归方程进行拟合(R^2＝0.993～0.997)(表 2)。2021 和 2022 年 PMS 处理干物质积累的最大增长速率较 CK 分别提高 9.4%和 18.0%，SSM 处理分别提高 28.1%和 14.5%；PMS 处理平均增长速率较 CK 分别提高 17.7%和 31.4%，SSM 处理分别提高 16.6%和 24.5%。2022 年 PMS 和 SSM 处理干物质积累最大增长速率出现的时间较 CK 分别提前 2 d 和 1 d，2021 年在不同处理间无显著差异。

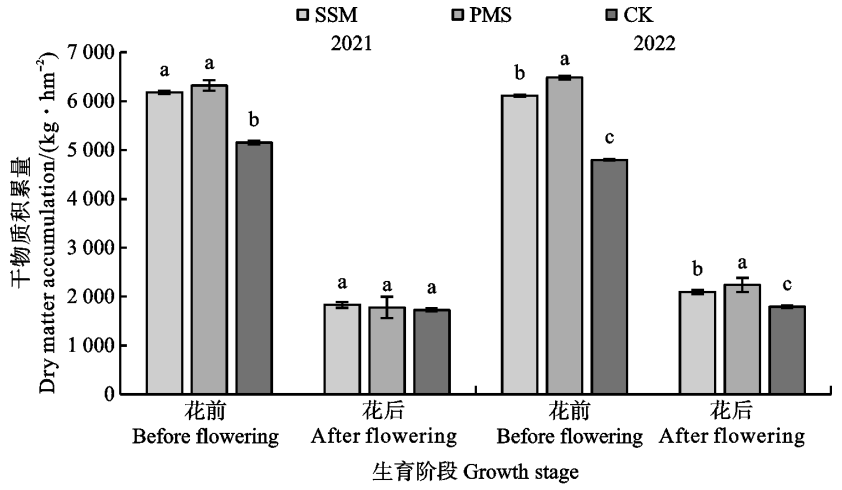


图 7　春小麦开花前后的植株干物质积累量

Fig. 7　Dry matter accumulation of plants of spring wheat before and after flowering

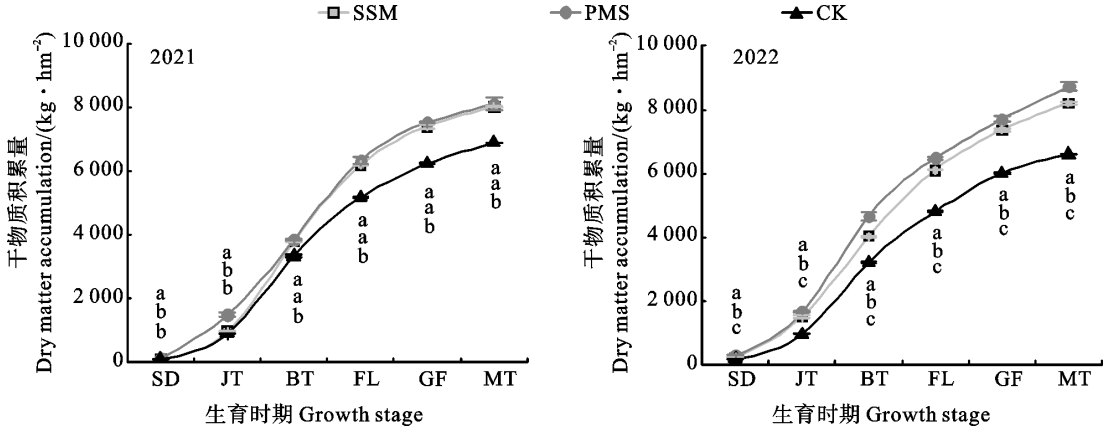


图 8　春小麦干物质积累量随生育时期动态变化过程

Fig. 8　Dynamic changes of dry matter accumulation of spring wheat with growth stage

表 2　不同覆盖处理下春小麦地上部干物质积累的 Logistic 方程回归分析

Table 2　Logistic regression analysis of aboveground dry matter accumulation in spring wheat

处理 Treatment	回归方程 Regression equation	R^2	最大增长速率出现天数 Days of maximum increase rate/d	最大增长速率 Maximum increase rate/(kg · hm^{-2} · d^{-1})	平均增长速率 Average increase rate/(kg · hm^{-2} · d^{-1})
2021					
SSM	$Y=7\,841.0/(1+e^{9.327-14.819t})$	0.997	74.3a	246.14a	79.31a
PMS	$Y=8\,077.3/(1+e^{7.679-12.303t})$	0.995	73.7a	210.19b	80.05a
CK	$Y=6\,700.2/(1+e^{8.502-13.542t})$	0.996	74.1a	192.22b	68.01b
2022					
SSM	$Y=8\,107.8/(1+e^{7.023-11.258t})$	0.995	73.6b	193.35a	79.89b
PMS	$Y=8\,523.6/(1+e^{6.815-11.116t})$	0.993	72.4c	200.62a	84.32a
CK	$Y=6\,497.5/(1+e^{7.736-12.268t})$	0.997	74.4a	168.88b	64.16c

相同年份同列数据后不同小写字母代表处理间差异显著($P<0.05$)。下同

Different lowercase letters following the values within the same columns and year indicate significant differences among treatments($P<0.05$). The same in tables 3－6.

