

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2024.06.037.

梁昊枫, 党科, 范子晗, 等不同生态区覆盖方式对玉米氮转运、产量与水氮利用效率的影响[J].水土保持研究, 2024, 31(6):176-187.

Liang Haofeng, Dang Ke, Fan Zihan, et al. Effects of Mulch Measures on Nitrogen Transport, Yield and Water and Nitrogen Use Efficiency of Maize in Different Ecological Zones[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024, 31(6):176-187.

不同生态区覆盖方式对玉米氮转运、 产量与水氮利用效率的影响

梁昊枫^{1,2}, 党科², 范子晗^{1,2}, 李哲^{1,2}, 常乐乐^{1,2}, 李红兵², 张岁岐^{1,2}

(1.西北农林科技大学 资源环境学院, 陕西 杨凌 712100;

2.西北农林科技大学 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西 杨凌 712100)

摘要: [目的]明确覆盖方式对西北不同生态区玉米氮转运、产量与水氮利用效率的影响效果, 为缓解旱作区作物生产同水资源短缺之间尖锐矛盾提供科学依据。[方法]于 2022 年在甘肃省兰州市榆中县、甘肃省定西市安定区和陕西省咸阳市长武县进行田间试验, 设置干旱偏旱区(YZ)、半干旱区(DX)和半干旱偏湿润区(CW)3 个不同降水条件生态区, 分析地膜覆盖(FM)和秸秆覆盖(SM)对于玉米不同器官干物质和氮素积累、分配、转运、水氮利用效率及产量形成的影响。[结果](1) 覆盖措施显著影响土壤环境, 提高各生态区 0—100 cm 土壤含水率和表层土壤无机氮含量, FM 提高了全生育期土壤表层温度, SM 在生育后期具有保温作用。(2) 各生态区吐丝期和成熟期农艺性状和干物质累积量总体表现为 CW>YZ>DX, 与 CK 相比覆盖处理提高了玉米吐丝期株高、茎粗和成熟期株高、茎粗、节数、穗位高及干物质累积量, 尤其是 FM 处理。(3) CW 的覆盖处理玉米籽粒和植株氮素积累总量在 3 个生态区中最高, 覆盖促进茎叶氮素向籽粒运转, 进而提高氮收获指数和水分利用效率, 但 DX 的 FM 氮收获指数和 YZ 的 FM 水分利用效率较 CK 增加幅度最高, 分别达 6.91% 和 70.58%。(4) 玉米籽粒产量在各生态区表现为 CW>YZ>DX, 覆盖处理对各生态区均有明显增产作用, 增产效果 FM>SM。其中 DX 和 YZ 的 FM 增产幅度高于 CW, 达 52.33% 和 52.55%, 但 CW 的 SM 增加幅度最高, 达 16.76%。[结论]地膜覆盖和秸秆覆盖通过改善土壤温度、水分和表层无机氮含量进而提高玉米水氮利用效率和产量, 其中地膜覆盖效果最佳。而半干旱偏旱区地膜覆盖对产量的响应最显著, 半干旱偏湿润区秸秆覆盖的响应最佳。

关键词: 西北旱区; 玉米; 覆盖措施; 产量; 水氮利用效率

中图分类号: S363; S342.1

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2024)06-0176-12

Effects of Mulch Measures on Nitrogen Transport, Yield and Water and Nitrogen Use Efficiency of Maize in Different Ecological Zones

Liang Haofeng^{1,2}, Dang Ke², Fan Zihan^{1,2}, Li Zhe^{1,2}, Chang Lele^{1,2}, Li Hongbing², Zhang Suiqi^{1,2}

(1.College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;

2.State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Agriculture on the Loess Plateau, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: [Objective] The aims of this study are to clarify the effects of mulching methods on maize nitrogen transport, yield and water and nitrogen utilization efficiency in different ecological zones in northwest China, and to provide a scientific basis for mitigating the acute conflicts between crop production and water scarcity in dryland areas. [Methods] A field experiment was conducted in 2022 in Yuzong County, Lanzhou City, Gansu Province, Anding District, Dingxi City, Gansu Province, and Changwu County, Xianyang City, Shaanxi Province, with three ecological zones with different precipitation conditions, namely, arid dry zone

收稿日期: 2023-12-14

修回日期: 2023-12-29

资助项目: 国家重点研发计划项目“晋东黄土丘陵区适水改土与种养结合协同技术集成及示范”(2021YFD1900705)

第一作者: 梁昊枫(1998—)男, 广东省佛山人, 硕士研究生, 研究方向为旱地作物高产高效栽培。E-mail: lianghaofeng@nwfau.edu.cn

通信作者: 张岁岐(1966—)男, 陕西省宝鸡人, 研究员, 博士生导师, 主要从事作物抗旱生理生态研究。E-mail: sqzhang@ms.iswc.ac.cn

<http://stbcyj.paperonce.org>

(YZ), semi-arid zone (DX), and semi-moisture dry zone (CW), to investigate the effects of film mulching (FM) and straw mulching (SM) on the accumulation, distribution, and efficiency of N and N utilization, as well as the accumulation, distribution and efficiency of N and N utilization of maize organs in three different ecological zones in the northwest China. The effects of FM and SM on dry matter and nitrogen accumulation, distribution, transfer, water and nitrogen utilization efficiency and yield formation in different organs of maize were investigated. [Results] (1) Mulching measures significantly affected the soil environment, increased the water content of 0—100 cm soil layer and inorganic nitrogen content of surface soil in all ecological zones, and FM increased the surface temperature of soil during the whole reproductive period, while SM had a heat preservation effect in the late reproductive stage. (2) Agronomic traits and dry matter accumulation at spitting and maturity stages in each ecological zone generally showed the order: CW>YZ>DX, and the mulching treatment improved plant height and stem thickness at spitting stage and plant height, stem thickness, number of nodes, ear height and dry matter accumulation at maturity stage of maize compared with CK, especially in the FM treatment. (3) Total corn grain and plant nitrogen accumulation of the mulch treatments in CW was the highest among the three ecological zones, and the mulch promoted the operation of stem and leaf nitrogen to the kernel, which in turn increased the nitrogen harvest index and water use efficiency, but the nitrogen harvest index of FM in DX and the water use efficiency of FM in YZ had the highest increase compared with that in CK, which amounted to 6.91% and 70.58%, respectively. (4) Corn kernel yield in all ecological zones followed the order: CW>YZ>DX, and mulching treatments had significant yield increases in all ecological zones, with yield increase effects of FM>SM, in which the yield increases of FM in DX and YZ were higher than that of CW, amounting to 52.33% and 52.55%, respectively, but the increase of SM in CW was the highest, amounting to 16.76%. [Conclusion] Film mulching and straw mulching improve water and nitrogen utilization efficiency and yield of maize by improving soil temperature, moisture and surface inorganic nitrogen content, among which film mulching has the best effect. In the semi-arid and dry zone, the most significant response of mulching is on yield, and the best response is on straw mulching in the semi-humid and dry zone.

Keywords: northwest arid region; maize; cover measures; yield; water and nitrogen use efficiency

随着人口的持续增长及全球农业生产科技的飞速发展,玉米生产在全球农业生产中成为重要的发展领域。目前,全球玉米种植总产量超过世界谷物总产量的1/3;单产位居全球谷类粮食作物首位^[1]。我国干旱和半干旱地区光照充足,热量适中,昼夜温差大,玉米是C4作物,其生育期与该地区的雨热同季,能更好地利用光温水等资源。在过去的15年中(2004—2018),西北地区玉米的单产水平提升了近30%,尤其在2018年,西北地区玉米的单产达到了8.9 t/hm²,远高于全国平均水平6.1 t/hm²^[2]。然而,该地区位于200~650 mm的半干旱和半湿润地区,水分亏缺是作物生产的主要限制因素。据预测,西北旱作区的年潜在蒸发量显著增加,但降水量没有发生显著变化^[3]。此外,该地区的年降水量大多出现在7—9月,雨季与玉米生长周期不匹配限制了玉米的出苗与早期生长发育,导致西北地区玉米单产水平仍远低于其产量潜力水平^[4]。

