

DOI:10.13870/j.cnki.stbxb.2024.06.027

杨赵昱,王静,吕雯,等.PBAT对盐碱地玉米根区土壤水盐及产量的影响[J].水土保持学报,2024,38(6):343-351.

YANG Z Y, WANG J, LÜ W, et al. Effects of PBAT on soil water and salt in maize root zone and maize yield in saline-alkali land[J].Journal of Soil and Water Conservation,2024,38(6):343-351.

PBAT 对盐碱地玉米根区土壤水盐及产量的影响

杨赵昱¹, 王 静^{1,2,3}, 吕 雯^{1,2,3,4}, 孙豪杰⁶, 任鸿武⁵, 马维薇¹, 侯嘉娜⁵

(1.宁夏大学生态环境学院,银川 750021;2.宁夏大学西北土地退化与生态系统恢复国家重点实验室培育基地,银川 750021;

3.宁夏大学西北退化生态系统恢复与重建教育部重点实验室,银川 750021;4.宁夏回族自治区黄河水联网数字治水

重点实验室,银川 750021;5.宁夏大学林业与草业学院,银川 750021;6.宁夏大学农学院,银川 750021)

摘 要: [目的] 为减少地膜导致的农田土壤污染,探明使用 PBAT 全生物可降解地膜代替普通 PE 地膜与滴灌结合在轻度次生盐化土壤滴灌种植玉米的应用效果。[方法] 于 2023 年 4—9 月在宁夏惠农区设置 PBAT 全生物可降解地膜(黑色、白色)、普通 PE 地膜(黑色)和无覆盖种植 4 个处理,以及 2 600,3 300,4 200 m³/hm² 3 个灌水量,探讨不同膜覆盖对土壤水盐运移和玉米生长的影响。[结果] 在 0—20 cm 土层黑色、白色全生物降解地膜的含水量较普通 PE 薄膜分别提高 18.87%,18.34%,较无覆盖分别提高 1.16%,0.72%,黑色、白色 PBAT 全生物降解地膜和普通 PE 薄膜土壤全盐含量较无覆盖地膜减少 15.01%~23.10% ($p<0.05$)。黑色全生物降解地膜产量较无覆盖在 2 600,3 300 m³/hm² 灌水条件下增加 11.88%~16.65%,在 4 200 m³/hm² 灌水条件下差异不显著;白色全生物降解地膜产量较无覆盖膜在 2 600 m³/hm² 灌水条件下提高 13.42%,在 3 300,4 200 m³/hm² 灌水条件下差异不显著。黑色、白色 PBAT 全生物可降解膜的水分利用效率较普通 PE 地膜分别提高 23.31%,13.50%;较无覆盖分别提高 37.63%,26.69%。[结论] PBAT 全生物降解地膜对次生盐渍化土壤的水盐运移及玉米产量有积极影响,可降解地膜替代普通地膜应用于引黄灌区盐碱地滴灌农业生产具有可行性。

关键词: 玉米; PBAT; 膜下滴灌; 水盐运移

中图分类号:X53

文献标识码:A

文章编号:1009-2242-(2024)06-0343-09

Effects of PBAT on Soil Water and Salt in Maize Root Zone and Maize Yield in Saline-alkali Land

YANG Zhaoyu¹, WANG Jing^{1,2,3}, LÜ Wen^{1,2,3,4}, SUN Haojie⁶,

REN Hongwu⁵, MA Weiwei¹, HOU Jiana⁵

(1. College of Ecology and Environment, Ningxia University, Yinchuan 750021, China; 2. Cultivation Base of National Key Laboratory of Land Degradation and Ecosystem Restoration in Northwest China, Ningxia University, Yinchuan 750021, China; 3. Restoration and Reconstruction of Degraded Ecosystem in Northwest China Point Laboratory, Ningxia University, Yinchuan 750021, China; 4. Key Laboratory of the Internet of Water and Digital Water Governance of the Yellow River in Ningxia, Yinchuan 750021, China; 5. College of Forestry and Prataculture, Ningxia University, Yinchuan 750021, China; 6. College of Agriculture, Ningxia University, Yinchuan 750021, China)

Abstract: [Objective] In order to reduce soil pollution caused by plastic film, the application effect of using PBAT fully biodegradable plastic film instead of ordinary PE plastic film combined with drip irrigation to grow maize in mild secondary salinized soil was investigated. [Methods] Comparative tests were conducted on four mulching treatments, including PBAT biodegradable film (black and white) mulching, ordinary black film mulching and open-field cultivated maize without mulching, under three irrigation conditions (2 600, 3 300 and 4 200 m³/hm²) from April to September 2023 in Xinghuocun Experimental Station, Huinong District, Ningxia, and there were 12 treatments in total. The degradability of degradable film and its effect

收稿日期:2024-06-17

修回日期:2024-08-13

录用日期:2024-08-19

网络首发日期(www.cnki.net):2024-12-10

资助项目:国家重点研发计划项目(2021YFD1900603);宁夏自然科学基金项目(2021AAC03042)

第一作者:杨赵昱(1999—),女,硕士,主要从事土壤、环境材料与化工研究。E-mail:agnesyuer@163.com

通信作者:吕雯(1979—),女,博士,副研究员,主要从事水土保持、水资源高效利用研究。E-mail:lv-wen@foxmail.com

<http://stbxb.alljournal.com.cn>

on soil water and salt transport and maize growth were studied. [Results] The water content in the 0—20 cm soil layer under black and white fully biodegradable mulch film was 18.87% and 18.34% higher than that under ordinary PE film, respectively, and 1.16% and 0.72% higher than that without mulching, respectively, and the soil salt content under black and white PBAT fully biodegradable film mulching and ordinary PE film mulching was reduced by 15.01%~23.10% compared with that without mulching ($p < 0.05$). Compared with the non-mulching conditions with 2 600 and 3 300 m³/hm² irrigation, the yield under black fully biodegradable film mulching increased by 11.88%~16.65%, but the difference was not significant under the irrigation condition of 4 200 m³/hm². Compared with the yield of 2 600 m³/hm² irrigation without mulching, the yield of white fully biodegradable film mulching increased by 13.42% under irrigation conditions, but there was no significant difference under 3 300 and 4 200 m³/hm² irrigation conditions. The water-use efficiency of black and white PBAT fully biodegradable film mulching was increased by 23.31% and 13.50% respectively compared with ordinary PE film mulching. Compared with no-mulching, it increased by 37.63% and 26.69% respectively. [Conclusion] The study suggests that it is feasible to replace ordinary mulch film with degradable mulch film in drip irrigation agricultural production in saline-alkali lands in the irrigation areas along the Yellow River.