2.4 覆盖对春小麦地上部干物质积累与分配的影响

2.4.1 对开花期干物质积累与分配的影响

两年覆盖处理春小麦开花期干物质积累量均显著高于 CK(表 3)。与 CK 相比,2021 和 2022 年 PMS 处理叶+茎鞘的干物质积累量分别提高 18.9%和 41.8%,SSM 处理分别提高 8.9%和 28.8%;PMS 处理穗的干物质积累量较 CK 分别提高 38.9%和 14.1%,SSM 处理分别提高 66.7%和 22.6%。

从干物质积累量的分配比例看,2021 年 PMS 和 SSM 处理均较 CK 显著提高了穗部的分配比例,分别增加 13.2%和 39.1%;2022 年较 CK 提高了叶片+茎鞘的分配比例,分别增加 5.0%和 1.2%。上述结果表明,覆盖处理对开花期穗部干物质积累量有显著增加效应,且在平水年高于枯水年,SSM 处理增幅更大。

2.4.2 对成熟期干物质积累与分配的影响

两年覆盖处理春小麦成熟期干物质积累量均显著高于 CK(表 4)。与 CK 相比,2021 和 2022 年 PMS 处理叶+茎鞘的干物质积累量较 CK 分别提高 25.2%和 29.8%,SSM 处理分别提高 13.8%和 9.1%;PMS 处理穗干物质积累量较 CK 分别提高 11.8%和 35.0%,SSM 处理分别提高 18.6%和 40.9%。这说明覆盖处理对成熟期穗干物质积累量的增幅在枯水年高于平水年;在枯水年较 CK 提高了穗的分配比例,且 SSM 处理影响显著。

2.5 覆盖对春小麦花前营养器官干物质再分配的影响

从表 5 可以看出,覆盖处理较 CK 显著增加了花前穗轴+颖壳干物质的转运量和转运效率,且增幅为 2022 年>2021 年,PMS>SSM。2021 和 2022 年 PMS 处理的花前干物质转运量较 CK 增加 133.6%和 292.9%,SSM 处理增加 112.2%和 126.0%;PMS 处理转运效率较 CK 增加 90.5%和 190.9%,SSM 处理增加 76.9%和 77.6%;PMS 处理花前干物质对籽粒产量贡献率较 CK 显著增加,增幅 114.6%和 152.1%,SSM 处理增加 97.7%和 46.6%。与 CK 相比,2021 年 PMS 和 SSM 处理的叶片和茎鞘花前干物质转运量、转运效率及对籽粒产量贡献率均显著降低;但在 2022 年均显著增加。这表明覆盖处理在水分胁迫下对春小麦花前干物质转运的促进作用更大。

表 3 春小麦开花期干物质的分配

Table 3 Distribution of dry matter in different organs of spring wheat at flowering stage

年度 Year	处理 Treatment	叶+茎鞘 Leaf + stem and sheath		穗 Spike	
		干物质积累量 Dry matter accumulation/(kg·hm^{-2})	比例 Ratio/%	干物质积累量 Dry matter accumulation/(kg·hm^{-2})	比例 Ratio/%
2021	SSM	4 533.87b	73.36c	1 646.16a	26.64a
	PMS	4 951.03a	78.31b	1 370.94b	21.69b
	CK	4 164.78c	80.84a	987.28c	19.16c
	CV/%	7.71	4.29	21.63	14.79
2022	SSM	4 675.26b	76.52b	1 435.07a	23.48a
	PMS	5 149.42a	79.42a	1 334.64b	20.58b
	CK	3 630.58c	75.63b	1 170.26c	24.37a
	CV/%	15.03	2.35	9.34	7.97

表 4 春小麦成熟期干物质的分配

Table 4 Distribution of dry matter in different organs of spring wheat at mature stage

年度 Year	处理 Treatment	叶+茎鞘 Leaf + stem and sheath		穗 Spike	
		干物质积累量 Dry matter accumulation/(kg·hm^{-2})	比例 Ratio/%	干物质积累量 Dry matter accumulation/(kg·hm^{-2})	比例 Ratio/%
2021	SSM	3 470.59b	43.30b	4 543.32a	56.70a
	PMS	3 818.05a	47.10a	4 282.68b	52.90b
	CK	3 049.62c	44.32b	3 832.02c	55.68a
	CV/%	10.38	4.33	7.50	3.53
2022	SSM	3 710.77b	45.20b	4 497.61a	54.80a
	PMS	4 416.11a	50.61a	4 307.26b	49.39b
	CK	3 402.79c	51.60a	3 191.46c	48.40b
	CV/%	12.09	6.23	15.34	6.02

表 5　春小麦花前营养器官干物质的再分配

Table 5　Dry matter redistribution of vegetative organs before anthesis of spring wheat