鉴于玉米生长周期水分亏缺、雨热与玉米生长周

期不匹配的不利因素,当地农民采用了诸多田间措施来提高和稳定玉米产量,其中覆盖措施是最广泛的方法之一。相关研究表明,使用覆盖系统可以显著提高旱地农业中农作物的产量和水分利用效率^[5]。目前,地膜覆盖与秸秆覆盖是干旱与半干旱地区农业生产中两个主要的地表覆盖技术,二者在玉米生育期均具有良好的蓄水保墒作用。地膜可在土壤与外界环境之间形成屏障,能有效抑制土壤水分蒸发,提高土壤含水量改善土壤水热条件^[6]。但是,传统塑料地膜难以分解且不易回收,对农田生态环境与粮食生产安全构成威胁^[7]。与地膜覆盖相比,秸秆覆盖除了能有效抑制土壤水分蒸发并调节地温外,还可腐解为土壤提供额外的养分来源,增强土壤肥力,促进地上部氮素吸收以及作物产量的形成^[8]。作为土壤氮转运的重要介质,适宜的土壤水分有利于提高土壤氮有效性和促进玉米对土壤氮的吸收和利用。何浩等^[9]研究发现秸秆还田可以增加土壤有机碳和速效氮、磷、钾

含量,实现玉米增产增收。但是,高亚军等^[10]研究发现,秸秆覆盖会导致作物减产,这可能与覆盖条件下的土壤水分、养分、温度等多种因素有关。针对不同地区不同温度条件下的玉米种植,采用不同的覆膜方式会更有效地发挥其增产潜力^[11]。同时也有研究发现,在年降水量 200~400 mm 的地区薄膜覆盖后对玉米生产的增产效果尤为明显^[12]。

以往的研究主要集中在覆盖措施对黄土高原土壤水热环境和玉米产量的影响效应方面,且单一的试验点难以实现对西北地区的区域性覆盖效果的全面评估。此外,还缺乏从产量、水氮利用效率等角度综合评价地膜覆盖和秸秆覆盖对不同降水条件旱地农业生产力的相关研究。因此,本研究选择 3 个不同生态条件种植区,分析地膜覆盖和秸秆覆盖两种种植方式对不同降水量生态区玉米农艺性状、产量及水氮利用效率的影响。旨在明确不同生态区玉米生长对不同地表覆盖模式的响应特征,为我国粮食高产、资源高效以及环境友好的农业可持续发展提供科学理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

本试验根据西北地区的降水梯度选取 3 个不同水热条件的地区于 2022 年进行田间试验,分别是中国科学院黄土高原生态农业试验站(陕西省长武县,CW)、甘肃省农科院定西试验站(甘肃省定西市,DX)和甘肃省农科院高寒农业试验站(甘肃省榆中县,YZ)(表 1)。基于前人的研究^[13],将这 3 个地点划分为 3 个生态区:半干旱偏旱区、半干旱区和半干旱偏湿润区。

表 1 试验点概况

Table 1 Overview of the test site				
试验点	生态区类型	年平均降水/mm	海拔/m	位置
榆中(YZ)	半干旱偏旱区	371.41	1947	35°87'N 104°15'E
定西(DX)	半干旱区	425.11	1970	35°58'N 104°62'E
长武(CW)	半干旱偏湿润区	600.59	1200	35°20'N 107°40'E

1.2 试验设计

各试验点均设 3 个处理,分别为不覆盖(对照,CK)、秸秆覆盖(SM)和地膜覆膜(FM),每个处理 4 次重复,榆中和定西小区面积均为 44 m²(4.4 m×10 m),长武为 39.6 m²(4.4 m×9 m)。种植品种为先玉 335。地膜覆盖采用透明农用地膜,膜宽 1.2 m,并采用全膜双垄沟播(高垄 15 cm,低垄 10 cm);秸秆覆盖采用玉米秸秆(用铡刀铡成 30~40 cm 的长度均匀铺在地面),秸秆覆盖量为 9 000 kg/hm²。YZ,DX,CW 分别于 2022 年 4 月 22 日、4 月 26 日、5 月 1 日起垄覆盖后开始播种;所有处理均采用宽窄行种植,宽行

70 cm,窄行 40 cm,种植密度为 6.75 万株/hm²。播种前施加氮肥 125 kg/hm²,并于拔节期追施氮肥 100 kg/hm²,并施用 150 kg P₂O₅/hm²,75 K₂O kg/hm²作为底肥,生育期间不灌水,所有田间管理措施与大田生产一致。各试验点土壤基础养分和玉米生育期气象数据见表 2 和图 1。

表 2 2022 年榆中(YZ)、定西(DX)和长武(CW)播前 0—20 cm 土壤养分

Table 2 0—20 cm Soil nutrients in the surface soil before sowing in YZ, CW and DX in 2022					
生态区	土壤类型	全氮/ (g · kg ⁻¹)	硝态氮/ (mg · kg ⁻¹)	铵态氮/ (mg · kg ⁻¹)	有机质/ (g · kg ⁻¹)
YZ	黄绵土	0.93	16.41	4.22	12.26
DX	黄绵土	0.95	17.69	6.14	12.63
CW	黑垆土	1.07	19.31	7.18	14.72

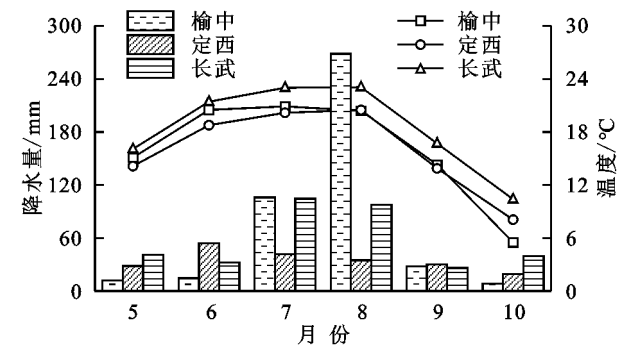


图 1 2022 年榆中、长武和定西玉米生长季气象数据

Fig. 1 2022 Growing season meteorological data for maize in YZ, CW and DX

1.3 测定指标与方法

1.3.1 土壤温度与水分的测定 土壤温度:玉米播后各处理埋设温度计,测定时间从 8:00 开始,每两个小时记录一次,直至 20:00。测定土层为 0—20 cm,从覆盖当天起每个生育时期连续监测 5 d,求其平均值作为其本生育时期测定值。

土壤水分^[14]:于玉米吐丝期和成熟期进行取样,在各试验区选取 3 个点,采用螺旋钻(直径 4 cm)取吐丝期、成熟期 0—200 cm 土层土壤水分,每 20 cm 土层取样一次,利用烘干法测定不同土层的土壤水分,并计算农田耗水量。

农田耗水量 $ET(mm) = P + \Delta SWS$ (1)
式中: P 为生长季降水量(mm); ΔSWS 为生育期前后土壤储水量之差(mm)。

水分利用效率 $WUE = Y/ET$ (2)
式中: Y 为产量(kg/hm²); ET 为农田耗水量(mm)。

1.3.2 土壤无机氮的测定 用土钻取 0—20 cm 土层土壤样品带回实验室,保存于-80℃条件下,使用 AA3 流动分析仪测定土壤铵态氮和硝态氮含量,土

壤铵态氮和硝态氮含量之和为土壤总无机氮^[15]。

1.3.3 玉米农艺性状与干物质重、全氮含量的测定

于吐丝期和成熟期各小区选取具有代表性的植株3株,测定吐丝期株高、茎粗与成熟期株高、茎粗、穗位高以及节数。接着按照植株吐丝期的茎、叶和成熟期的茎、叶、苞叶+穗轴与籽粒进行分样,105℃杀青30 min后70℃烘干至恒重后用电子天平称量干物质重。随后,植株样品磨粉并按照相同的处理和部位混匀过筛,采用浓H₂SO₄-H₂O₂对植株各器官进行消煮,用凯氏定氮仪测定全氮含量^[14]。

玉米各部位氮素转运量=吐丝期各部位氮素累积量-成熟期各部位氮素累积量 (3)

玉米各部位氮素转运率=各部位氮素转运量/成熟期各部位氮素累积量×100% (4)