Keywords: maize; PBAT; subsurface drip irrigation; water and salt migration

Received: 2024-06-17

Revised: 2024-08-13

Accepted: 2024-08-19

Online(www.cnki.net): 2024-12-10

土地盐碱化问题日渐严重^[1],灌溉方式不当则会伴随产生严重的土壤次生盐渍化问题^[2],制约灌区农业的可持续发展^[3-4]。膜下滴灌是防控灌区土壤次生盐渍化、提高作物产量和水分利用效率的有效途径,而传统聚乙烯(PE)地膜难回收、易降低土壤的透气性,造成土壤和环境污染问题^[5],全生物可降解地膜(PBAT)在自然环境条件下可降解,近年来有望替代普通 PE 地膜,解决地膜残留污染问题。玉米(*Zea mays* L.)作为宁夏引黄灌区的传统种植作物,农业生产中发挥着重大作用,随着黄河来水的逐年减少,在有限的水、土壤次生盐渍化的低承载力下,利用可降解膜下滴灌技术,结合传统种植作物,采用减少田间无效蒸发,调控耕层水盐的无污染环保种植方式,对推动农业可持续发展有重要意义。

PBAT 全生物可降解地膜由于其可生物降解特性,其保水性通常低于 PE 地膜^[6],盐分运移规律也有异于 PE 地膜,但是农艺性能优于 PE 地膜^[7]。滴灌条件下土壤水分、盐分的运移规律的试验研究,是正确设计滴灌系统和对田间作物根系土壤水盐进行精准管理的前提和基础。前人^[8]研究表明,膜下滴灌的灌溉水主要影响浅部 0—60 cm 土层,覆膜处土壤水分高于未覆膜的裸土处,盐分累积主要集中在 40—45 cm 土层;膜下滴灌土壤盐分随水分运移明显,土壤盐分分布受水分蒸发和灌溉水浸润区范围的影响;覆膜滴灌技术有利于水分入渗和减少蒸发,进而有助于表层土壤盐分的淋洗,抑制盐分向土壤表层累积,为作物提供较好的水盐环境,促进玉米的正常生长。在作物生长过

程中,可降解膜的覆盖对土壤水盐与作物产量的影响存在一定规律,不同覆盖对作物根区土壤水分动态和盐分运移存在的影响差异较大。在玉米的不同生长阶段,同一处理相同土层的土壤全盐含量和含水量通常呈同高或同低的趋势,在南疆次生盐碱地的 PBAT 全生物可降解地膜滴灌下作物产量较 PE 地膜增加。探究玉米田间耗水比较发现,覆膜滴灌下玉米全生育期的耗水量显著减少^[9],而在相同种植密度条件下,适宜地降低灌溉量不显著降低玉米的产量,反而降低水分蒸散量,进而提高水分利用效率^[10]。

玉米是宁夏扬黄灌区的传统种植作物,农业生产中发挥着重大作用,对引黄灌区次生盐碱地玉米的研究与应用主要集中在普通 PE 地膜,传统 PE 膜下水盐运移和作物生长影响已取得一定的阶段性成果,为下一步开展可降解膜下滴灌水分盐分运移的定性定量研究提供理论与实践基础。而采用 PBAT 全生物可降解地膜覆盖下的研究尚不完善,水盐在地膜随作物生长周期逐渐降解下的运移过程及作物产量响应方面相对还较薄弱,还有待于在不同地点不同类型尤其高蒸发低降水引黄典型次生盐碱土壤上进行更深入的研究。本研究设置 PBAT 全生物可降解膜覆盖与普通 PE 地膜和无覆盖的田间小区对比试验,通过监测作物根区土壤水盐动态变化及作物产量,旨在研究 PBAT 全生物可降解膜在不同灌水量条件下随着地膜逐步降解的土壤水盐运移动态过程及产量的响应,以为优化各个地区不同的灌水技术指标,提高引黄灌区水资源的利用和可持续发展提供有效的理

论支持与技术支撑,为 PBAT 全生物可降解膜在农业中的推广与应用提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验区位于宁夏回族自治区石嘴山市惠农区礼和乡星火村试验基地(39°05′06″—39°05′57″N,106°47′27″—106°48′25″E),属典型的温带半干旱大陆季风气候(图 1)。平均海拔 1 087 m,多年平均气温 4~17 ℃,年平均降水量 176 mm(图 2)。年日照时间 142 天,无霜期 150 天。试验地土壤为引黄灌区轻中度次生盐碱化土壤,pH 为 8.4~8.7,全盐含量 1.65~2.16 g/kg,土壤田间持水量为 23.68%,土壤质量密度为 1.51 g/cm³,土壤类型主要为中度灌淤土和潮土,该区主要种植作物有玉米、小麦、苜蓿等。