年份 Year	处理 Treatment	叶 Leaf			茎鞘 Stem and sheath			穗轴+颖壳 Spikecob+glume		
		DMT/(kg·hm^{-2})	DME/%	DMP/%	DMT/(kg·hm^{-2})	DME/%	DMP/%	DMT/(kg·hm^{-2})	DME/%	DMP/%
2021	SSM	201.80b	3.27b	6.28b	861.48b	13.94b	26.82c	314.97b	5.10b	9.81b
	PMS	198.65b	3.14b	6.10b	934.33a	14.78b	28.69b	346.79a	5.49a	10.64a
	CK	225.95a	4.39a	7.55a	889.22b	17.26a	29.72a	148.45c	2.88c	4.96c
	CV/%	21.35	16.74	10.66	19.36	10.14	5.91	36.97	27.25	31.39
2022	SSM	238.50a	3.90a	7.38a	725.99a	11.88a	22.47a	170.55b	2.79b	5.28b
	PMS	209.19b	3.23b	6.40b	524.12b	8.08b	16.04b	296.52a	4.57a	9.08a
	CK	52.23c	1.09c	2.49c	175.56c	3.66c	8.38c	75.48c	1.57c	3.60c
	CV/%	69.80	46.50	41.36	53.84	45.30	39.25	62.15	43.96	40.81

DMT:干物质转运量;DME:干物质转运效率;DMP:干物质对籽粒产量贡献率。

DMT: Amount of dry matter translocation; DME: Dry matter translocation efficiency; DMP: Contribution rate of dry matter to grain yield.

2.6　覆盖对春小麦花前和花后干物质对籽粒产量贡献率的影响

由图 9 可知,两年各处理春小麦干物质对籽粒产量的贡献率均表现为花后>花前。与 CK 相比,两年覆盖处理均显著提升了花前干物质的贡献率,降低了花后干物质的贡献率。2021 和 2022 年 PMS 处理花前干物质的贡献率较 CK 分别增加 7.6%和 117.8%,SSM 处理分别增加 1.6%和 142.8%;PMS 处理花后干物质的贡献率较 CK 分别降低 5.6%和 19.9%,SSM 处理较 CK 分别降低 1.2%和 24.2%。这说明覆盖处理对春小麦花前干物质转运量和花后干物质积累量的贡献率的影响表现出明显的年际差异,且在枯水年变化更为明显。

2.7　覆盖对春小麦籽粒产量及其构成要素的影响

由表 6 可知,2021 和 2022 年覆盖处理的小麦产量均显著高于 CK,PMS 处理较 CK 分别提高 18.5%和 20.2%,SSM 处理分别提高 12.1%和 11.6%。PMS 处理穗数较 CK 分别提高 14.0%和 49.4%,SSM 处理分别提高 10.6%和 23.2%。2022 年 PMS 和 SSM 处理的穗粒数较 CK 显著减少,分别减少 19.7%和 8.9%;2021 年各处理间无显著差异。2021 年 PMS 处理的千粒重较 CK 提高 6.1%,SSM 处理与 CK 间差异不显著;2022 年千粒重在不同处理间无显著差异。

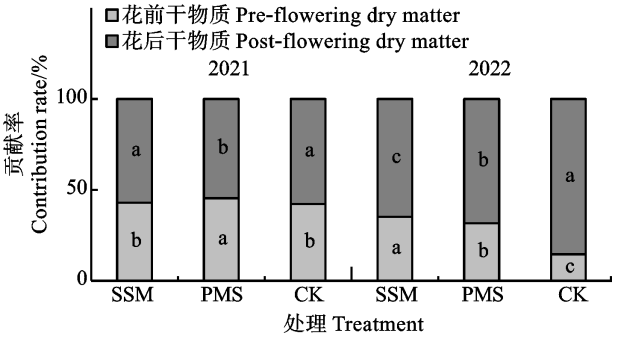


图 9　春小麦花前、花后干物质积累对籽粒产量的贡献

Fig. 9　Contribution of dry matter accumulation before and after anthesis to grain yield and spring wheat

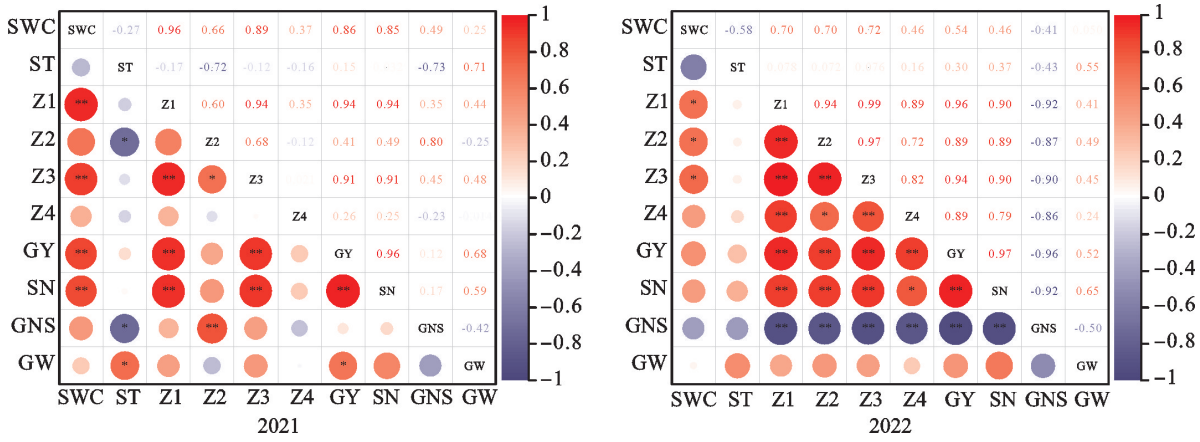
表 6　不同处理对春小麦籽粒产量及构成要素的影响

Table 6　Effects of different treatments on grain yield and its components of spring wheat