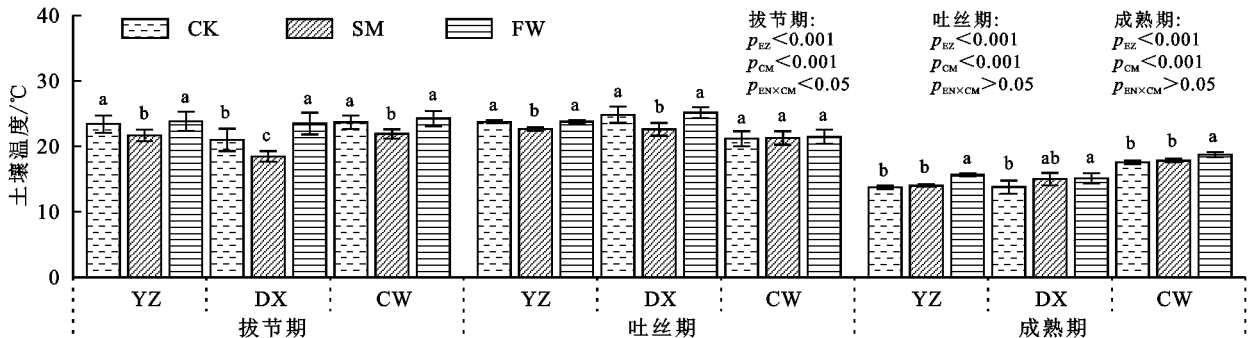
玉米各部位氮素转移贡献率=各部位氮素转运量/成熟期籽粒氮素累积量×100% (5)

氮素收获指数=籽粒氮素累积量/植株总吸氮量×100% (6)

1.3.4 产量及产量构成因素的测定 于成熟期,调查各小区的有效穗数,各小区选择连续的4行在收获后进行脱粒称重,按照14%含水量折算籽粒产量,并分别测量玉米穗粗、穗长、穗粒数和百粒重^[14]。

1.4 数据处理

使用Excel 2010进行数据整理和图形绘制,使



注:CK表示无覆盖处理;SM表示秸秆覆盖处理;FM表示地膜覆盖处理。YZ表示半干旱偏旱区;DX表示半干旱区;CW表示半干旱偏湿润区。同列数据后不同小写英文字母表示处理间差异显著。 p_{EZ} 、 p_{CM} 分别表示生态区和覆盖处理的显著性;显著水平为 $p<0.05, 0.01, 0.001$;不显著为 $p\geq 0.05$;下同。

图2 不同生态区覆盖方式对玉米生长季土壤温度的影响

Fig. 2 Changes in ground temperature at different periods of the growing season of maize in different dry cropping areas with different mulching methods

2.1.2 对土壤含水量的影响 如图3所示,受不同生态区不同降水量的影响,各处理土壤含水量时空动态变化规律存在差异,在吐丝期,各生态区平均土壤含水量总体表现为CW>YZ>DX,而在成熟期则表现为YZ>CW>DX。SM和FM处理均提高了0—200 cm的土壤平均含水量,且对0—100 cm土壤含水量影响更大,其中FM的增墒效果最大。在吐丝期,YZ,DX和CW的FM处理0—

用SPSS 27.0进行方差分析,用平均值和标准差表示测定结果。

2 结果与分析

2.1 不同生态区覆盖方式对土壤温度、水分和无机氮含量的影响

2.1.1 对土壤温度的影响 拔节期、吐丝期和成熟期的土壤温度如图2所示,各生态区拔节期土壤平均温度表现为CW>YZ>DX,吐丝期平均温度表现为DX>YZ>CW,成熟期平均温度表现为CW>DX>YZ。此外,不同覆盖方式显著影响土壤温度与CK相比,FM处理在YZ拔节期、吐丝期和成熟期的升温幅度为1.77%,0.11%和12.26%,在DX生态区升温幅度10.62%,1.35%和8.91%,在CW生态区升温幅度为2.34%,1.24%,6.20%。相比之下,SM处理明显降低了拔节期土壤温度,就YZ而言,在拔节期,SM处理比CK土壤温度下降了8.10%,DX和CW分别下降了13.74%和8.07%;同时SM较CK降低了YZ和DX吐丝期土壤温度,在YZ和DX分别下降了5.04%下降了9.80%,但在CW提高了0.53%。在成熟期,SM在YZ,DX和CW试验区较CK则分别增加了1.69%,8.08%和1.26%。这说明,随着生育期的推进,SM处理与其他处理的土壤平均温度差异逐渐减小,在后期气温下降时SM处理起到保温作用。

100 cm的土壤平均含水率较CK分别提高了30.93%,19.65%和16.15%,而SM处理下则分别提高了24.69%,9.62%和7.39%。在成熟期,YZ,DX和CW的FM处理0—100 cm的土壤平均含水率较CK分别提高了36.29%,15.62%和9.01%,而SM下则分别提高了31.08%,22.06%和9.95%。总体来看,FM的增墒效应要高于SM,且在降水量更小的生态区FM和SM的增墒效果更明显。

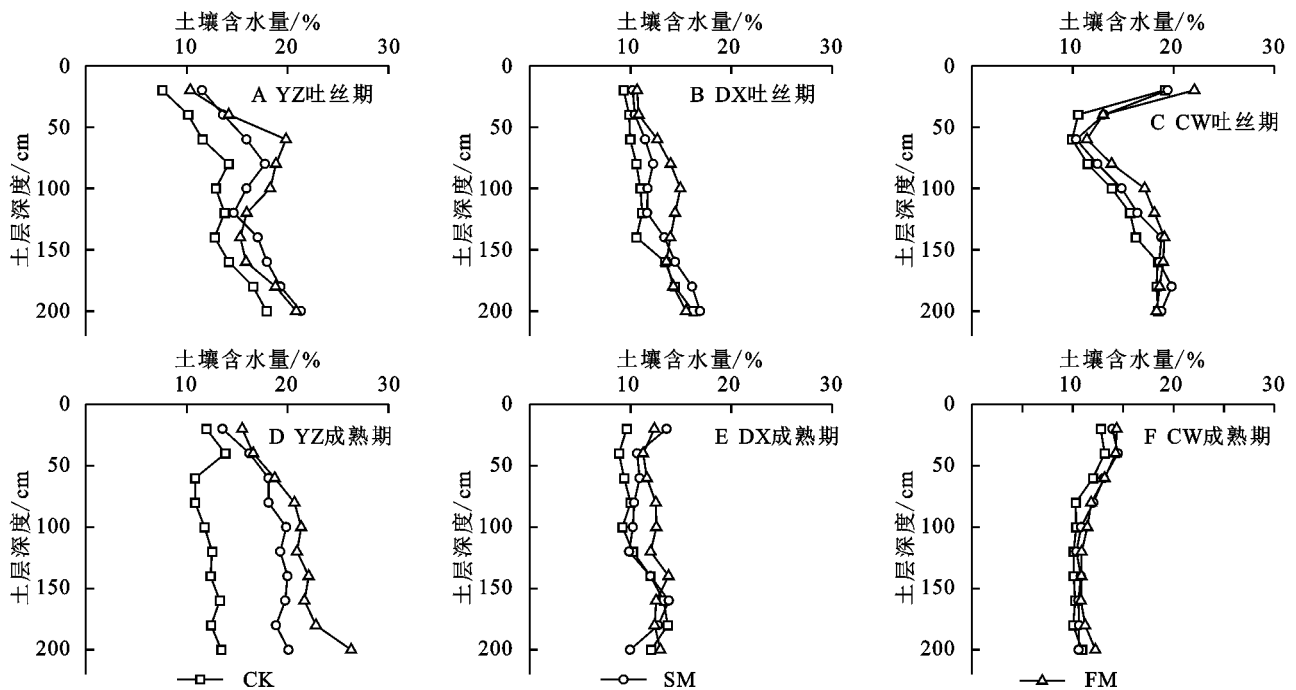


图 3 不同覆盖方式下不同生育期 YZ,DX 和 CW 土壤含水率的变化

Fig. 3 Changes in soil water content of maize by different mulching methods in Ecological areas

2.1.3 对土壤无机氮的影响 由图 4 可以看出,不同生态区、覆盖方式对吐丝期和成熟期土壤无机氮含量均有显著影响($p < 0.001$),且二者存在交互效应($p < 0.01$)。不同生态区之间吐丝期和成熟期的土壤无机氮含量差异显著,吐丝期与成熟期总体表现为 $CW > DX > YZ$ 。在吐丝期和成熟期不同覆盖方式间玉米土壤无机氮含量均差异显著。FM 处理下的土壤无机氮含量在各生态区表现最高,吐丝期在

YZ,DX 和 CW 较 CK 分别增加 27.41%,50.54%和 41.76%;成熟期在 YZ,DX 和 CW 较 CK 分别增加 35.60%,38.82%和 40.66%,差异均达到显著水平。SM 处理下的土壤无机氮含量在各生态区玉米吐丝期和成熟期均高于 CK,吐丝期在 YZ,DX 和 CW 较 CK 分别增加 11.72%,26.52%和 28.45%;成熟期在 YZ,DX 和 CW 较 CK 分别增加 12.81%,5.54%和 28.66%。