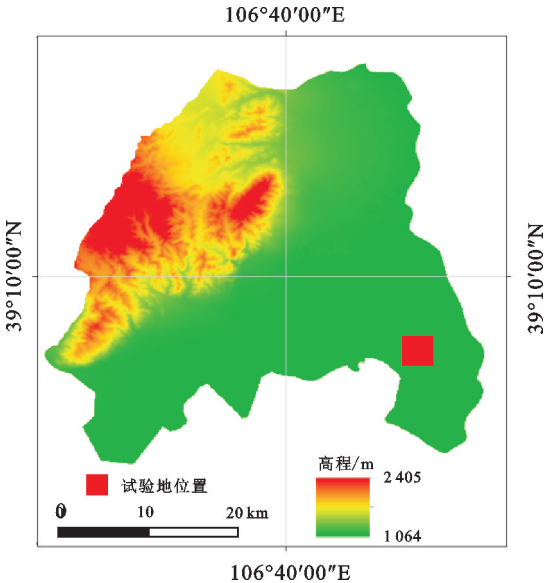


图 1 研究区位置

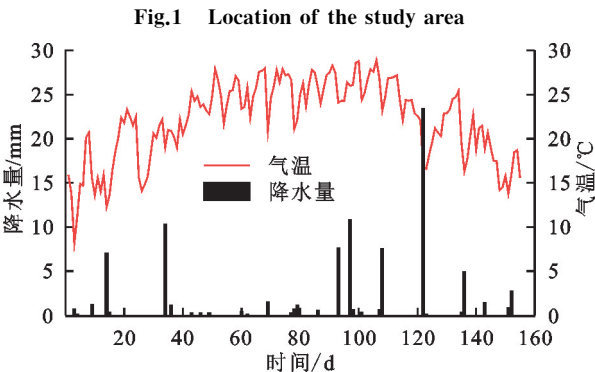


图 2 作物生育期内日平均气温和降水量

Fig.2 Daily average temperature and precipitation during the crop growth period

1.2 试验设计

试验于 2023 年 4—10 月在宁夏惠农区星火村试验站进行,采用双因素全排列随机区组试验设计,以“先玉 1225”玉米为试验材料,试验设置无覆盖(T1)、

PBAT 黑膜(T2)、PBAT 白膜(T3)、普通 PE 黑膜(T4) 4 个覆盖处理和 4 200(W1),3 300(W2),2 600 m³/hm² (W3)3 个灌水量水平。设计依据为当地滴灌灌水量水平的 120%,100%,80%,分 10 次进行灌溉,具体灌溉制度见表 1。共设 12 个处理,3 次重复,总计 36 个小区,每个小区面积为 66 m²(12.0 m×5.5 m)。播种前随旋耕施入基肥,尿素 200 kg/hm²、磷酸二铵 400 kg/hm²、氯化钾 125 kg/hm²。在拔节期、大喇叭口期、开花期和灌浆期随灌水追肥 1 次,追施尿素 40 kg/hm²,合计 N、P₂O₅ 和 K₂O 用量分别为 238,184,75 kg/hm²。滴灌带按照“一带两行”的方式铺设,滴灌带滴头间隔 25 cm。试验区四周设有 2 m 宽的保护行,相邻小区设有 1 m 宽的水分隔离带。试验前期进行采用试验地土壤的室内盆栽耐盐品种筛选苗期试验,已从 21 个品种中筛选出适合本地耐盐的玉米品种“先玉 1225”作为试验供试品种。玉米采用滴灌水肥一体化种植,行距 60 cm,种植密度 82 459 株/hm²。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 土壤含水量 采用烘干法测定土壤质量含水量。玉米播种后,在每个小区中心位置选取 2 行玉米中间作为采样区域,在距离滴灌带出水口相等的 2 株玉米中点位置进行采样。使用土钻依次钻取 0—20, 20—40,40—60 cm 土层,于作物生育关键期(苗期、拔节期、大喇叭口期、抽雄期、灌浆期和成熟期)每间隔 10~14 天测定土壤质量含水量,并在灌溉前后加测,共取样 13 次。样品置于 105 ℃ 恒温烘箱中烘烤至恒定质量,待冷却至室温后称重测定。

1.3.2 土壤全盐含量 采用电导率仪法测定电导率 EC_{1:5} 表征各土层土层全盐含量。所有取样方法及时间同上文;测定方法为:将土壤样品风干,磨碎,过 1 mm 筛后,按 1:5 的土水比混合振荡 30 min、静置 60 min 后,使用漏斗、滤纸过滤提取上清液,用 DDS-308 电导率仪速测 EC_{1:5} 值。

1.3.3 干物质测定 在玉米苗期(2023 年 5 月 13 日)、拔节期(2023 年 5 月 27 日)、大喇叭口期(2023 年 7 月 2 日)、花粒期(2023 年 7 月 12 日)、乳熟期(2023 年 8 月 23 日)、蜡熟期(2023 年 9 月 10 日)、完熟期(2023 年 9 月 23 日),每个小区选取长势一致、叶片无病斑和破损的 3 株植物样本,取地上部分,烘箱 105 ℃ 杀青 60 min,85 ℃ 烘至恒定质量,利用烘干法测定地上部分干物质质量。

1.3.4 产量测定 在完熟期,选取去除小区边行范围内的所有植株进行籽粒产量(kg/hm²)和生物产量(kg/hm²)的测定,作物的籽粒在自然条件下风干后

测定其最终产量。作物收获后,在每个小区随机选取 10 穗玉米,记录每穗玉米的行粒数(粒)、千粒重(g)、单穗重(g)等。收获指数(HI)的计算为籽粒产量(kg/hm²)与生物产量(kg/hm²)之比。

表 1 不同处理春玉米灌水方案

处理		灌水方案										合计
		4月26日	5月15日	5月25日	6月10日	6月20日	7月11日	7月22日	8月2日	8月16日	8月26日	
W1	1 050	200	220	300	320	350	420	420	350	350	220	4 200
W2	1 050	160	160	230	240	270	340	290	250	170	140	3 300
W3	1 050	130	120	130	130	180	180	170	140	90	80	2 400

1.3.5 耗水量与水分利用效率 采用水平衡法计算耗水量 ET(evapotranspiration),计算公式为:

$$ET=H_1-H_2+P+I$$
 (1)

式中:ET 为阶段耗水量(mm);H₁ 为播种前 60 cm 土壤贮水量(mm);H₂ 为成熟期 60cm 土壤贮水量(mm);P 为玉米生育期内降水量(mm);I 为灌水量(mm)。

玉米水分利用效率 WUE(water use efficiency, g/kg),计算公式为:

$$WUE=Y/ET$$
 (2)

式中:WUE 为水分利用效率(g/kg);Y 为玉米产量(kg/hm²);ET 为阶段耗水量(mm)。

1.4 数据处理

利用 Excel 2021 软件进行数据整理,采用 SPSS 25.0、Surfer 8.0 和 Origin 2021 软件对数据进行统计分析和图形化处理。

2 结果与分析

2.1 不同覆盖对盐碱地玉米根区土壤含水量的影响

土壤含水量随灌水及降水的影响而变化。由图 3 可知,垂直方向上的土壤水分从表层到深层逐渐增大,各处理 20—60 cm 土层含水量较 0—20 cm 土层升高,差值为 0.39%~3.59%。不同覆盖对土壤含水量的影响有较明显的差异,T2、T3 处理 0—60 cm 土层的土壤含水量显著大于 T4 处理($p<0.05$)。T2 较 T4 处理 0—60 cm 土层的含水量在 W1 灌水量下升高 15.72%~31.07%,W2 灌水量下升高 6.73%~16.05%,在 W3 灌水量下提高 14.44%~24.96%;T3 处理较 T4 处理 0—60 cm 土层含水量在 W1 灌水量下的升高 14.56%~33.76%,在 W2 和 W3 灌水量下分别升高 6.44%~17.49%和 18.39%~27.27%;W3T1 处理下不同土层的含水量也较 W3T3 处理有所降低,0—20 cm 土层平均降低 13.16%,20—40 cm 土层平均降低 4.64%,40—60 cm 土层平均降低 8.33%。在 6 月 21 日(播种后 57 天)灌水后不同处理 0—60 cm 土层的含水量呈上升趋势,而降水对土壤含水量的影响较小。玉米收获期,土壤水分先增大后减小,其中 T1 处理在收获期的土壤水分变化幅度最大,T4 处理在

0—60 cm 土层的含水量均显著低于其他 3 种处理,8 月 23 日(播种后 120 天)T4 处理土壤含水量均值较 T1、T2 和 T3 处理分别降低 17.50%,18.87%,18.35%。在 W1、W2、W3 灌水量所有覆盖下同一深度土层的含水量均相近,没有显著性差异。结果说明 2 种可降解地膜覆盖下 0—60 cm 土层土壤的含水量较普通 PE 地膜和无覆盖处理有所提高,PBAT 全生物可降解地膜有较好的保墒效果,而生育期后期膜降解后对土壤的水分含量影响减弱。