年份 Year	处理 Treatment	籽粒产量 Grain yield/(kg·hm^{-2})	穗数 Spike number/(×10^4·hm^{-2})	穗粒数 Grain number per spike/	千粒重 1 000-grain weight/g
2021	SSM	2 836.33b	219.34a	32.42a	43.36b
	PMS	2 998.90a	226.11a	31.17a	46.29a
	CK	2 530.85c	198.33b	31.01a	43.63b
	CV/%	7.51	6.10	2.87	3.27
2022	SSM	2 816.97b	198.25b	33.13b	46.28a
	PMS	3 035.99a	240.40a	29.21c	47.05a
	CK	2 525.22c	160.87c	36.37a	46.31a
	CV/%	8.21	18.16	9.65	1.23

2.8 土壤水、热、干物质积累量与产量及构成要素的相关性分析

不同年型下土壤水、热、干物质积累量及产量指标间存在显著相关性(图 10)。2021 年,土壤含水量与干物质平均增长速率($r=0.96^{**}$)、花前干物质积累量($r=0.89^{**}$)、籽粒产量($r=0.86^{**}$)和穗数($r=0.85^{**}$)呈极显著正相关,表明平水年下土壤水分主要通过促进营养生长阶段干物质积累和群体建成影响产量形成;土壤温度与千粒重($r=0.71^{*}$)呈显著正相关,与干物质最大增长速率($r=-0.72^{*}$)和穗粒数($r=-0.73^{*}$)呈显著负相关,表明土壤温度对粒重形成具有促进作用,但不利于穗粒数形成。2022 年,土壤含水量与干物质平均增长速率($r=0.70^{*}$)、干物质最大增长速率($r=0.70^{*}$)和花前干物质积累量($r=0.72^{*}$)呈显著正相关,说明枯水年下土壤水分对群体干物质生产具有重要调控作用;群体干物质积累量与产量间呈显著或极显著正相关,而穗粒数与干物质平均增长速率($r=-0.92^{**}$)、干物质最大增长速率($r=-0.87^{**}$)、花前干物质积累量($r=-0.90^{**}$)、花后干物质积累量($r=-0.86^{**}$)、籽粒产量($r=-0.96^{**}$)和穗数($r=-0.92^{**}$)之间呈极显著负相关。这表明在枯水年下产量构成要素之间存在明显的补偿效应,且春小麦在水分受限的情况下对群体干物质生产量表现出较强的依赖性。



SWC:土壤含水量;ST:土壤温度;Z1:干物质平均增长速率;Z2:干物质最大增长速率;Z3:花前干物质积累量;Z4:花后干物质积累量;GY:籽粒产量;SN:穗数;GNS:穗粒数;GW:千粒重。*:$P<0.05$;**:$P<0.01$。

SWC: Soil water content; ST: Soil temperature; Z1: Average growth rate of dry matter; Z2: Maximum growth rate; Z3: Dry matter accumulation before anthesis; Z4: Dry matter accumulation after anthesis. GY: Grain yield; SN: Spike number; GNS: Grain number per spike; GW: 1 000-grain weight. *: $P<0.05$; **: $P<0.01$.

图 10 土壤水、热、干物质积累与产量及构成要素的相关性

Fig. 10 Correlation between soil moisture and thermo-conditions, dry matter accumulation, yield and yield components

3 讨论

3.1 覆盖对旱地春小麦土壤水热的影响

覆盖措施能够显著调节土壤水热状况,进而影响作物生长发育、干物质积累及产量形成[22-25]。研究表明,覆盖能够有效降低土壤水分蒸发、提高降水入渗与蓄存能力,从而显著增加小麦生育期的土壤平均含水量[26-28]。本研究中,两种覆盖处理在两个小麦生长季均显著提高了旱地春小麦各生育时期 0~200 cm 土层土壤含水量,且在枯水年效应更大。推测在降水不足的条件下,覆盖对土壤蒸发有抑制作用,从而增强了土壤蓄水保墒能力。不同土层土壤水分对覆盖的响应存在明显差异[29-30]。本研究发现,平水年覆盖处理主要提高了浅层土壤含水量,而枯水年对中下层土壤含水量的提升更明显。这表明干旱年份有助于促进小麦利用土壤深层水分,从而增强其抗旱能力,稳定其产量[31]。

土壤温度对玉米生长发育有重要影响[32]。适宜的土壤温度有利于水稻根系生长、养分吸收及群体建成[33]。研究表明,不同覆盖方式对小麦生育期内的土壤温度的效应不同[34-36];地膜覆盖表现出明显增温效应,而秸秆带状覆盖表现为降温效应[26-27,37],这与本研究结果一致。这主要是由于地膜能够增强太阳辐射吸收并减少土壤热量散失;而秸秆带状覆盖的导热性较低,可减弱太阳