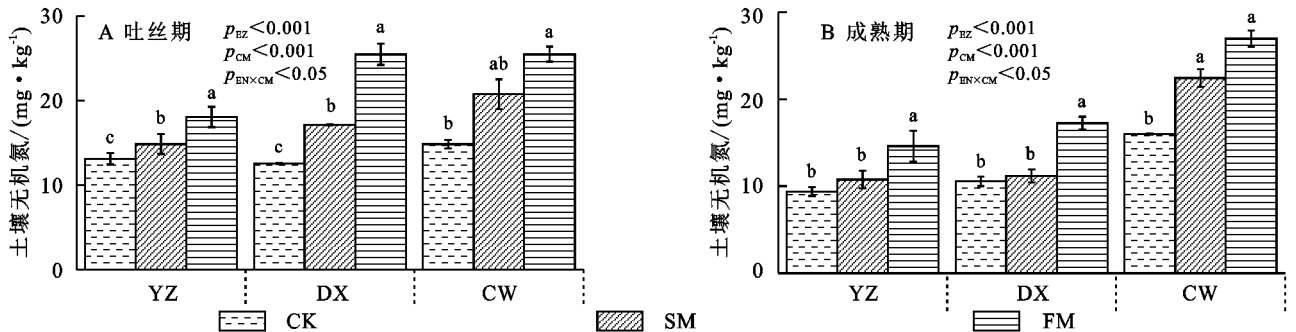


图 4 不同覆盖方式对吐丝期和成熟期土壤无机氮含量的影响

Fig. 4 Effect of different mulching methods on soil inorganic nitrogen at silking and maturity stages of maize in different Ecological areas

2.2 不同生态区覆盖方式对玉米农艺性状和干物质积累的影响

2.2.1 对玉米农艺性状的影响 由表 3 可知,不同生态区吐丝期的株高、茎粗和成熟期的株高、茎粗、穗位高和节数差异显著($p < 0.001$),各性状表现一致,总体表现为 $CW > YZ > DX$ 。不同覆盖方式之间吐丝期的株高、茎粗和成熟期的株高、穗位高差异显著($p < 0.05$),但成

熟期茎粗和节数无显著差异。FM 处理在吐丝期的株高、茎粗和成熟期株高、茎粗、穗位高、节数均高于 CK 处理,其中各生态区 FM 吐丝期的株高、茎粗和成熟期的株高与 CK 差异显著。SM 对各生态区的农艺性状有促进作用,吐丝期 SM 处理的茎粗在 CW 和 DX 与 CK 相比差异显著,但 SM 处理下吐丝期的株高和成熟期的株高、茎粗、穗位高、节数与 CK 相比无显著差异。

表 3 生态区不同覆盖方式对农艺性状的影响							
Table 3 Effect of different mulching methods on agronomic traits of maize at silking and maturity stages in different Ecological areas							
生态区	覆盖方式	吐丝期		成熟期			
		株高/cm	茎粗/mm	株高/cm	茎粗/mm	穗位高/cm	节数
YZ	CK	196.27±2.39b	16.81±1.71b	217.67±4.16b	19.29±0.33a	58.50±3.61a	11.67±1.53a
	SM	200.33±4.73b	19.22±1.98ab	224.00±7.00b	18.71±0.78a	67.33±14.68a	11.67±1.15a
	FM	230.00±2a	22.1±1.87a	240.33±3.79a	19.82±2.74a	71.17±15.73a	12.00±0.00a
	Ave.	208.87	19.38	227.33	19.27	65.67	11.78
DX	CK	177.33±6.43b	14.52±1.12b	184.33±8.50b	14.52±1.12a	48.33±2.82b	9.67±0.58b
	SM	180.33±7.57b	19.82±2.74a	197.00±11.27ab	15.70±2.56a	51.73±6.35b	10.67±0.00ab
	FM	212.33±9.07a	21.48±1.39a	206.33±10.21a	16.63±3.22a	62.67±1.53a	12.00±1.00a
	Ave.	184.44	18.61	195.89	15.62	54.24	10.78
CW	CK	217.67±4.16b	22.03±0.50b	277.33±10.21b	20.53±0.18a	97.83±11.47a	12.67±0.58a
	SM	224.00±7.00b	23.17±1.26a	279.17±6.45b	21.51±1.41a	102.67±10.21a	13.00±0.00a
	FM	254.67±8.39a	24±2.60a	296.50±7.70a	21.22±1.67a	116.01±13.23a	13.00±0.00a
	Ave.	232.11	23.07	284.33	21.09	105.50	12.89
生态区		***	***	***	***	***	***
变异来源	覆盖方式	***	*	*	ns	*	ns
	生态区×覆盖方式	*	ns	**	***	ns	*

注:CK 为无覆盖处理;SM 为秸秆覆盖处理;FM 为地膜覆盖处理。同列数据后不同小写英文字母表示处理间差异显著。*,**,*** 分别表示 $p<0.05,0.01,0.001$;ns 表示不显著, $p\geq0.05$;下表同。

2.2.2 对玉米干物质累积量的影响 由图 5 可以看出,不同生态区、覆盖方式对吐丝期和成熟期的干物质累积量均有显著影响($p<0.001$)。不同生态区之间吐丝期和成熟期的干物质累积量差异显著,吐丝期与成熟期总体均表现为 $CW>YZ>DX$ 。吐丝期和成熟期下不同覆盖方式间玉米的干物质累积量均差异显著。FM 处理下的干物质累积量含量在各生态区吐丝期和成熟期表现最高,吐丝期在 YZ,DX

和 CW 较 CK 分别增加 39.04%,37.46% 和 29.88%;成熟期在 YZ,DX 和 CW 较 CK 分别增加 20.12%,32.73% 和 16.09%,差异均达到显著水平。SM 处理下的干物质累积量在各生态区玉米吐丝期和成熟期均高于 CK,吐丝期在 YZ,DX 和 CW 较 CK 分别增加 18.49%,14.64% 和 4.54%;成熟期在 YZ,DX 和 CW 较 CK 分别增加 10.43%,22.91% 和 3.9%,差异均达到显著水平。

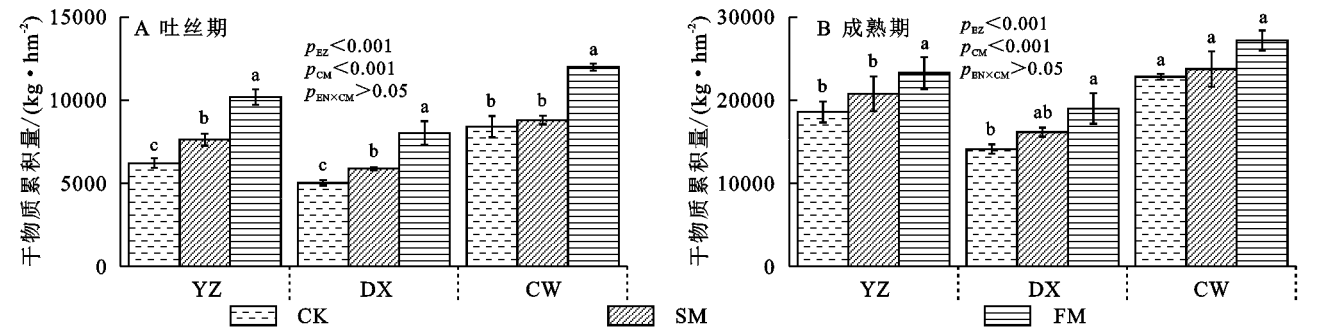


图 5 不同覆盖方式玉米吐丝期和成熟期干物质累积量的影响

Fig. 5 Effect of different mulching methods on dry matter quality of maize at silking and maturity stages in different Ecological areas

2.3 不同生态区覆盖方式对玉米氮素积累和分配的影响

2.3.1 氮素累积量与分配 由图 6 可以看出,不同生态区、覆盖方式对成熟期的氮素累积量有显著影响($p<0.001$)。不同生态区之间成熟期的氮素累积量差异显著,总体均表现为 $CW>YZ>DX$ 。不同覆盖方式间成熟期的氮素累积量均差异显著。FM 处理下的氮素累积量在各生态区成熟期均表现最高;FM