2.2 不同覆盖滴灌对盐碱地玉米根区 0—60 cm 土层 EC_{1:5} 值的影响

土壤中的盐分随着水分的运动而发生转移,因此任何影响水分运动的因素对盐分的迁移产生影响,随生育期的推进土壤水分发生变化,对土壤全盐含量造成影响。由 0—60 cm 土层 EC_{1:5} 值等高线变化(图 4)可知,拔节期内(播种后 38~57 天)各处理 0—20 cm 土层土壤全盐含量较成熟期(播种后 139~152 天)平均 EC_{1:5} 值提高 37%~175%,在 W1 灌水处理下 T2 处理的 EC_{1:5} 值显著低于 T4 处理,降低 14.87%($p<0.05$),在 W2、W3 灌水处理下 T2 和 T3 处理的 0—60 cm 土层土壤 EC_{1:5} 值差异不显著。整个生育期内,不同灌水量条件下的土壤盐分发生聚集的深度不同。在苗期和拔节期内,W1 灌水量时,0—20 cm 土层出现盐分表聚现象,最高达到 684 μS/cm,W2 灌水量时 0—30 cm 土层形成较高的盐分积累,最高达到 683 μS/cm,而 W3 灌水量时在 0—10 cm 土层形成盐分积累,最高达到 567 μS/cm。随着玉米生长周期的推进,对土壤进行灌溉后,抽雄期(播种后 87 天)开始各处理 0—20 cm 土层聚集的土壤盐分向下运移,W1 灌水量下的各处理 20—40 cm 土层 EC_{1:5} 值均高于 0—20 cm 土层,可能是由于灌溉和降水引起土壤盐分随水分发生运移。

2.3 不同覆盖对盐碱地玉米干物质及产量的影响

2.3.1 不同覆盖对盐碱地玉米干物质的影响 春玉米干物质积累量增长速率在整个生育期内先增大后减小,在蜡熟期(139 天)干物质质量趋于稳定。

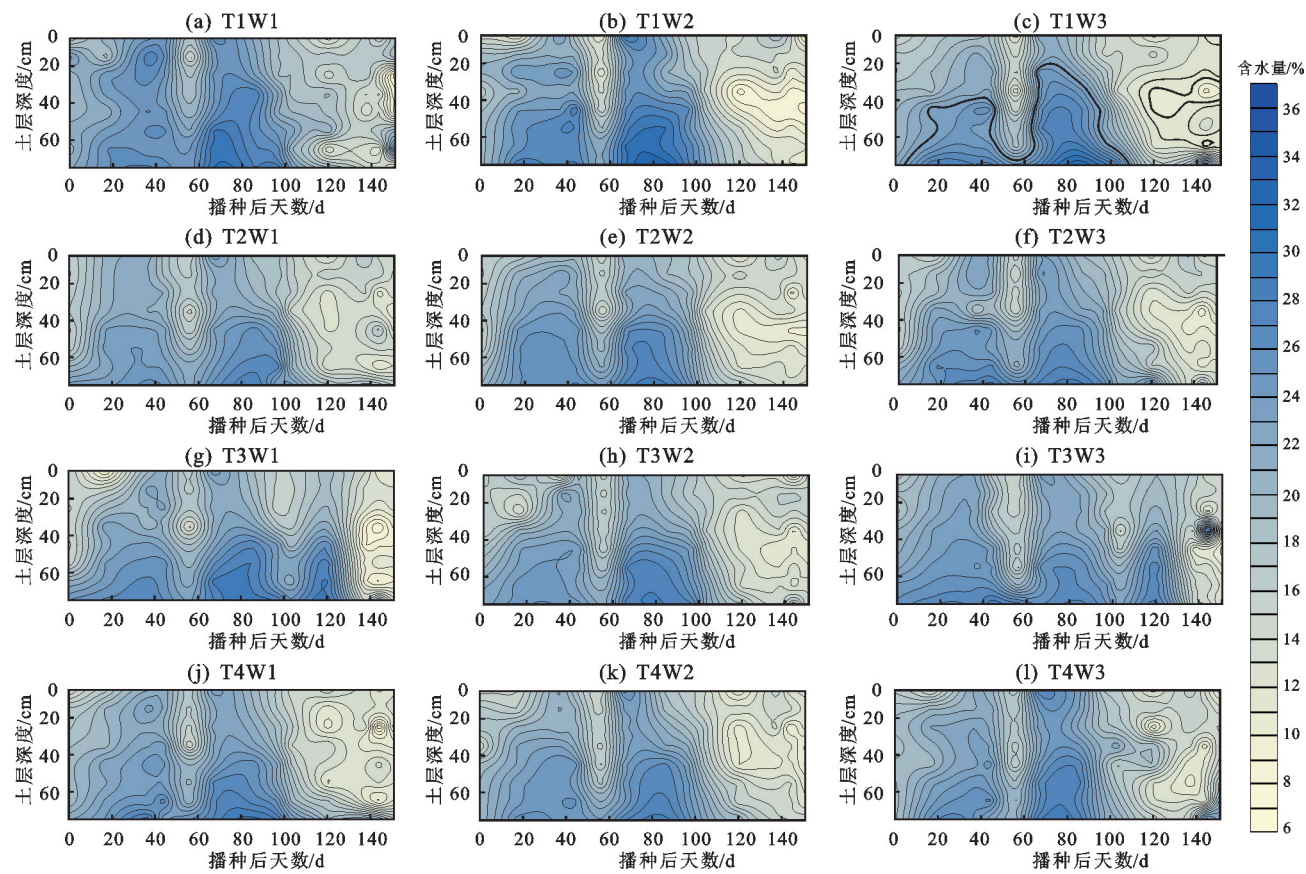


图 3 不同覆盖滴灌下 0—60 cm 土层土壤含水量分布

Fig.3 Distribution of soil moisture content in 0—60 cm soil layer under different mulching drip irrigation