辐射导致土壤温度降低。前人研究认为,覆盖处理对浅层土壤温度,尤其是播种层 5 cm 左右土层影响最明显[38-39];土壤温度随土层深度的增加而降低,且全生育期平均地温表现为覆膜>CK>秸秆覆盖[40],本研究结果与其一致。这表明浅层土壤受地表辐射和气温变化影响更直接,而深层土壤对温度的响应相对滞后。本研究中,枯水年各处理间土壤温度的差异大于平水年,这可能与干旱年份土壤水分较少、热容量降低、对温度更敏感有关[41]。

3.2　覆盖对旱地春小麦干物质积累、分配与转运的影响

干物质积累量是作物产量形成的物质基础,其积累动态直接反映群体生长状况与干物质生产能力。已有研究表明,覆盖能够通过改善土壤水热条件、增强光合作用、延缓叶片衰老,从而提高作物干物质积累量[42-43]。本研究中,两种覆盖处理均能显著提高西北旱地春小麦地上部干物质的积累量,且枯水年增幅更为明显,说明在水分受限条件下,覆盖对小麦群体干物质生产的促进作用更明显。Logistic 方程分析进一步表明,覆盖处理提高了干物质积累的平均增长速率和最大增长速率,并使枯水年最大增长速率出现时间提前。说明覆盖增强了春小麦前期快速生长能力,提高了群体对有限水分资源的利用效率。

协调源库关系、优化干物质积累与转运过程,是作物实现高产的关键生理基础[44-45]。地膜覆盖在促进花前干物质向籽粒的转运方面表现更优,其转运量和对籽粒产量贡献率均高于秸秆带状覆盖[46-47]。这可能与地膜覆盖更早提升地温、促进小麦前期生长有关。本研究发现,覆盖处理尤其是 PMS 处理,显著促进了穗轴+颖壳中花前干物质积累的转运,且枯水年增幅(292.9%)远超平水年(133.6%)。这与 Yang 等[48]的研究结果相似。这可能因为干旱胁迫导致花后光合生产受限,覆盖通过改善植株水分状况,让花前合成的贮藏物质的潜力充分发挥,从而在源受限的情况下保障库的养分供应,并进一步证实覆盖在干旱年份下的特殊价值。

3.3　覆盖对旱地春小麦产量及其构成要素的影响

有研究表明,覆盖处理均可显著提高小麦产量,且地膜覆盖优于秸秆带状覆盖[49];秸秆覆盖措施可使小麦产量提高 13.3%～23.0%[50]。Chai 等[51]研究发现,与 CK 相比,秸秆带状覆盖下旱地小麦平均增产 11.5%,生物量增加了 19.0%。本研究中,PMS 处理平均增产 19.36%,SSM 平均增产 11.81%,与上述研究结果一致。孙敏等[52]和高甜甜等[53]提出,覆盖增产主要来源于穗数的增加。本研究中,PMS 处理两年平均穗数较 CK 提高 29.87%,与前人研究结果相似。这可能因为覆盖小麦生育改善了前期土壤水热条件,促进分蘖的发生与成穗,提高了群体有效穗数量。

综合来看,覆盖处理显著改善了春小麦的土壤水热环境,对旱地春小麦生长和产量有显著效应。推测其本质是以水分为主、温度为辅的水热协同调控过程,二者共同提高了产量形成[54]。本研究各处理采用小区面积一致、播量一致原则,其田间配置行距和株距不完全相同,各处理差异应理解为“不同覆盖栽培模式”的综合效应,而非单一材料因素的纯粹比较。

4　结论

(1)覆盖处理对春小麦土壤水温、各生育阶段的群体干物质积累量以及籽粒产量均有显著影响,且在枯水年的影响更为明显。

(2)与露地平作相比,地膜覆盖处理以“增温保墒”为主要特点,秸秆带状覆盖处理则体现了“降温保水”效应。

(3)覆盖处理显著提高春小麦地上部干物质积累量,增幅为地膜覆盖>秸秆带状覆盖。平水年覆盖处理利于花后干物质积累,枯水年则显著促进花前干物质向籽粒的转运。

(4)覆盖处理的籽粒产量显著高于 CK,且两年增产幅度均表现为地膜覆盖>秸秆带状覆盖;穗数的增加是覆盖增产的主要原因。

参考文献:

[1]严如玉,赵希梅,向风云,等.中国小麦优势区域生产格局及施肥现状研究[J].麦类作物学报,2024,44(2):230.
Yan R Y,Zhao X M,Xiang F Y,*et al*. Research on the production pattern and fertilization status in China's dominant regions of wheat [J]. *Journal of Triticeae Crops*,2024,44(2):230.

[2]达存莹,岳 云,贺 娟,等.西北地区小麦增产潜力分析研究[J].中国农业资源与区划,2016,37(5):54.
Da C Y,Yue Y,He J,*et al*. Analysis of increasing potential of wheat yield in northwest region [J]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*,2016,37(5):54.

[3]Zong R,Wang Z H,Li W H,*et al*. Effects of practicing long-term mulched drip irrigation on soil quality in Northwest Chi-

na [J]. *Science of the Total Environment*, 2023, 878: 163247.