在 YZ,DX 和 CW 较 CK 分别增加 30.15%,25.36% 和 21.36%,差异均达到显著水平。SM 处理下的氮素累积量在各生态区玉米成熟期均高于 CK,成熟期在 YZ,DX 和 CW 较 CK 分别增加 22.52%,17.05% 和 9.85%,差异均达到显著水平。

不同生态区下成熟期各器官氮素分配比例基本一致。在成熟期,氮素分配主要分配在籽粒,分配比例占 59.31%~68.91%;其次是叶片、茎秆、苞叶+穗

轴。不同生态区间茎、叶氮素分配比例差异不显著,苞叶+穗轴和籽粒氮素分配比例在各生态区间差异显著($p < 0.05$),其中苞叶+穗轴氮素分配百分比表现为 $DX > YZ > CW$;籽粒氮素分配百分比表现为 $CW >$

$YZ > DX$ 。不同处理间茎、叶、籽粒的氮素分配比例在差异不显著,籽粒总体表现为 $FM > SM > CK$ 。苞叶+穗轴的氮素分配比例在各处理间有差异($p < 0.05$),表现为 $SM > CK > FM$ 。

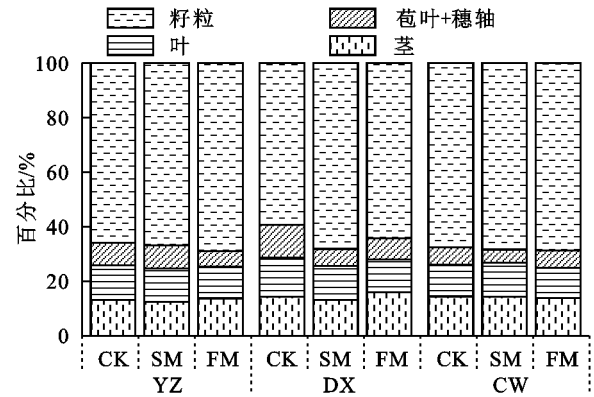
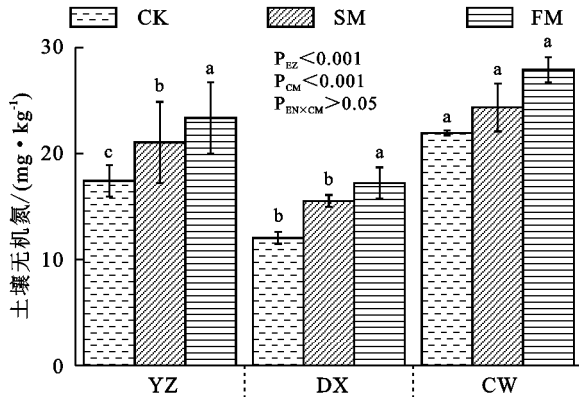


图 6 生态区不同覆盖方式对玉米成熟期氮素累积量的影响与玉米成熟期各器官氮素分配的影响

Fig. 6 Effect of different mulching methods on nitrogen accumulation at maturity of maize in Ecological areas and nitrogen partitioning among organs at maturity of maize

2.3.2 各器官氮素转运率和贡献率 由表 4 可知,各器官的氮素转运在不同生态区与不同覆盖方式下均存在显著差异。不同生态区不同覆盖方式下间的茎秆与叶片有稳定的物质转运,其中叶的转运量略高于茎。不同生态区茎和叶的氮素转运量差异显著($p < 0.001$),各生态区茎和叶的氮转运量总体表现为 $CW > YZ > DX$ 。不同覆盖方式对不同生态区下玉米的茎秆氮转运量、氮转运率和茎秆籽粒贡献率有显著差异($p < 0.05$)。在 YZ 生态区,不同覆盖方式下玉米茎秆氮转运量、氮转运率和茎秆籽粒贡献率有总体表现为 $FM > SM > CK$,但各处理间叶片氮转运量、氮转运率和叶片籽粒贡献率的差异不显著。在 CW 生态区,不同覆盖方式下茎秆氮转运量、氮转运率和茎秆籽粒贡献总体表现为 $FM > SM > CK$;叶片氮转运量、氮转运率和叶片籽粒贡献率表现为 $FM > SM > CK$,但各覆盖方式间差异不显著。在 DX 生态区,不同覆盖方式下玉米茎秆与叶的氮转运量、茎秆氮转运率和茎秆籽粒贡献率在 FM, SM 与 CK 间有显著差异,叶转运率和叶对籽粒的贡献率在各覆盖方式间差异不显著,总体表现为 $FM > SM > CK$ 。

2.4 不同生态区覆盖方式对玉米产量、氮素收获指数和水分利用效率的影响

2.4.1 对玉米产量的影响 由表 5 可知,不同生态区和不同覆盖方式的穗长、穗粗、穗粒数、百粒重和产量均有显著差异($p < 0.01$),且二者存在明显的交互效应($p < 0.001$)。总体而言,不同生态区下的整体产量为 CW 最高,其次为 YZ, DX 产量较前两个生态区低。同一地区不同覆盖方式下的产量差异显著($p < 0.001$)。YZ 生态区下 FM 的产量表现最佳,其次为

SM,但 SM 与 CK 间差异不显著;FM, SM 较 CK 分别增加 52.55% 和 5.29%。DX 生态区下 FM 的产量表现最佳,其次为 SM,其中 FM, SM 较 CK 分别增加 52.33% 和 9.81%。CW 生态区下 FM 的产量表现最佳,其次为 SM;FM, SM 较 CK 分别增加 34.90% 和 16.76%。不同生态区下不同覆盖方式间玉米的穗粒数和百粒重存在显著差异,是造成不同覆盖方式间产量差异的主要来源。不同生态区玉米产量差异受水热资源的影响,在水热条件更好的 CW 地区 FM 下的玉米产量有着更优良的产量表现,但 FM 对 DX 和 YZ 玉米产量的增益效果相对更优。

2.4.2 对玉米氮素收获指数和水分利用效率的影响 由表 6 可知,不同生态区间氮素收获指数、作物耗水量和水分利用效率有显著差异($p < 0.05$)。各生态区的氮素收获指数、作物耗水量总体均表现为 $CW > YZ > DX$,水分利用效率总体表现为 $CW > DX > YZ$ 。同时,不同覆盖方式下玉米的作物耗水量和水分利用效率量在各生态区有显著差异($p < 0.05$),但不同覆盖方式下玉米的氮素收获指数无显著差异。各生态区不同覆盖方式下的氮素收获指数总体均表现为 FM 处理较高,与 CK 相比在 YZ 生态区分别增加了 4.10%,在 DX 生态区分别增加了 6.91%,在 CW 生态区分别增加了 1.76%。FM 和 SM 处理增加了玉米的氮素的吸收,提高了籽粒的转运量,促进了氮素累积量和籽粒氮含量,从而导致氮收获指数要高于其他两个处理。同时,不同覆盖方式对的水分消耗显著。与 CK 相比,SM 与 FM 在不同生态区均提高了作物的水分利用效率,SM 在 YZ, DX 和 CW 较 CK 分别提高了 32.77%,

17.56%和 19.99%,FM 在 YZ,DX 和 CW 较 CK 分别提高了 70.58%,58.75%和 38.69%。不同生态区玉米氮收获指数和水分利用效率差异受水热资源的影响,CW 地区 FM 处理下的玉米氮收获指数和水分利用效率最高,但 FM 对 DX 地区玉米氮收获指数和 YZ 地区水分利用率较 CK 的增幅更明显。