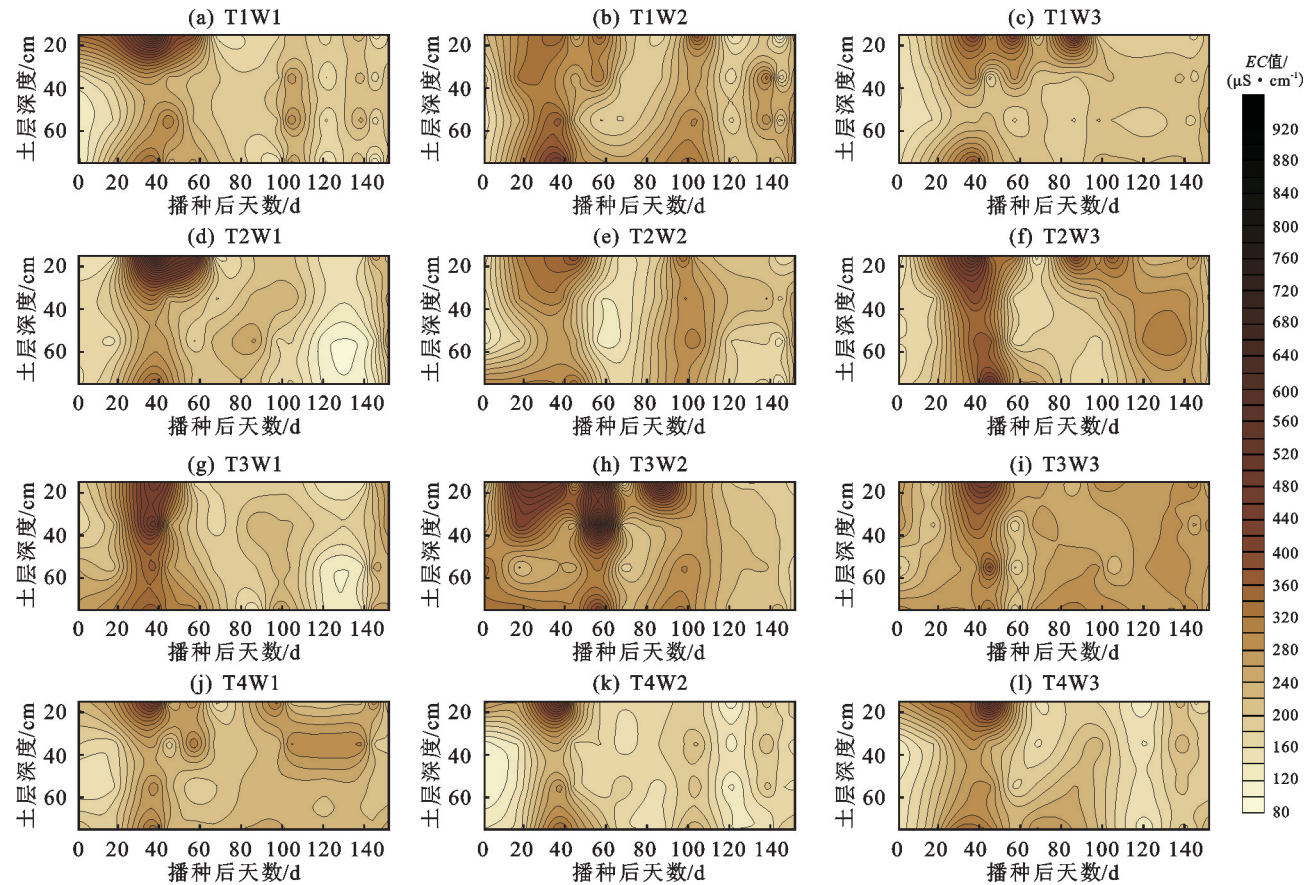


图 4 不同覆盖滴灌下 0—60 cm 土层土壤 $EC_{1.5}$ 值分布

Fig.4 Distribution of soil $EC_{1.5}$ values in 0—60 cm soil layers under different mulching drip irrigation

由表 2 可知,在拔节期,不同灌水量下 T3 处理的干物质积累量较 T1 处理平均显著增加 85.95% ($p < 0.05$);在蜡熟期,T3 处理在不同灌水量下的干物质积累量较 T1 处理平均显著增加 18.94%,较 T4 处理平均显著增加 18.60%;在完熟期,T4 处理在不同灌水量下的干物质积累量比 T1 处理显著增加 16.97%,比 T2 处理增加 15.51%。从整个生育期来看,在 W2 灌水下 T1 和 T2 处理的干物质积累量差异显著,T3

处理的干物质积累量比 T1 处理显著增加 30.68%,其余处理之间差异均不显著。

由此可知,PBAT 全生物可降解地膜干物质的积累量高于无覆盖处理,普通 PE 地膜干物质积累量则高于无覆膜和黑色 PBAT 全生物可降解地膜,膜覆盖有益于作物的生长,灌水量对干物质积累量的差异不显著,考虑到生育期后期降水量过多也会削弱灌水处理对玉米的影响。

表 2 不同覆盖滴灌下关键生育期地上部分干物质

处理	苗期	拔节期	大喇叭口期	花粒期	乳熟期	蜡熟期	完熟期
T1W1	0.074 9±0.000 2b	2.23±0.01e	72.39±0.01f	144.69±0.03e	367.82±0.02d	454.49±0.02e	447.59±0.03e
T2W1	0.072 9±0.000 5b	6.53±0.02a	91.74±0.01b	152.12±0.08c	379.92±0.04b	459.47±0.02e	401.09±0.02f
T3W1	0.081 2±0.000 7a	6.69±0.01a	82.88±0.01d	149.36±0.08c	375.25±0.01c	542.79±0.03a	470.81±0.02d
T4W1	0.078 2±0.000 5a	6.12±0.02b	85.57±0.02c	143.17±0.05e	324.35±0.16f	405.73±0.03f	545.73±0.02a
T1W2	0.073 8±0.000 4b	3.23±0.01e	82.66±0.01d	146.87±0.04d	315.06±0.02f	409.53±0.02f	416.78±0.02f
T2W2	0.057 5±0.000 4d	3.25±0.01e	94.84±0.01a	146.96±0.03d	462.95±0.03a	546.68±0.02a	481.91±0.11c
T3W2	0.063 0±0.001 6c	5.13±0.01b	98.21±0.03a	161.28±0.05b	432.59±0.02a	540.35±0.04b	510.92±0.02b
T4W2	0.069 3±0.000 3c	4.18±0.02c	91.82±0.03b	140.98±0.04f	361.13±0.02e	474.58±0.12d	502.08±0.04c
T1W3	0.072 8±0.000 4b	3.53±0.03d	88.17±0.01c	161.99±0.09b	367.59±0.02d	487.21±0.04c	460.84±0.11d
T2W3	0.081 2±0.000 3a	4.13±0.02d	77.27±0.01e	180.85±0.09a	372.02±0.03c	469.57±0.02d	458.97±0.02e
T3W3	0.074 6±0.000 2b	4.87±0.04c	75.54±0.01f	190.74±0.06a	403.92±0.03b	524.04±0.02b	514.11±0.03a
T4W3	0.075 3±0.000 4b	4.15±0.02cd	80.47±0.01e	147.68±0.02d	342.53±0.02e	474.77±0.03c	502.27±0.03b