[4]Xue J Y, Guan H D, Huo Z L, *et al*. Water saving practices enhance regional efficiency of water consumption and water productivity in an arid agricultural area with shallow groundwater [J]. *Agricultural Water Management*, 2017, 194: 78.

[5]Feng K, Wang S L, Wang Y Y, *et al*. Spatio-temporal characteristics and multivariate recurrence period of agricultural drought in Northwestern China [J]. *Scientific Reports*, 2025, 15: 23462.

[6]Gupta A, Rico-Medina A, CañO-Delgado A I. The physiology of plant responses to drought [J]. *Science*, 2020, 368(6488): 266.

[7]刘宪锋, 傅伯杰. 干旱对作物产量影响研究进展与展望[J]. 地理学报, 2021, 76(11): 2632.
Liu X F, Fu B J. Drought impacts on crop yield: Progress, challenges and prospect [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2021, 76(11): 2632.

[8]Zhang J X, Ren F F, Zhang R, *et al*. Effects of crushed wheat straw with plastic film mulch on soil hydrothermal properties and water use efficiency of sunflower in the northwestern arid region of China [J]. *Scientific Reports*, 2025, 15: 23066.

[9]Nie H J, Qin T L, Yang H B, *et al*. Trend analysis of temperature and precipitation extremes during winter wheat growth period in the major winter wheat planting area of China [J]. *Atmosphere*, 2019, 10(5): 240.

[10]李玉玲, 张 鹏, 张 艳, 等. 旱区集雨种植方式对土壤水分、温度的时空变化及春玉米产量的影响[J]. 中国农业科学, 2016, 49(6): 1084.
Li Y L, Zhang P, Zhang Y, *et al*. Effects of rainfall harvesting planting on temporal and spatial changing of soil water and temperature, and yield of spring maize (*Zea mays* L.) in semi-arid areas [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2016, 49(6): 1084.

[11]马明生, 郭贤仕, 柳燕兰. 全生物降解地膜覆盖对旱地土壤水分状况及春小麦产量和水分利用效率的影响[J]. 作物学报, 2020, 46(12): 1933.
Ma M S, Guo X S, Liu Y L. Effects of full biodegradable film on soil water status and yield and water use efficiency of spring wheat in dryland [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2020, 46(12): 1933.

[12]申丽霞, 兰印超, 李若帆. 不同降解膜覆盖对土壤水热与玉米生长的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2018, 36(1): 200.
Shen L X, Lan Y C, Li R F. Effects of different degradable films on soil moisture, temperature and growth of maize [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2018, 36(1): 200.

[13]刘继龙, 李佳文, 周 延, 等. 秸秆覆盖与耕作方式对土壤水分特性的影响[J]. 农业机械学报, 2019, 50(7): 333.
Liu J L, Li J W, Zhou Y, *et al*. Effects of straw mulching and tillage on soil water characteristics [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2019, 50(7): 333.

[14]王 俊, 李凤民, 宋秋华, 等. 地膜覆盖对土壤水温和春小麦产量形成的影响[J]. 应用生态学报, 2003, 14(2): 205.
Wang J, Li F M, Song Q H, *et al*. Effects of plastic film mulching on soil temperature and moisture and on yield formation of spring wheat [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2003, 14(2): 205.

[15]周彦莉, 吴海梅, 周彦栋, 等. 短期秸秆不同还田方式对土壤结构和水分影响[J]. 干旱区研究, 2022, 39(2): 502.
Zhou Y L, Wu H M, Zhou Y D, *et al*. Effects of different short-term straw returning methods on soil structure and water content [J]. *Arid Zone Research*, 2022, 39(2): 502.

[16]刘 风, 王红丽. 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[J]. 干旱地区农业研究, 2024, 42(3): 136.
Liu F, Wang H L. Effects of whole field soil-plastic mulching on winter wheat water consumption characteristics, growth and yield [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2024, 42(3): 136.

[17]陈玉章, 莫 畏, 刘 鑫, 等. 秸秆带状覆盖对西南旱地高粱根区土壤水温及产量的影响[J]. 应用生态学报, 2025, 36(10): 2978.
Chen Y Z, Mo W, Liu X, *et al*. Effects of straw strip mulching on soil water-temperature in root zone and grain yield of sorghum in southwest dryland, China [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2025, 36(10): 2978.

[18]白丽婷, 海江波, 韩清芳, 等. 不同地膜覆盖对渭北旱塬冬小麦生长及水分利用效率的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2010, 28(4): 135.
Bai L T, Hai J B, Han Q F, *et al*. Effects of mulching with different kinds of plastic film on growth and water use efficiency of winter wheat in Weibei highland [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2010, 28(4): 135.

[19]Dong S Y, Huang M, Zhang J H, *et al*. Long-term rotary tillage and straw mulching enhance dry matter production, yield, and water use efficiency of wheat in a rain-fed wheat-soybean double cropping system [J]. *Plants*, 2025, 14(15): 2438.

[20]李保成, 白梓辰, 秦书勉, 等. 不同类型降解膜覆盖对玉米干物质积累、分配和转运及产量的影响[J]. 中国农业大学学报, 2026, 31(1): 21.
Li B C, Bai Z C, Qin S M, *et al*. Effects of different types of degradable film mulching on the accumulation, allocation and translocation of dry matter, and yield of maize [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2026, 31(1): 21.