表 4 不同覆盖方式对不同生态区玉米茎叶氮素转运的影响

Table 4 Effects of different mulching methods on nitrogen transport in maize stems and leaves in different ecological areas							
生态	覆盖方式	氮转移/(kg·hm ⁻²)		转运率		籽粒贡献率	
		茎	叶	茎	叶	茎	叶
YZ	CK	12.28±1.40c	22.14±2.62b	0.35±0.02b	0.50±0.04a	0.11±0.02b	0.19±0.02a
	SM	20.68±2.64b	30.04±2.26a	0.44±0.04ab	0.54±0.02a	0.15±0.02b	0.21±0.01a
	FM	35.14±3.96a	30.56±3.07a	0.52±0.08a	0.53±0.02a	0.22±0.03a	0.19±0.01a
	Ave.	22.70	27.58	0.44	0.52	0.16	0.20
DX	CK	8.29±4.07c	20.77±3.20b	0.32±0.13b	0.55±0.05a	0.12±0.08b	0.30±0.07a
	SM	20.04±3.88b	23.44±4.45ab	0.49±0.05a	0.55±0.05a	0.19±0.03ab	0.22±0.04a
	FM	28.89±1.75a	28.05±1.73a	0.51±0.02a	0.57±0.02a	0.26±0.03a	0.26±0.04a
	Ave.	19.07	24.09	0.44	0.55	0.19	0.26
CW	CK	17.31±0.82c	34.79±3.47b	0.36±0.02b	0.58±0.01a	0.12±0.01b	0.23±0.01a
	SM	29.14±2.57b	44.95±5.02a	0.46±0.03b	0.60±0.04a	0.18±0.06b	0.27±0.05a
	FM	56.75±3.41a	47.13±4.38a	0.60±0.02a	0.60±0.03a	0.30±0.07a	0.25±0.06a
	Ave.	34.40	42.29	0.47	0.59	0.20	0.25
变异来源	生态区	* * *	* * *	ns	* *	ns	*
	覆盖方式	* * *	* * *	* * *	ns	* * *	ns
	生态区×覆盖方式	* * *	ns	*	ns	ns	ns

表 5 不同覆盖方式对不同生态区玉米产量及其构成的影响

Table 5 Effect of different mulching methods on maize yield and its composition in different ecological areas						
生态区	覆盖方式	穗粗/cm	穗长/mm	穗粒数	百粒重/g	产量/(kg·hm ⁻²)
YZ	CK	17.55±0.62b	44.85±1.31b	418.00±34.56b	24.17±0.77c	4663.05±135.95b
	SM	20.90±1.01a	47.64±0.75a	449.94±55.36b	26.39±0.46b	4923.23±454.76b
	FM	21.13±0.6a	48.41±1.58a	608.22±65.66a	29.84±0.63a	9827.16±414.01a
	Ave.	19.86	46.97	491.92	26.80	6471.17
DX	CK	16.32±0.38b	42.23±2.05b	343.94±38.03b	24.36±0.89b	3825.20±195.0b
	SM	16.72±0.75b	40.64±1.37b	367.89±71.57b	30.12±0.68a	4240.60±258.2b
	FM	17.83±1.03a	45.06±0.63a	527.44±44.69a	29.38±0.71a	8025.00±284.3a
	Ave.	16.96	42.45	413.28	27.95	5363.6
CW	CK	20.27±0.4c	49.02±1.83b	658.33±61.12b	25.28±0.68b	9637.20±752.9b
	SM	21.87±0.38b	51.81±1.02a	696.22±50.2b	26.38±1.09b	11578.20±428.9b
	FM	22.87±0.54a	52.83±1.51a	812.00±74.79a	35.37±2.79a	14802.6±422.1a
	Ave.	21.67	51.22	721.89	29.03	12006.0
变异来源	生态区	* * *	* * *	* * *	* *	* * *
	覆盖方式	* * *	* * *	* * *	* * *	* * *
	生态区×覆盖方式	* * *	* * *	* * *	* * *	* * *

3 讨论

3.1 生态区下不同覆盖方式对土壤环境的影响

自然降水是西北旱地作物的主要补给,降水量的大小对于作物生长与土壤水分的转运有决定性的作用。在本研究中,CW 和 YZ 地区的土壤含水率较 DX 地区显著增高,这一现象可以归因于各生态区之间存在明显的降水分布差异(图 1)。特别是 YZ 地区

土壤含水率升高是由于该地区 8—10 月份的降水量为 304.6 mm,远高于 2021 年(降水量 52mm)且这一时期温度逐渐下降,蒸发量随大气温度下降而逐渐降低,导致土壤水分有所提高。此外,秸秆覆盖和地膜覆盖无论是在 YZ,DX 还是 CW 都能够显著增加 0—100 cm 土层土壤平均含水量,其中 FM 效果最佳。地膜覆盖为全封闭覆盖,能够有效阻断大气与膜下水分的流通,抑制土壤水分的蒸发,而秸秆覆盖为半封

闭式覆盖,其蒸散程度比地膜覆盖高,更有利于雨水下渗至更深土层^[16]。本研究结果还表明,DX 覆盖的保水效果要高于 CW,这是因为在降水较少的生态区,覆盖措施可增加土壤对降水的蓄纳能力,有效减小水分的地表径流,提高降水利用率^[17]。对于土壤温度,与 CK 相比,FM 在 3 个生态区玉米各生育期具有普遍的增温效应,SM 在拔节和吐丝期具有降温

效应,在成熟期具有升温效应,这与吴杨的研究结果相似^[18]。FM 能加快玉米花前土壤有机物与无机物的矿化,提高土壤肥力,促进根系养分吸收,进而加快玉米生育进程^[19]。秸秆覆盖能使外界环境对土壤的影响减弱,土壤温度变化幅度较小,使土壤温度基本保持在适宜根系发育的水平,有利于协调营养生长和生殖生长阶段的养分吸收^[13]。

表 6 不同覆盖方式对不同生态区玉米氮素收获指数、农田耗水量及水分利用效率的影响

Table 6 Effect of different mulching methods on maize nitrogen harvest index, on-farm water consumption and water use efficiency in different ecological zones

生态区	覆盖方式	氮素收获 指数	农田耗水量/ mm	水分利用效率/ (kg·hm ⁻² ·mm ⁻¹)
YZ	CK	0.66±0.01c	539.47±19.73a	8.65±0.31c
	SM	0.67±0.02b	394.19±87.80ab	12.87±2.55b
	FM	0.69±0.02a	339.44±17.50b	29.40±4.62a
	Ave.	0.67	424.36	16.97
DX	CK	0.59±0.05b	338.41±13.54a	11.32±0.46c
	SM	0.68±0.01ab	310.07±22.24a	13.73±1.03b
	FM	0.64±0.01a	295.59±35.74a	27.43±3.50a
	Ave.	0.64	314.69	17.49
CW	CK	0.68±0.02a	506.65±20.12a	19.04±0.76c
	SM	0.69±0.05a	486.69±11.16a	23.80±0.54b
	FM	0.69±0.03a	477.00±15.88a	31.06±1.03a
	Ave.	0.69	490.11	24.63
变异来源	生态区	*	* * *	* * *
	覆盖方式	ns	*	* * *
	生态区×覆盖方式	ns	ns	*

除了降水稀少,土壤肥力水平低下是影响西北地区作物生产力的另一重要因素。农田覆盖下,水热条件的改善能影响土壤养分释放。主要被植物吸收利用的氮素形态是无机氮,在本研究 3 个生态区中,FM 和 SM 与 CK 相比均显著提高了 0—20 cm 土壤无机氮含量。这是因为 FM 通过改善土壤水温条件,提高微生物的活性,进而加速了氮的矿化并减少了氮的挥发^[20]。同时地膜的阻碍导致水分渗入垄沟,增强水在地膜脊上的向上运动,使得土壤无机氮出现表聚现象^[21]。SM 增加了表层土壤的无机氮含量,秸秆被称为农田的“第二肥料”,是土壤氮素的重要来源,还田后秸秆可在微生物作用下释放出速效养分,还可通过影响土壤 pH 和微生物活性等,活化土壤中养分,使其能够被作物吸收利用^[13]。

3.2 生态区下不同覆盖方式对旱地玉米氮素累积、转运与水氮利用效率的影响

作物的生产力取决于同化物在各器官的分布,吐丝前玉米氮素主要集中在茎与叶中,但在吐丝后氮素会逐渐向生殖器官转移,而吐丝后氮素的转移主要以叶片为主^[10]。本研究结果表明,吐丝后玉米茎与

叶的氮素不断向籽粒转运,且叶的转运率最高,达 50%~60%。在玉米各器官的氮素分配中,籽粒分配比例达 60.35%~68.91%,其他器官的氮素分配大小依次为:茎、叶、苞叶+穗轴,这与历艳璐等的研究结果相一致^[22]。DX 生态区下 FM 和 SM 较 CK 的籽粒氮素分配增加更明显,这可能是干旱加剧了籽粒氮代谢酶活性的抑制程度,导致硝酸还原酶和谷氨酰胺合成酶活性显著降低,这意味着植株对氮素吸收减少,从而限制了源活性和同化物对籽粒的供给^[23]。