注:表中数据为平均值±标准差;同列不同小写字母表示不同处理间差异显著($p < 0.05$)。下同。

2.3.2 不同覆盖对盐碱地玉米产量的影响 不同覆盖滴灌处理对玉米生长过程中造成的差异影响春玉米的产量。由表 3 可知,不同覆盖滴灌处理下的籽粒含水量呈显著性差异($p < 0.05$),T4 处理下的籽粒含水量较 T3 处理高 11.6%~15.7%。在 W1 灌水量下,T4 处理的行粒数显著小于其他 3 种处理,且 3 种灌水量下 T3 处理的行粒数均高于 T4 处理,差值为 10.26%~13.16%。不同覆盖滴灌下的单穗重也呈显著性差异,T1 处理的单穗重显著低于其他 3 种处理,平均分别降低 27.06%,37.75%,30.66%;W2 灌水量下的单穗重显著高于 W1 和 W3,提高约 14.69%~25.99%。不同灌水处理下的产量呈显著性差异,W2 灌水处理下的平均产量较 W3 显著增加 26.60%,灌水量过低对作物产量造成负面影响,而灌水量过高时,对作物产量表现出的差异并不显著,在 W3 灌水量下,T2、T3 和 T4 处理的产量显著高于 T1 处理的产量,说明 PBAT 可降解膜覆盖有利于干物质的积累,增加产量。

2.4 不同覆盖滴灌对盐碱地玉米水分利用效率的影响

不同覆盖处理下的耗水量随灌水量的增加呈增加趋势。由图 5 可知,W1 灌水处理下的全生育期耗水量显著高于另外 2 种灌水处理($p < 0.05$)。T1 处理在 W1 灌水处理下的耗水量较 W2 和 W3 分别显著升高

53.6%,107.5%;T2 处理在 W1 灌水处理下的耗水量较 W2 和 W3 分别显著升高 22.14%,87.85%;T3 处理在 W1 灌水处理下的耗水量较 W2 和 W3 分别显著升高 31.98%,52.83%;T4 处理在 W1 灌水处理下的耗水量较 W2 和 W3 分别显著升高 20.33%,42.95%。在 W2 和 W3 灌水处理下,T4 处理的耗水量较 T2 和 T3 处理分别平均显著升高 26.60%和 30.93%。T1 处理的耗水量在不同灌水量下均显著高于 T2 和 T3 处理,说明无覆盖处理下的无效蒸发量较多,PBAT 全生物可降解地膜覆盖下土壤保墒作用明显。

随着灌水量的增加,耗水量也不断增加,水分利用效率呈降低趋势。由图 6 可知,不同处理下玉米的水分利用效率随着灌水量的减少而增加。且在同一灌水量下,T2 和 T3 处理的水分利用效率高于 T1 和 T4 处理。可以看出水分利用效率和耗水量随灌水量的变化趋势呈反比,且耗水量越低,产量也越高,T2 处理的耗水量较 T4 处理降低 21.01%,水分利用效率提高 49.42%,产量提高 14.37%。T3 处理的耗水量较无覆盖降低 24.29%,水分利用效率提高 35.36%,产量提高 4.57%。W1T2 处理的水分利用效率较 W1T3 处理低,而 W2 和 W3 灌水量下 T2 处理的水分利用效率较 T3 处理高,说明 T2 处理的保墒作用和透气性与 T3 处理不一致,T2 处理对灌水量变化的敏感度高。

表 3 不同覆盖滴灌下春玉米产量及其构成因素与收获指数

Table 3 Yield and its components and harvest index of spring maize under different mulching drip irrigation						
处理	籽粒含水量/%	千粒重/g	行粒数	单穗重/g	产量/(kg·hm ⁻²)	收获指数
T1W1	28.80ab	370.18bc	46a	275.88cd	17 101.94a	0.61ab
T2W1	29.40ab	412.02ab	43a	254.55ad	13 637.31bc	0.63ab
T3W1	26.60b	354.42b	44ab	330.23ad	16 411.18ab	0.603b
T4W1	29.70a	378.54ab	39cd	308.81cd	13 929.11bc	0.59bc
T1W2	28.30ab	364.66b	41bc	292.58bc	18 340.17a	0.63ab
T2W2	28.70ab	304.92bc	41cd	376.84ab	20 208.43a	0.58bc
T3W2	27.40b	349.04ab	43a	358.14ab	17 710.22a	0.54c
T4W2	28.60a	379.46a	39cd	313.90ab	14 843.95ab	0.60b
T1W3	28.50ab	354.42c	37e	153.25cd	11 546.75c	0.60b
T2W3	28.20ab	366.88b	40cd	285.54ad	15 355.13ab	0.64a
T3W3	29.00b	396.40a	43bc	305.77ad	15 015.35ab	0.58bc
T4W3	29.10a	371.28ab	38d	320.10ad	14 247.76b	0.64a

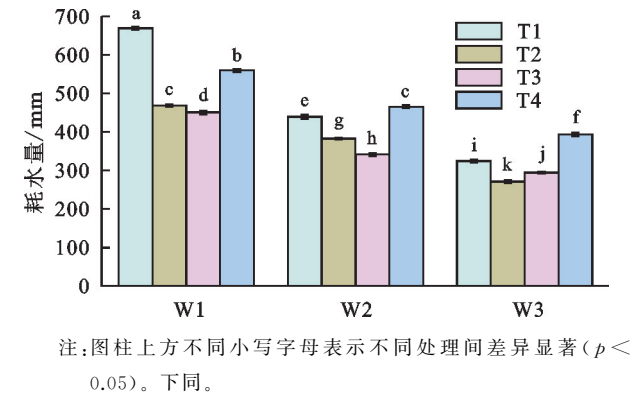


图 5 不同覆盖滴灌下玉米耗水量

Fig.5 Water consumption of maize under different mulching drip irrigation

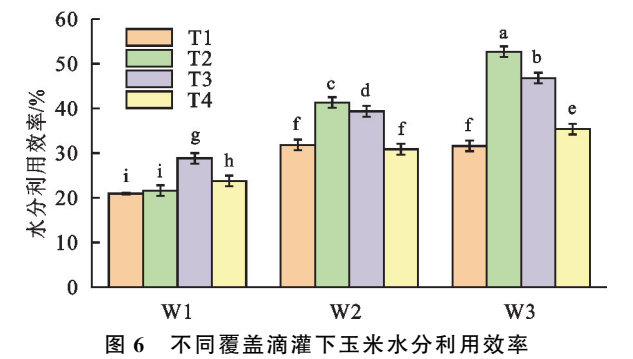
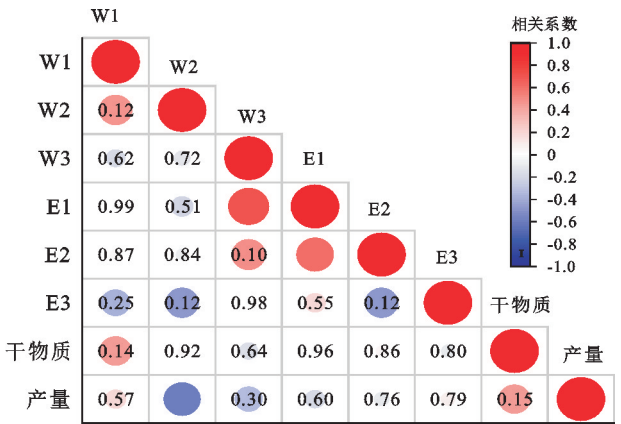