[21]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.
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.

[22]Li R, Hou X Q, Jia Z K, *et al*. Effects on soil temperature, moisture, and maize yield of cultivation with ridge and furrow mulching in the rainfed area of the Loess Plateau, China [J].

Agricultural Water Management,2013,116:101.

[23]Li Q,Li H B,Zhang L,*et al*. Mulching improves yield and water-use efficiency of potato cropping in China:A meta-analysis [J]. *Field Crops Research*,2018,221:50.

[24]陈鑫敏,肖登攀,路 杨. 中国地表覆盖措施对土壤水热、温室气体排放及作物生长影响的研究进展[J]. 中国农学通报,2025,41(12):53.
Chen X M,Xiao D P,Lu Y. Research progress on effects of land cover measures on soil water & temperature,greenhouse gas emissions and crop growth in China [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*,2025,41(12):53.

[25]王永亮,胥子航,李 申,等. 不同覆盖措施对土壤水热状况及春玉米产量和水分利用效率的影响[J]. 作物学报,2024,50(5):1312.
WANg Y L,Xu Z H,Li S,*et al*. Effects of different mulching measures on moisture and temperature of soil and yield and water use efficiency of spring maize [J]. *Acta Agronomica Sinica*,2024,50(5):1312.

[26]王文杰,马建涛,柴雨葳,等. 不同覆盖方式对旱地春小麦土壤水热及生长的影响[J]. 麦类作物学报,2023,43(9):1206.
Wang W J,Ma J T,Chai Y W,*et al*. Effects of different mulching methods on soil moisture,temperature,and growth of dryland spring wheat [J]. *Journal of Triticeae Crops*,2023,43(9):1206.

[27]阎龙霞,马建涛,柴雨葳,等. 不同覆盖方式对旱地冬小麦土壤水热及光合特性的影响[J]. 麦类作物学报,2024,44(9):1185.
Yan L X,Ma J T,Chai Y W,*et al*. Effect of different mulching methods on hydrothermal and photosynthetic characteristics of winter wheat in drylands [J]. *Journal of Triticeae Crops*,2024,44(9):1185.

[28]李宝占,周 萌,董志香,等. 不同麦秆带状覆盖对西北旱作区冬小麦土壤水热状况及产量的影响[J]. 华北农学报,2025,40(3):68.
Li B Z,Zhou M,Dong Z X,*et al*. Effects of different straw zonation on soil water and heat status and yield of winter wheat in dryland areas of Northwest China [J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*,2025,40(3):68.

[29]王 敏,王海霞,韩清芳,等. 不同材料覆盖的土壤水温效应及对玉米生长的影响[J]. 作物学报,2011,37(7):1249.
Wang M,Wang H X,Han Q F,*et al*. Effects of different mulching materials on soil water,temperature,and corn growth [J]. *Acta Agronomica Sinica*,2011,37(7):1249.

[30]宋亚丽,杨长刚,李博文,等. 秸秆带状覆盖对旱地冬小麦产量及土壤水分的影响[J]. 麦类作物学报,2016,36(6):765.
Song Y L,Yang C G,Li B W,*et al*. Effect of bundled straw mulching on yield of winter wheat and soil moisture in arid region [J]. *Journal of Triticeae Crops*,2016,36(6):765.

[31]杨长刚,柴守玺,常 磊,等. 不同覆膜方式对旱作冬小麦耗水特性及籽粒产量的影响[J]. 中国农业科学,2015,48(4):661.
Yang C G,Chai S X,Chang L,*et al*. Effects of plastic mulching on water consumption characteristics and grain yield of winter wheat in arid region of Northwest China [J]. *Scientia Agricultura Sinica*,2015,48(4):661.

[32]Xia Z Q,Zhang S B,Wang Q,*et al*. Effects of root zone warming on maize seedling growth and photosynthetic characteristics under different phosphorus levels [J]. *Frontiers in Plant Science*,2021,12:746152.

[33]Li H,Zeng S,Luo X W,*et al*. Effects of small ridge and furrow mulching degradable film on dry direct seeded rice [J]. *Scientific Reports*,2021,11:317.

[34]王 芳,程宏波,李 瑞,等. 秸秆带状覆盖对旱地冬小麦土壤温度及产量的影响[J]. 麦类作物学报,2017,37(6):777.
Wang F,Cheng H B,Li R,*et al*. Effect of bundled straw covering on soil temperature and yield of winter wheat in arid region [J]. *Journal of Triticeae Crops*,2017,37(6):777.

[35]杨长刚,柴守玺. 秸秆带状覆盖对旱地冬小麦产量及土壤水热利用的调控效应[J]. 应用生态学报,2018,29(10):3245.
Yang C G,Chai S X. Regulatory effects of bundled straw covering on winter wheat yield and soil thermal-moisture utilization in dryland [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*,2018,29(10):3245.

[36]张 乾,赵德明,朱有虎,等. 秸秆带状覆盖对旱地冬小麦土壤温度及产量的影响[J]. 麦类作物学报,2023,43(8):1056.
Zhang Q,Zhao D M,Zhu Y H,*et al*. Effect of straw strip mulching on soil temperature and yield of winter wheat in dryland [J]. *Journal of Triticeae Crops*,2023,43(8):1056.