玉米花后氮素累积量与地上部不同器官氮素累积量紧密相关,而地膜覆盖和秸秆覆盖等均可促进玉米地上部氮素吸收效,促进吐丝后氮素累积量^[11]。本研究结果表明,在不同生态区下 SM 和 FM 处理均能提高玉米的氮素累积量,其中 FM 处理的效果最佳,可能是因为覆盖下较高的固氮微生物丰度与土壤酶活性也可进一步提高土壤氮素有效性,提高土壤供氮能力,从而促进植株对土壤氮素的吸收^[24]。说明合理的覆盖能降低水分限制效应,进而增加作物对土壤水分和氮素的吸收与利用,提高水氮利用效率。本试验结果还表明,FM 与 SM 处理为玉米生长提供较

充足的水分,使得氮收获指数和水分利用效率提高,其中CW生态区下FM处理效果最佳,这是因为较高的降水量能促进土壤中氮素的溶解和转移,促进玉米吸收利用氮素,进而提高玉米的吸氮量^[18]。

3.3 生态区下不同覆盖方式对旱地玉米干物质累积与产量的影响

本研究结果表明,CW和YZ的玉米干物质累积量在吐丝期和成熟期要高于DX,产量及相关构成因素也呈现显出相同的趋势。充足的土壤水分是保证旱地氮肥充分发挥肥效的重要因素,然而YZ降水量虽然高于CW,但是其干物质累积量和产量均低于CW。这是由于榆中地区的85.3%的降水量集中在7—8月两个月,极端降水存在导致降水量增加,但大部分降水以地表径流的形式流失^[25]。同时连阴雨、暴雨洪涝会降低玉米开花期的授粉率,对玉米的生长发育造成严重影响进而影响产量^[26]。CW相对于其他两个旱区,玉米需水期(拔节—抽穗)的降水量充足。良好的水热环境保证了吐丝前后受精的小花数,提高受精结实率,为提高穗数奠定了基础^[24]。

覆盖处理能增加玉米的农艺性状,促进干物质累积,而干物质累积是密切影响玉米产量的物质基础,干物质累积量的大小与产量呈正相关。本研究结果表明,在不同生态区FM处理均能提高玉米吐丝期和成熟期的株高、茎粗,促进吐丝后干物质累积量,从而影响穗长、穗粗、百粒重和穗粒重,最终实现玉米增产。SM能提高干物质累积量,改善玉米农艺性状,对产量有促进作用,但在DX,YZ与无覆盖处理差异不显著,原因可能是SM下拔节期和吐丝期明显的降温效应延迟了玉米的生育期(图2),导致玉米营养生长不够充分,而在吐丝后期SM能增加干物质累积量,但向籽粒运转和分配的比例不高,最终导致SM对产量的影响较弱。相反,FM处理在玉米生长前期能提高土壤温度,保证玉米种子萌发和生长,推进了生育期。出苗期的缩短有利于玉米避免干旱、霜冻等不利环境状况,进而促进籽粒形成,达到增产目的^[27]。此外,在3个生态区中,DX和YZ下的FM增产幅度大于CW(表5),可能是因为降水比较充足的地区水分亏缺并不是产量提升主要限制因素,因而地膜覆盖较露地种植的增产优势有所降低^[28]。相反,CW下SM增产幅度大于DX和YZ,这是因为在水热条件好的环境中秸秆腐解较快^[29],改善了土壤的通透性和保水保肥性,而在水热条件较差的环境下,秸秆腐解造成微生物与植株竞争水分,加重植株的水分胁迫,不利于植株生长及产量形成^[16]。有研究表明,秸秆带状覆盖的投入成本和人工成本均低于

地膜覆盖,可显著增加产投比^[30]。因此降水量较高的地区使用秸秆覆盖模式,综合效益更高。

4 结论

水热条件更好的半干旱偏湿润区能为作物生长提供良好的水热环境,在促进玉米生长与养分吸收的同时提高水分利用效率和收获指数进而提高产量。在不同的生态区下,地膜覆盖能通过改善土壤温度、增加水分含量与土壤表层无机氮含量,促进玉米干物质累积的同时也促进玉米的氮素吸收、转运和分配,进而达到提高水分利用效率、氮收获指数和增产稳产的效果,其中半干旱偏湿润区产量最高,但在半干旱偏旱区相对CK增幅更明显。秸秆覆盖降低了拔节期和吐丝期的土壤温度,但在后期有保温作用。秸秆覆盖同时能提高土壤水分含量和表层无机氮含量,改善玉米干物质累积、玉米的氮素吸收、转运和分配从而改善玉米产量,但产量与无覆盖处理无显著差异,但秸秆覆盖在半干旱偏湿润区增产效果要优于半干旱区和半干旱偏旱区。

参考文献(References):

- [1] 孙瑞东,李艺萌,黄然,等.基于高世代姊妹系发掘玉米穗长性状QTL及候选基因[J].植物遗传资源学报,2024,25(2):270-278.
Sun R D, Li Y M, Huang R, et al. QTL Mapping and Candidate Genes Analysis for Ear Length in Maize Population Derived from High-Generation Sister Lines[J]. Journal of Plant Genetic Resources, 2024,25(2):270-278.
- [2] 中国国家统计局.中国农村统计年鉴[M].北京:中国统计出版社,2019.
National Bureau of Statistics of China. China Rural Statistical Yearbook[M]. Beijing: China Statistics Press 2019.
- [3] Peng S Z, Gang C C, Cao Y, et al. Assessment of climate change trends over the Loess Plateau in China from 1901 to 2100[J]. International Journal of Climatology, 2018, 38(5):2250-2264.
- [4] Yu Y Y, Turner N C, Gong Y H, et al. Benefits and limitations to straw- and plastic-film mulch on maize yield and water use efficiency: A meta-analysis across hydrothermal gradients[J]. European Journal of Agronomy, 2018,99:138-147.
- [5] Gan Y T, Siddique K H M, Turner N C, et al. Ridge-Furrow Mulching Systems: An innovative technique for boosting crop productivity in semiarid rain-fed environments[M] // Advances in Agronomy. Amsterdam: Elsevier, 2013:429-476.
- [6] 王泽林,白炬,李阳,等.氮肥施用和地膜覆盖对旱作春玉米氮素吸收及分配的影响[J].植物营养与肥料学报,2019,25(1):74-84.
Wang Z L, Bai J, Li Y, et al. Effects of nitrogen appli-