图 6 不同覆盖滴灌下玉米水分利用效率

Fig.6 Water-use efficiency of maize under different mulching drip irrigation

2.5 水盐与产量、干物质的相关性分析

玉米各成熟期内水盐与玉米产量和干物质积累之间的 Pearson 相关性分析见图 7。Pearson 相关性分析结果表明,玉米在成熟期的土壤水盐含量和玉米产量及干物质积累量间均在一定程度上具有相关性。与深层土壤相比,0—20 cm 土层的含水量对干物质积累量正相关,而不同土层的水盐含量与作物产量相关性不显著。



注:W1 为 0—20 cm 土层含水量;W2 为 20—40 cm 土层含水量;W3 为 40—60 cm 土层含水量;E1 为 0—20 cm 土层 EC_{1:5} 值;E2 为 20—40 cm 土层 EC_{1:5} 值,E3 为 40—60 cm 土层 EC_{1:5} 值。

图 7 土壤水盐与玉米产量、干物质的相关性分析

Fig.7 Correlation analysis of soil water and salt with maize yield and dry matter

3 讨论

PBAT 生物可降解地膜可以在作物生育期后降解,减少对土壤的污染,并且具有高效的保墒作用。灌水量的不同也对土壤含水量有着一定影响。随着灌水量的增加,土壤含水量也随之增加。且随着土层深度增加,含水量虽不断升高,但是受到灌水处理和降水的影响逐渐降低。不同处理之间,PBAT 生物可降解膜覆盖下的土壤含水量高于无覆盖,是由于 PBAT 地膜阻隔减少土壤—空气界面间的蒸发作用,而无覆盖时地表蒸发量大,含水率降低。PBAT 生物可降解膜覆盖下的土壤含水量高于普通 PE 地膜处理,原因是在玉米不同的生长阶段,玉米生长的需水量不同,消耗的土壤水分不同,在拔节期和灌浆期,不同覆盖的土壤含水量随相同趋势波动,到生育后期,虽然 PBAT 生物可降解膜破裂,土壤含水量通过蒸发作用被消耗,但

是由于普通黑色地膜密封性良好,且黑膜具有较低的透射系数,吸收大部分可见光,从而提高土壤温度,促进玉米的生长发育和蒸腾作用,普通 PE 地膜覆盖下的玉米进行蒸腾作用消耗的水分远大于全生物可降解地膜,导致其土壤含水量低。PBAT 全生物可降解膜的处理有效减少 0—60 cm 土层土壤水分蒸发,对土壤有较好的保墒作用。

膜覆盖可以有效阻隔土壤与空气间的水气运输,减缓水分子从土壤向大气扩散,限制覆盖土层深层的水分蒸发,有效抑制表层土壤返盐^[8]。PBAT 全生物可降解膜在相同灌水量下,对灌水前后土壤 0—60 cm 土层水分含量的影响远小于不覆膜,且能有效抑制 0—20 cm 土层土壤盐分的聚积。考虑到玉米根系主要分布于 0—40 cm 土层,覆膜可使膜内 0—40 cm 土层盐分积累明显减少,有效抑制 0—20 cm 土层土壤的盐分积累。盐随水走是盐分在土壤中迁移的主要方式,因此,影响水分迁移的因素也影响盐分的迁移。灌水量过大对土壤中的盐分起到淋洗作用,造成盐分向土壤深层迁移,随时间推进,土壤盐分也向土壤深层迁移再分布,高灌水量导致土层中盐分堆积。土壤中盐分的运动非常复杂,受土壤类型、土壤初始含水量、土壤溶液浓度、盐分组成等因素影响^[11]。有研究^[12]表明,膜下滴灌盐分由膜内向膜外地表裸露区迁移,趋于膜外地表累积,与之不同的是,本试验中盐分随水分下移,而非趋于地表累积,0—60 cm 土层在生育期后期无地表盐分积累,表明覆膜滴灌阻隔土壤和大气之间的水分交换,抑盐效果明显。覆膜灌溉对于减轻玉米生长土层的盐分积累有显著的效果,且在高灌水量下 PBAT 可降解膜的抑盐效果优于普通 PE 地膜,但在低灌水量下没有显著差异。

土壤盐渍化程度和滴灌灌水量通过影响根区土壤的水盐动态,进而影响玉米生长、产量和水分利用效率。由表 2 可知,2 种 PBAT 全生物可降解膜覆盖处理下的干物质均显著高于不覆膜处理,说明膜覆盖在减轻土壤 0—60 cm 土层盐分聚集对玉米根系影响的前提下能够促进玉米生长发育,促进玉米植株生长发育,提高玉米干物质和产量。而灌水量对玉米干物质整体的影响不显著,从生育期来看,拔节期后灌水量对玉米干物质的影响可能随着玉米生长过程中抗逆性增强有一定抵御作用;也可能是试验区在 7、8 月极端天气造成降雨对于干物质的影响弱化不同灌水处理的影响。不同灌水量和不同覆盖处理对产量的影响不显著,而普通黑色地膜覆盖下的产量略低于其他 3 种处理,可能是由于普通黑色地膜封闭性良好,保温效果较好,在玉米整个生育期的后期由于温度过高,对玉米的生长造成负面影响,黑色地膜对光线吸收能力强,0—20 cm 土层土壤平均温度比可降解生物膜高^[13],而全

生物可降解膜在玉米生育期后期已开始发生分解,玉米根部通风透气,对玉米生长起到良好的作用^[6]。根据本试验的研究结果,同时考虑产量和水分利用效率,应该选择中、低灌水量(3 300,2 600 m³/hm²)下的全生物可降解膜覆盖处理。

在同一灌水量下,PBAT 全生物可降解膜覆盖处理下的水分利用效率高于另外 2 个处理,无覆盖的耗水量可能由于无效蒸发高于覆盖处理^[14],而普通黑色地膜随着玉米生育期气温升高,覆盖下的土壤还会升温、隔热^[15-16],促进作物的生长,加剧植物蒸腾^[14,16],导致耗水增多。已有研究^[13]发现,随着灌水量的增加,耗水量不断增加,而水分利用效率呈降低的趋势,可能与确定的灌水定额高低有关,随着灌水量的提高,玉米产量总体上虽有所提升,但导致土壤水分的无效蒸发大幅升高,从而降低水分利用效率。而 PBAT 全生物可降解地膜覆盖下的作物温度与湿度较高,根系生长旺盛,可以通过减少水分流失来维持土壤的水分平衡,与无覆盖处理和普通 PE 地膜相比显著提高水分利用效率。根据本试验的研究结果,同时考虑产量和水分利用效率,当地种植模式应该选择中、低灌水量(3 300,2 600 m³/hm²)下的 PBAT 全生物可降解膜覆盖处理。