[37]Li Y W,Chai S X,Chai Y W,*et al*. Effects of mulching on soil temperature and yield of winter wheat in the semiarid rainfed area [J]. *Field Crops Research*,2021,271:108244.

[38]Kader M A,Senge M,Mojid M A,*et al*. Mulching type-induced soil moisture and temperature regimes and water use efficiency of soybean under rain-fed condition in central Japan [J]. *International Soil and Water Conservation Research*,2017,5(4):302-308.

[39]Chai Y W,Chai Q,Li R,*et al*. Straw strip mulching in a semiarid rainfed agroecosystem achieves winter wheat yields similar to those of full plastic mulching by optimizing the soil hydrothermal regime [J]. *The Crop Journal*,2022,10(3):879-892.

[40]程宏波,柴守玺,陈玉章,等. 西北旱地春小麦不同覆盖措施的温度和产量效应[J]. 生态学报,2015,35(19):6316-6325.
Cheng H B,Chai S X,Chen Y Z,*et al*. Effect of mulching method on soil temperature and grain yield of spring wheat in rainfed agricultural areas of northwestern China [J]. *Acta Ecologica Sinica*,2015,35(19):6316-6325.

[41]杨封科,王立明,张国宏. 甘肃旱作大豆全膜双垄种植的土壤水热及产量效应[J]. 应用生态学报,2013,24(11):3145.
Yang F K,Wang L M,Zhang G H. Effects of plastic film mulching with double ridges and furrow planting on soil moisture and temperature and soybean yield on a semiarid dryland of Gansu Province,Northwest China [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*,2013,24(11):3145.

[42]Hu Y J, Ma P H, Duan C X, *et al*. Black plastic film combined with straw mulching delays senescence and increases summer maize yield in Northwest China [J]. *Agricultural Water Management*, 2020, 231: 106031.

[43]Xie Y D, Li J W, Jin L, *et al*. Combined straw and plastic film mulching can increase the yield and quality of open field loose-curd cauliflower [J]. *Frontiers in Nutrition*, 2022, 9: 888728.

[44]Zheng C F, Liu C Z, Li C, *et al*. Study on the relationships between the accumulation and translocation of dry matter and nitrogen and flower/pod development into seeds and seed yields in Chinese milk vetch [J]. *PLoS One*, 2023, 18(3): e0278832.

[45]李强强, 赵 玥, 李 璠, 等. 作物源库关系及其生理调控途径的研究进展[J]. 江苏农业科学, 2020, 48(9): 50.
Li Q Q, Zhao Y, Li F, *et al*. Research progress of source-sink relationship and its underlying regulation mechanisms [J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2020, 48(9): 50.

[46]杨 永, 柴雨葳, 常 磊, 等. 不同覆盖处理对冬小麦干物质积累转运及产量的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2024, 42(4): 155.
Yang Y, Chai Y W, Chang L, *et al*. Effects of different mulching treatments on accumulation and translocation of dry matter and yield in winter wheat [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2024, 42(4): 155.

[47]杨佳佳, 程宏波, 柴守玺, 等. 不同覆盖栽培方式对冬小麦干物质分配与转运的影响[J]. 麦类作物学报, 2021, 41(6): 745.
Yang J J, Cheng H B, Chai S X, *et al*. Effect of different mulching cultivation methods on dry matter distribution and translocation in winter wheat [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2021, 41(6): 745.

[48]Yang J C, Zhang J H. Grain filling of cereals under soil drying [J]. *The New Phytologist*, 2006, 169(2): 223.

[49]叶元生, 黄彩霞, 柴守玺, 等. 秸秆带状覆盖对旱地冬小麦农田土壤特性及产量的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2021, 39(6): 146.
Ye Y S, Huang C X, Chai S X, *et al*. Effects of straw strip mulching on soil characteristics and yield of winter wheat in dryland [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2021, 39(6): 146.

[50]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.

[51]Chai Y W, Chai Q, Han F X, *et al*. Increasing yields while reducing soil nutrient accumulation by straw strip mulching in the dryland wheat(*Triticum aestivum* L.) cropping system of Northwest China [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2022, 326: 107797.

[52]孙 敏, 赵晋铭. 麦田封闭半封闭麦草覆盖耕作保水栽培技术体系的研究[J]. 山西农业大学学报(自然科学版), 2004, 24(1): 21.
Sun M, Zhao J M. On cultivated technique of preserving water system by the closed and semi-closed straw covering [J]. *Journal of Shanxi Agricultural University*, 2004, 24(1): 21.

[53]高甜甜, 柴守玺, 李亚伟, 等. 秸秆带状覆盖对西北旱地小麦籽粒灌浆速率和产量的影响[J]. 核农学报, 2022, 36(1): 183.
Gao T T, Chai S X, Li Y W, *et al*. Effects of straw strip mulching on grain-filling rate and yield of wheat in northwest dryland [J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2022, 36(1): 183.

[54]Zhao H B, Liu G F, Dou Y X, *et al*. Plastic mulch increases dryland wheat yield and water-use productivity, while straw mulch increases soil water storage[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2024, 23(9): 3174.