- cation and plastic film mulching on nitrogen uptake and allocation in dry-land spring maize[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2019, 25(1):74-84.
- [7] 张金瑞,任思洋,戴吉照,等.地膜对农业生产的影响及其污染控制[J].*中国农业科学*, 2022, 55(20):3983-3996.
- Zhang J R, Ren S Y, Dai J Z, et al. Influence of plastic film on agricultural production and its pollution control[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2022, 55(20):3983-3996.
- [8] 王永亮,胥子航,李申,等.秸秆还田与花后灌溉提高春玉米产量及水氮利用效率[J].*中国农业科学*, 2023, 56(18):3599-3614.
- Wang Y L, Xu Z H, Li S, et al. Straw returning and post-silking irrigating improve the grain yield and utilization of water and nitrogen of spring maize[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2023, 56(18):3599-3614.
- [9] 何浩,张宇彤,危常州,等.不同有机替代减肥方式对玉米生长及土壤肥力的影响[J].*水土保持学报*, 2019, 33(5):281-287.
- He H, Zhang Y T, Wei C Z, et al. Effects of different organic substitution reducing fertilizer patterns on maize growth and soil fertility[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2019, 33(5):281-287.
- [10] 高亚军,李生秀.旱地秸秆覆盖条件下作物减产的原因及作用机制分析[J].*农业工程学报*, 2005, 21(7):15-19.
- Gao Y J, Li S X. Cause and mechanism of crop yield reduction under straw mulch in dryland[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2005, 21(7):15-19.
- [11] 张冬梅,池宝亮,黄学芳,等.地膜覆盖导致旱地玉米减产的负面影响[J].*农业工程学报*, 2008, 24(4):99-102.
- Zhang D M, Chi B L, Huang X F, et al. Analysis of adverse effects on maize yield decrease resulted from plastic film mulching in dryland[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2008, 24(4):99-102.
- [12] Wang N J, Ding D Y, Malone R W, et al. When does plastic-film mulching yield more for dryland maize in the Loess Plateau of China? A meta-analysis[J]. *Agricultural Water Management*, 2020, 240:106290.
- [13] 杏东,强世军.甘肃省不同旱作区全膜双垄沟播玉米增产效果研究[J].*甘肃农业科技*, 2009(8):9-12.
- Xing D, Qiang S J. Effects of ditch sowing in corn double ridge mulched with plastic films in different dryland areas of Gansu[J]. *Gansu Agricultural Science and Technology*, 2009(8):9-12.
- [14] 鲍士丹.土壤农化分析[M].北京:中国农业出版社,1999.
- Bao S D. *Soil and Agricultural Chemistry Analysis* [M]. Beijing: China Agriculture Press, 1999.
- [15] 汝晨,胡笑涛,吕梦薇,等.花后高温干旱胁迫下氮素对冬小麦氮积累与代谢酶、蛋白质含量及水氮利用效率的影响[J].*中国农业科学*, 2022, 55(17):3303-3320.
- Ru C, Hu X T, Lü M W, et al. Effects of nitrogen on nitrogen accumulation and distribution, nitrogen metabolizing enzymes, protein content, and water and nitrogen use efficiency in winter wheat under heat and drought stress after anthesis[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2022, 55(17):3303-3320.
- [16] 祝晨佳,高吉喜.土壤蒸发影响因素及抑制途径研究综述[J/OL].*环境保护科学*, <https://kns.cnki.net/kcms2/detail/21.1135.X.20230802.1615.002.html>
- Zhu C J, Gao J X. A review of the factors affecting soil evaporation and its inhibition methods[J/OL]. *Environmental Protection Science*, <https://kns.cnki.net/kcms2/detail/21.1135.X.20230802.1615.002.html>.
- [17] 李丹,王翻龙,张龙,等.不同降水年型下耕作结合秸秆覆盖对马铃薯耗水特征及产量的影响[J].*水土保持学报*, 2023, 37(2):275-286.
- Li D, Wang F L, Zhang L, et al. Effect of tillage combined with straw mulching on water consumption characteristics and yield of potato under different precipitation years[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2023, 37(2):275-286.
- [18] 吴杨.黄土高原不同覆盖种植技术对农田水温效应及玉米生长的影响[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2016.
- Wu Yang. The Effects of different mulching patterns on soil water temperature and maize growth in Loess Plateau areas. [D]. Yanling, Shaanxi: Northwest A&F University, 2016.
- [19] 郭升.黄土高原旱地垄作覆膜土壤氮素累积运移过程与去向研究[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2018.
- Guo S. The Accumulation and Migration and Fate of Soil Nitrogen in Drylands under Plastic Film Mulching on Loess Plateau [D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A & F University, 2018.
- [20] Recous S, Aita C, Mary B. *In situ* changes in gross N transformations in bare soil after addition of straw[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1998, 31(1):119-133.
- [21] Recous S, Aita C, Mary B. *In situ* changes in gross N transformations in bare soil after addition of straw[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1998, 31(1):119-133.
- [22] 历艳璐,王俊鹏,于欣志,等.冷凉区不同地膜覆盖对玉米干物质和氮素积累与分配的影响[J].*作物杂志*, 2022(5):124-129.
- Li Y L, Wang J P, Yu X Z, et al. Effects of mulching different plastic films on accumulation and distribution of dry matter and nitrogen in maize in cold and cool areas[J]. *Crops*, 2022(5):124-129.
- [23] 翟勇全,马琨,贾彪,等.不同降水年型滴灌玉米土壤硝态氮分布、淋失量及氮素吸收利用特征[J].*中国生态农业学报(中英文)*, 2023, 31(5):765-775.
- Zhai Y Q, Ma K, Jia B, et al. Soil nitrate-N distribution, leaching loss and nitrogen uptake and utilization of maize

- under drip irrigation in different precipitation years[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2023,31(5):765-775.
- [24] 尉亚因,薄其飞,唐安,等.长期覆膜和施用有机肥对黄土高原春玉米产量和品质的效应[J].中国农业科学, 2023,56(9):1708-1717.
- Wei Y N, Bo Q F, Tang Ao, et al. Effects of long-term film mulching and application of organic fertilizer on yield and quality of spring maize on the Loess Plateau[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2023,56(9):1708-1717.
- [25] 张丽华,徐晨,闫伟平,等.半干旱区地表覆盖方式对土壤水温效应及玉米产量的影响[J].干旱地区农业研究, 2023,41(2):179-192.
- Zhang L H, Xu C, Yan W P, et al. Effects of surface mulching on soil water and temperature efficiency and maize yield in semi-arid area[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2023,41(2):179-192.
- [26] 杨建军.旱地覆盖措施对玉米和甘草生产及土壤肥力的影响[D].兰州:兰州大学,2023.
- Yang J J. Effects of mulching measures on maize and licorice production and soil fertility in the dryland[D]. Lanzhou:Lanzhou University, 2023.
- [27] 张森昱,冯雨露,马建涛,等.不同降水年型下秸秆带状覆盖对西北旱地马铃薯品质和产量的影响[J].干旱地区农业研究, 2023,41(5):207-216.
- Zhang S Y, Feng Y L, Ma J T, et al. Effects of straw strip mulching on potato tuber quality and yield in the northwestern dryland region under different hydrological year[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2023,41(5):207-216.
- [28] 周桂香,陈林,张丛志,等.温度水分对秸秆降解微生物群落功能多样性影响[J].土壤, 2015,47(5):911-918.
- Zhou G X, Chen L, Zhang C Z, et al. Effects of temperature and moisture on microbial community function responsible for straw decomposition[J]. Soils, 2015,47(5):911-918.
- [29] 张素瑜,杨习文,李向东,等.土壤水分对玉米秸秆还田腐解率、土壤肥力及小麦籽粒蛋白质产量的影响[J].麦类作物学报, 2019,39(2):186-193.
- Zhang S Y, Yang X W, Li X D, et al. Influence of soil moisture on decomposition of maize stalk, soil fertility and grain protein yield in winter wheat[J]. Journal of Triticeae Crops, 2019,39(2):186-193.
- [30] 张建恒,张益兴,侯赛赛,等.覆盖作物的效益及其合理选择的研究进展[J].农业工程学报, 2023,39(14):23-34.
- Zhang J H, Zhang Y X, Hou S S, et al. Research progress on benefits and rational selection of cover crops [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2023,39(14):23-34.

~~~~~

(上接第 175 页)

- [27] 刘艳华.区域土的液限和塑限的相关性分析[J].长江科学院院报, 2002,19(1):28-30.
- Liu Y H. Correlation analysis on liquid-plastic limit of regional soil[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2002,19(1):28-30.
- [28] 杨华,石辉,李卓,等.石油烃污染对土壤持水特征及水分有效性的影响[J].水土保持研究, 2022,29(3):142-146.
- Yang H, Shi H, Li Z, et al. Influence of petroleum hydrocarbon pollution on soil water holding characteristics and soil water availability[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2022,29(3):142-146.
- [29] Antinoro C, Bagarello V, Ferro V, et al. A simplified approach to estimate water retention for Sicilian soils by the *Ar,ya*-Paris model[J]. Geoderma, 2014,213:226-234.
- [30] 王艳玲,刘翠英,徐江兵,等.长期有机无机肥配施条件下的旱地红壤水分特征分析[J].土壤通报, 2015,46(2):334-340.
- Wang Y L, Liu C Y, Xu J B, et al. Soil moisture characteristics analysis of upland red soils as affected by the long-term application of organic-inorganic fertilization[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2015,46(2):334-340.
- [31] 邹文安,姜波,顾李华.土壤水分常数的测定[J].水文, 2015,35(4):62-66.
- Zou W A, Jiang B, Gu L H. Measurement of soil moisture constants[J]. Journal of China Hydrology, 2015,35(4):62-66.
- [32] Li R F, Wang Y P, Ji W J, et al. Water deficit limits soil organic carbon sequestration under old apple orchards in the loess-covered region[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2024,359:108739.
- [33] Zhang X C, Hou H Z, Fang Y J, et al. Can organic carbon and water supplementation sustain soil moisture-carbon balance under long-term plastic mulched semiarid farmland [J]. Agricultural Water Management, 2022,260:107303.
- [34] 王久龙,朱红凯,武斌.新疆典型土壤液塑限与土壤水分参数关系的实验研究[J].科技信息, 2012(14):37,40.
- Wang J L, Zhu H K, Wu B. Experimental study on the relationship between liquid plastic limit and soil moisture parameters of typical soils in Xinjiang [J]. Science & Technology Information, 2012(14):37,40.