4 结 论

(1)0—60 cm 土层,黑色和白色 PBAT 全生物可降解地膜较无覆膜的含水量分别提高 9.03%和 4.98%,PBAT 全生物可降解地膜较无覆膜具有良好的保墒效果,能满足作物生长水分需求。

(2)黑色 PBAT 全生物可降解地膜、白色 PBAT 全生物可降解地膜和普通 PE 地膜 0—60 cm 土层土壤全盐含量较无覆盖减少 15.01%~23.10%,PBAT 全生物可降解地膜能够节水抑盐,有效控制根区土壤盐分积累。

(3)不同覆盖处理在 3 300 m³/hm²灌水量下的作物产量和水分利用效率高于其他灌水处理。黑色和白色 PBAT 全生物可降解地膜的作物生产指标及产量与普通 PE 地膜差异不显著,且均显著高于未覆膜处理。可降解地膜替代普通地膜应用于盐碱地滴灌农业生产具有可行性,明确 PBAT 膜在农业中的推广与应用具有重要意义。

参考文献:

- [1] 刘小京,郭凯,封晓辉,等.农业高效利用盐碱地资源探讨[J].中国生态农业学报(中英文),2023,31(3):345-353.
LIU X J, GUO K, FENG X H, et al. Discussion on the agricultural efficient utilization of saline-alkali land resources[J].Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2023, 31(3):345-353.
- [2] 刘赛华,杨广,张秋英,等.典型荒漠植物梭梭在咸水滴

- 灌条件下土壤水盐运移特性[J].灌溉排水学报,2020,39(1):52-60.
- LIU S H, YANG G, ZHANG Q Y, et al. Experimental study on water and solute movement in soil grown with desert plant *Haloxyylon ammodendron* under drip irrigation using saline water[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2020, 39(1): 52-60.
- [3] 罗帅,冯浩,李成,等.旱区垄膜沟灌不同灌水量对土壤水盐及春玉米产量的影响[J].水土保持学报,2021,35(4):259-266.
- LUO S, FENG H, LI C, et al. Effects of different irrigation amounts on soil water and salt and yield of spring maize under ridge with film mulching and furrow irrigation in arid area[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021, 35(4): 259-266.
- [4] 白蒙,吕廷波,徐强,等.水分调控对机采棉土壤水盐迁移的影响[J].西南农业学报,2020,33(4):842-847.
- BAI M, LÜ T B, XU Q, et al. Effect of water regulation on water and salt movement in machine cotton[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2020, 33(4): 842-847.
- [5] 徐蕊,魏广彬,张洪海,等.全生物降解膜覆盖对有机栽培水稻产量和杂草发生的影响初探[J].农业科技通讯,2023(1):57-60.
- XU R, WEI G B, ZHANG H H, et al. Preliminary study on the effect of full biodegradable film mulching on the yield and weed occurrence of organically cultivated rice[J]. Bulletin of Agricultural Science and Technology, 2023(1): 57-60.
- [6] 汪敏,严施娜,蒋希芝,等.PBAT/PLA全生物降解地膜的降解性能及对石河子垦区棉花生长的影响[J].农业工程学报,2022,38(增刊1):273-282.
- WANG M, YAN N N, JIANG X Z, et al. Degradation performance of PBAT/PLA biodegradable plastic film and its influence on cotton growth in Shihezi reclamation area[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2022, 38(S1): 273-282.
- [7] WANG Z Y, LI M X, FLURY M, et al. Agronomic performance of polyethylene and biodegradable plastic film mulches in a maize cropping system in a humid continental climate[J]. Science of the Total Environment, 2021, 786: e147460.
- [8] 王剑,杨北方,陈焕轩,等.覆膜对滴灌棉田土壤水分时空迁移的影响[J].新疆农业科学,2021,58(7):1255-1264.
- WANG J, YANG B F, CHEN H X, et al. Effects of plastic film mulching on temporal-spatial migration of soil moisture in drip irrigation cotton field[J]. Xinjiang Agricultural Sciences, 2021, 58(7): 1255-1264.
- [9] 祁鸣笛,张彦群,王卫杰,等.覆膜滴灌对玉米田间水热传输及耗水的影响[J].排灌机械工程学报,2020,38(7):731-737.
- QI M D, ZHANG Y Q, WANG W J, et al. Effect of mulched drip irrigation on water and heat transfer and crop water consumption in maize field[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2020, 38(7): 731-737.
- [10] 张明达,张国强,王克如,等.种植密度和灌溉量对西辽河平原春玉米产量及水分利用效率的影响[J].玉米科学,2023,31(1):116-125.
- ZHANG M D, ZHANG G Q, WANG K R, et al. Effects of planting density and irrigation amount on yield and water use efficiency of spring maize in the West Liaohe Plain[J]. Journal of Maize Sciences, 2023, 31(1): 116-125.
- [11] 周方,席奇亮,薛刚,等.不同滴灌施肥策略对植烟土壤水、盐运移及再分布的影响[J].节水灌溉,2023(11):99-106.
- ZHOU F, XI Q L, XUE G, et al. Effects of different fertigation strategies on soil water and salt movement and redistribution in tobacco-growing soil[J]. Water Saving Irrigation, 2023(11): 99-106.
- [12] 居雯雯,邵梦璇,刘海军,等.地面灌溉和滴灌下覆膜对土壤盐分和氮素空间分布的影响[J].农业工程学报,2022,38(增刊1):68-75.
- JU W W, SHAO M X, LIU H J, et al. Effects of film mulching on the spatial distribution of salinity, nitrate nitrogen and ammonium nitrogen in soil under surface and drip irrigations[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2022, 38(S1): 68-75.
- [13] 周振鹏,叶含春,王振华,等.降解膜覆盖下磁化水滴灌对加工番茄产量和水分利用效率的影响[J].排灌机械工程学报,2023,41(12):1268-1275.
- ZHOU Z P, YE H C, WANG Z H, et al. Effects of magnetized water drip irrigation under degradable film mulching on yield and water use efficiency of processed tomatoes[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2023, 41(12): 1268-1275.
- [14] 刘庆,马建涛,柴雨葳,等.覆盖栽培对旱地春玉米耗水特性的影响[J].甘肃农业大学学报,2024,59(3):145-153.
- LIU Q, MA J T, CHAI Y W, et al. Effects of mulch pattern on water use characteristics and yield of dryland spring maize[J]. Journal of Gansu Agricultural University, 2024, 59(3): 145-153.
- [15] 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):1312-1324.
- 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): 1312-1324.
- [16] 马金梅.不同地膜覆盖对土壤水温效应及玉米产量的影响[J].世界热带农业信息,2023(12):76-78.
- MA J M. Effects of different plastic film mulching on soil water temperature and maize yield[J]. World Tropical Agriculture Information, 2023(12): 76-78.